

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM/Т.33.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ПЕДИАТРИЯ ТИББИЁТ ИНСТИТУТИ

НУРМУХАМЕДОВ АБДУФАТТАХ МАХКАМОВИЧ

**ВИГНЕРНИНГ СПИН-ИЗОСПИН $SU(4)$ -СИММЕТРИЯСИ, УНИ
БУЗУВЧИ ОМИЛЛАР, СИММЕТРИЯНИ БАЖАРИЛИШ ДАРАЖАСИ
ВА ОҒИР АТОМ ЯДРОЛАРИ СОҲАСИДАГИ ТИКЛАНИШИ**

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

**Физика-математика фанлари доктори (DSc) диссертацияси
АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2020

**Физика-математика фанлари доктори (DSc) диссертацияси
автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора (DSc)
физико-математических наук**

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

Нурмухамедов Абдуфаттах Махкамович

Вигнернинг спин-изоспин $SU(4)$ -симметрияси, уни бузувчи омиллар,
симметрияни бажарилиш даражаси ва оғир атом ядролари соҳасидаги
тикланиши 3

Нурмухамедов Абдуфаттах Махкамович

Вигнеровская спин-изоспиновая $SU(4)$ -симметрия, нарушающие
факторы, степень реализации симметрии и восстановление в области
тяжелых атомных ядер 25

Nurmukhamedov Abdufattakh Makhkamovich

Wigner's spin-isospin $SU(4)$ -symmetry, violating factors, level of
realization and restoration in the field of heavy atomic nuclei 49

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 57

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ПЕДИАТРИЯ ТИББИЁТ ИНСТИТУТИ

НУРМУХАМЕДОВ АБДУФАТТАХ МАХКАМОВИЧ

**ВИГНЕРНИНГ СПИН-ИЗОСПИН $SU(4)$ -СИММЕТРИЯСИ, УНИ
БУЗУВЧИ ОМИЛЛАР, СИММЕТРИЯНИ БАЖАРИЛИШ ДАРАЖАСИ
ВА ОҒИР АТОМ ЯДРОЛАРИ СОҲАСИДАГИ ТИКЛАНИШИ**

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

**Физика-математика фанлари доктори (DSc) диссертацияси
АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2020

Фан доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2019.1.DSc/FM134 рақами билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертация Тошкент педиатрия тиббиёт институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) илмий кенгаш веб-саҳифага (www.inp.uz) ва “Ziynet” ахборот порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:	Муминов Толиб Мусаевич физика-математика фанлари доктори, профессор, Ўзбекистон Республикаси фанлар академияси академиги
Расмий оппонентлар:	Новиков Юрий Николаевич физика-математика фанлари доктори, профессор Усманов Пазлитдин Нуритдинович физика-математика фанлари доктори, профессор Турсунов Эргаш Махкамovich физика-математика фанлари доктори
Етакчи ташкилот:	Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Физика-техника институти “Физика-Қуёш” илмий ишлаб-чиқариш бирлашмаси

Диссертация ҳимояси Ядро физикаси институти ҳузуридаги DSc.02/30.12.2019.FM/Т.33.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2020 йил «_____» соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100214, Тошкент ш., Улуғбек кўрғони, ЯФИ; тел. (+99871) 289-31-18; факс (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Диссертация билан Ядро физикаси институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100214, Тошкент ш., Улуғбек кўрғони, ЯФИ; тел. (+99871) 289-31-19).

Диссертация автореферати 2020 йил «_____» куни тарқатилди (2020 йил «_____» даги _____ рақамли реестр баённомаси).

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

С.Б.Игамов
Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д., катта илмий ходим

И. Нуритдинов
Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси
ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (докторлик (DSc) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти. Ҳозирги вақтда дунёда ядро физикасининг экспериментал базаси ғайриоддий хоссага эга бўлган экзотик нуклидларни олишга қаратилган. Турли-туман яратилган экспериментал комплекслар таркиби аномал сонли протон ва нейтрондан иборат нуклидларни ўрганади. Бундай комплекслар ядро муаммоларини ечишдан ташқари астрофизик жараёнларни тушинтиришда катта ўрин тутади. Ўта оғир ядролар худудида улар релятивистик жараёнлар ва шу жараёнларни Д.И. Менделеев Даврий жадвалидаги янги атомларни хоссаларини ёритишга мўлжалланган. Бундай комплекслар олдида қўйилган масалалар муваффақиятли ечилиши учун нуклид харитасида жойлашган экзотик ядролар массиви ҳақида ахборот олиш зарур. Бундай экспериментал ахборотни олиш назарий физика усуллари ёрдамида адекват қаромат қилишни талаб қилади.

Бугунги кунда бу муҳим масалани ечиш учун яхшиси мураккаб квант тизимларини тавсифловчи суперсимметрияга асосланган назарияни қўллаган маъқул. Масалага бундай ёндошиш ядро хоссаларини моделлаштиришни соддалаштиради ва катта миқдордаги маълумотлар массивини тавсифлашга имконият беради. Шу ердан диссертацияни долзарблиги келиб чиқади, чунки диссертацияда атом ядроларида Вигнернинг спин-изоспин $SU(4)$ -симметрияси каби суперсимметрияни бажарилиш масалалари кўрилган. Ядроларда спин-изоспин $SU(4)$ -симметриясини бажарилиши диссертация ишининг зарурлиги бўлиб, атом ядроси каби мураккаб тизим хоссаларини симметрияга асосланиб назарий жихатдан муваффақиятлироқ тавсифлаш имкониятини яратади.

Бизнинг республикамызда атом ядросини назарий ва экспериментал ўрганиш масалаларига катта эътибор қаратилади. Мамлакатимиз ривожини учун катта аҳамият эга бўлган бу фундаментал тадқиқотлар йўналиши ва унинг кейинчалик амалий қўлланилиши 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида¹ акс эттирилган.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947–сон «Ўзбекистон Республикасини 2017-2021 йилларда янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, Ўзбекистон Республикаси ҳукумати томонидан 29 ноябр 2018 йилда эъдон қилинган “2019-2021 йилларга мўлжалланган асосий иқтисодий ислохотлар йўл харитаси” қарорларини амалга оширишга ушбу диссертация ишида ўтказилган тадқиқотлар муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожланишининг II. «Энергетика, энергия

¹ 2017 йил 07 февралдаги ПФ-4947 сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида» Ўзбекистон Республикаси Президенти Фармони

тежамкорлиги ва муқобил энергия манбалари» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий тадқиқотлар шарҳи. Вигнернинг спин-изоспин $SU(4)$ -симметриясига бағишланган тадқиқотлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасаларида, жумладан: University of Wisconsin-Madison (АҚШ), Scuola Normale Superiore-Pisa ва INFN Sezione de Pisa (Италия), The Niels Bohr Institute (Копенгаген, Дания), Cyclotron Laboratory and Physics Department, Michigan State University (АҚШ), Indiana University (Bloomington, АҚШ), Миллий тадқиқот маркази “Курчатов институти” (Россия), Москва физика-техника институти (Россия) ва бошқалар томонидан олиб борилмоқда.

Вигнер спин-изоспин $SU(4)$ -симметрияси бўйича дунё миқёсида олиб борилган экспериментал ва назарий тадқиқотлар асосида анча илмий натижалар олинган, шу жумладан: Индиана Университети (АҚШ) да Галонский гуруҳи томонидан оғир ядролар соҳасида pn -туридаги реакцияни кузатиш экспериментларида аналог ва Гамов-Теллер резонансларини “айниши” кузатилган. Аналог ва Гамов-Теллер резонансларини “айниши” назарий томондан фақатгина Вигнернинг спин-изоспин $SU(4)$ -симметрияси тикланганда содир бўлиши Гапонов ва бошқалар томонидан қаромат қилинган эди. Лекин, pn -туридаги реакция экспериментлари юқори даражали радиоактив фон шароитида бажарилгани сабабли қўпол усул ҳисобланади. Вигнер симметриясини тикланиш соҳасини аниқ топиш учун ядро массаларини таҳлил қилиш зарур. Ядро массаларини таҳлил қилиш орқали спин-изоспин симметрияни тикланишини экспериментал аниқлаш учун интенсив урунишлар қилинди. Катта ҳажмдаги тадқиқот ишлари бажарилишига қарамасдан бу урунишлар, йўл қўйилган услубий хатоликлар сабабли, муваффақиятсизликга учради.

Ҳозирги вақтда жаҳонда Вигнер спин-изоспин $SU(4)$ -симметрияси қатор устивор йўналишлар бўйича, шу жумладан: экзотик ядролар массивлари ҳақида экспериментал ахборот олиш, спин-изоспин симметриясини оғир ядролар соҳасидаги тикланишини экспериментал кузатишга доир тадқиқотлар «Курчатов институти» миллий тадқиқот маркази ва Москва физика-техника институтлари томонидан олиб борилмоқда.

Муаммони ўрганилганлик даражаси. Вигнер спин-изоспин симметрияси тадқиқоти билан жаҳоннинг етакчи илмий марказларини қўпгина олимлари машғул, масалан, америкалик (Э. Вигнер, А. Галонский ва б., Д. Баитум ва б.), италиялик (П. Францини ва А. Радикати), россиялик (Ю.В. Гапонов, Ю.И. Григорьян, Ю.С. Лютостанский, Б. Шульгина, Д.М. Владимиров ва б.).

Вигнер масса формуласини $A \leq 110$ соҳада экспериментал массалар орқали таҳлил қилиш, Вигнер функцияларини универсаллиги даражасини аниқлаш ва Вигнер бўйича фақат изоспинга боғлиқ бўлган омил-мезон қийматлари ҳисобланди (П. Францини ва А. Радикати). Францини ва Радикатилар чекланган сонли ядро массаларидан фойдаланганлар. Бундан ташқари улар омил-мезон қийматларини ҳисоблашда методик хатога йўл

қўйишган: улар ҳисоблашларда ядро массаси ўрнига жадвалларда келтирилувчи нейтрал атом массаларидан фойдаланган. Ядроларни экспериментал массаларини таҳлил қилиш орқали оғир ядролар ҳудудида Вигнер симметриясини тикланишини исботлаш мақсадида катта тадқиқотлар ўтказилган (Ю.В. Гапонов, Ю.И. Григорян, Ю.С. Лютостанский, Б. Шульгина, Д.М. Владимиров). Авторлар омил-мезон қиймати ҳисобланувчи формулага Кулон тузатишини киритдилар ва жуфтлашиш ходисасини суний усулда ҳисобга олишди. Фойдаланилган дастлабки маълумотлар хато бўлгани сабабли улар Вигнер эмпирик функцияларини, атом ядроларида Вигнер симметрияси ўринлиги даражасини ва симметрия тикланиш соҳасини аниқлай олмадилар.

Атом ядроларида Вигнернинг спин-изоспин $SU(4)$ -симметриясини бузилишига сабабчи бўлувчи омиллар мавжуд. Бу бузувчи омилларни спин-изоспин симметрияга таъсирини ўрни ва ҳар бир ядрода симметрияни бузилиш даражаси ўрганилмаган. Бундан ташқари, ядроларда Вигнер спин-изоспин симметриясини тикланиши мумкинлиги ҳақидаги гипотезани экспериментда кузатиш масаласи очик қолмоқда. Бу муаммони ечилишидаги асосий тўсиқ бўлиб, Вигнер масса формуласидаги универсал функцияларни ядро параметрларига боғлиқлигини ноаниқлиги ҳисобланади. Вигнер симметриясини бузилиш даражасини баҳолаш учун омил-мезоннинг аниқ математик кўринишини билиш лозим, қайсики у ёрдамида атом ядроларида спин-изоспин симметрияси тикланишини статистик усуллар билан таҳлил қилиш имконияти яратилади.

Диссертация мавзусини диссертация бажарилган олий таълим ва илмий-текшириш ташкилотлари илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши ЎзФА Ядро физика институти ва Тошкент педиатрия тиббиёт институти илмий-тадқиқот ишлари режаларининг ОТ-Ф2-011 «Электромагнит нурланишнинг гамма-соҳадаги тўлиқ ташқи қайтиш эффектини тадқиқот қилиш» (2007-2011) ва Ф2-ФА-Ф114 «Паст энергияли реакцияларда ҳосил бўлувчи экзотик ядроларнинг хусусиятларини ва енгид элементларни пайдо бўлишини ўрганиш» (2012-2016) фундаментал лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади спин-изоспин $SU(4)$ -симметрияни бузувчи омилларнинг ўрни ва бузилишдаги улушини, ядроларда симметриянинг бузилиш даражасини аниқлаш ва спин-изоспин симметрияни оғир ядролар соҳасида тикланишини исботлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

масса сонини кенг ўзгариш соҳасига тегишли (илмий адабиётдан олинган) атом ядроларининг тажрибада аниқланган массага тегишли маълумотлардан фойдаланиб Вигнер масса формуласидаги эмпирик функцияларни аналитик кўринишини аниқлаш;

Вигнер ва Вайцеккер масса формулаларини таққослаш орқали Вигнер эмпирик функцияларга физикавий изоҳ бериш;

атом ядроларида Вигнер спин-изоспин $SU(4)$ -симметриясини бажарилиш даражасини омил-мезон қийматларини масса сони ўзгариш соҳада ҳисоблаш орқали баҳолаш;

Вигнер спин-изоспин симметрияси тўлиқ бажарилган ҳолат учун изоспинга ва Вигнер ядролар турига боғлиқлигини ҳисобга олувчи омил-мезонни аниқ назарий формулани топиш;

ҳисобланган омил-мезон қийматларидан фойдаланиб, Стюдентнинг t -мезони усули ёрдамида Вигнернинг спин-изоспин симметриясини атом ядроларида тикланиш-тикланмаслигини аниқлаш, Стюдентнинг t -мезони ёрдамида олинган статистик хулосаларни олий ишончлилигини Вигнер типигаги ҳамма ядроларда тасдиқлаш;

Вигнер спин-изоспин $SU(4)$ -симметрияси тикланган атом ядролари массасини абсолют қийматларини ҳисоблаб, экспериментал маълумотлар билан таққослаш.

Тадқиқотнинг объекти бўлиб кучли таъсирлашиш учун ҳос бўлган спин-изоспин $SU(4)$ -симметрия ходисаси ҳисобланади.

Тадқиқотнинг предмети бўлиб очиқ адабиётда чоп этилган масса сонларини кенг ўзгариш соҳаси учун ядро физикасини бутун ривожланиш давридаги экспериментда аниқланган атом ядролари массалари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари кенг соҳада ўзгаривчи атом сонлари учун ядро массаларига тегишли экспериментал маълумотларни Вигнер спин-изоспин $SU(4)$ -симметриясини математик статистика усуллари қўллаш билан таҳлил қилиш ва атом массаларини ҳисоблашдан иборат.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

Вигнер $a(A), b(A)$ эмпирик функцияларини маълум ядро массалари асосида аналитик кўриниши аниқланган ҳамда 1800 дан ортиқ нуклидлар учун спин-орбитал таъсирининг ядро массасига қўшган улушининг экспериментал қийматлари ҳисобланган;

Вигнер масса формуласидаги $0.5b(A)\delta$ ҳад ядролардаги жуфтлик энергияси эканлиги исботланган;

масса сонининг кенг ўзгариш соҳасида Франчини-Радикати омилини экспериментал қийматлари аниқ ҳисоблаб топилган ҳамда изоспин проекцияси T_z ва Вигнер ядро турига боғлиқ Франчини-Радикати омили учун аниқ назарий формула топилган;

хар бир ядрода Вигнер спин-изоспин симметрияси бажарилиш даражаси аниқланган;

Франчини-Радикати омил-мезонининг экспериментал ва назарий қийматлари асосида математик статистика усуллари қўллаш орқали Вигнер спин-изоспин симметриясини тоқ масса сонли ва изоспини $T_z \geq 53/2$ бўлган нуклидларда тикланиши ишончлилиги 99% дан катта эҳтимол билан исботланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

Вигнер эмпирик функцияларини физик изоҳи бажарилган;

эксперимент билан қониқарли мос келувчи бета-стабиллик чизигини тасвирловчи формула олинган;

масса сонини бутун ўзгариш соҳасида жойлашган ядролар учун протон ва нейтрон стабиллик чегараси ҳисоблаб топилган;

Вигнер масса формуласи ёрдамида ядро массасини қаромат қилувчи замонавий ёндашувлар аниқлигидан юқори аниқликда қатор янги ўта оғир ядролар учун α -емирилиш энергияси ва яшаш вақти ҳисобланган;

жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ҳозирги вақтда қидираётган тартиб номери $Z=120$ бўлган ўта оғир нуклидлар учун α -емирилиш энергияси ва яшаш вақти ҳисоблаб қаромат қилинган;

Вигнер спин-изоспин $SU(4)$ -симметрияси тикланган, изоспинлари $T_z=51/2, 26, 53/2, 55/2, 28$ ва $57/2$ бўлган бир гуруҳ атом ядроларининг массалари юқори аниқликда (140 кэВ) ҳисобланган.

Олинган натижаларнинг ишончлилиги фойдаланилган маълумотларни юқори даражадаги аниқлиги, янги маълумотлар пайдо бўлганда маълумотлар банкини тўлдириш жараёни юқори технологик бўлиши, замонавий дастурлаш, маълумотларни қайта ишлашда замонавий усуллардан фойдаланиш ва юқори муҳимлик даражасига эга статистик усулларни қўллаш орқали асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Натижаларнинг илмий аҳамияти оғир ва жуда оғир ядролар назариясини ривожлантириш учун ишлатиш мумкинлигида, яъни Вигнер спин-изоспин $SU(4)$ -симметриясини тикланиш факти кўрсатилган ядролар соҳасида назарий ишланмалар учун янги асос бўлиб хизмат қилади.

Натижаларнинг амалий аҳамияти шундан иборатки, биз томондан ишлаб чиқилган Вигнер спин-изоспин симметрияси тикланган атом ядроларининг массаларини абсолют қийматлари ва α – емирилиш энергиясини ҳисоблаш усули изоспини $T_z \geq 51/2$ бўлган нуклидларни масса ва альфа-емирилиш энергиясини башорат қилиш имкониятини берадики, бу “турғинлик оролини” ва хали экспериментда кузатилмаган, лекин қидирилаётган, тартиб рақами $Z=120$ бўлган элемент билан боғлиқ экспериментларни лойихалашда амалиётда ишлатилиши мумкин.

Тадқиқот натижаларини жорий қилиниши. Вигнер атом ядроларидаги спин-изоспин $SU(4)$ -симметрияси каби физик ҳодисани тадқиқоти ва оғир ядролар соҳасида симметрия тикланиши билан боғлиқ олинган натижаларни қўллаш асосида:

ядро массалари экспериментал қийматларига асосланиб Вигнер эмпирик функциялари аналитик тасвирлашда олинган натижалар, Вигнер масса формуласида жуфтлашиш энергияси мавжудлиги, Франчини-Радикати омилини тўғри ҳисобланган экспериментал қийматлари ва уни олинган аниқ назарий формула каби натижалар ПИТРАП лойиҳасида фойдаланилган (Петербург ядро физикаси институтининг (Россия) 2019 йил 15 октябрдаги

маълумотномаси). Илмий натижаларининг қўлланилиши юқори аниқлик билан масса сатҳи манзарасини тиклашга, қайсики бу маълумотлар юлдузларни портлашида рўй берувчи тезкор нейтрон ютилиши жараёнлари йўллари аниқ астрофизик баҳолаш имконини берган;

Франчини-Радикати омилининг ҳисоблаб топилган экспериментал қийматларини Стюдентнинг t -мезони ёрдамида статистик таҳлил қилиш орқали оғир ядролар соҳасида спин-изоспин $SU(4)$ -симметрия тикланиши ҳақидаги хулоса (халқаро илмий журналлардаги ҳаволалар: Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, 2015; Physics of Atomic Nuclei, 2015; EPJ Web of Conferences, 107, 06004, 2016; Physics of Atomic Nuclei, 2020) атом ядросида Вигнер симметриясини тикланиш муаммоларини назарий жиҳатдан ишлаб чиқирилишида ва янги ўта оғир ядролар альфа-емирилиш энергиясини аниқлашда чет эллик олимлар томонидан фойдаланилган. Илмий натижаларининг қўлланилиши заряд айирбошлаш резонанслари назариясини, оғир атом ядролари соҳасида Вигнер спин-изоспин $SU(4)$ -симметриясини тикланишини асослаб берувчи назарияни ва янги очилган ўта оғир ядроларни α -емирилиш энергиясини мувофиқлаштирилган ҳисобларини амалга ошириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 20 та халқаро ва республика илмий-амалий анжуманида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 26 илмий иш чоп этилган, улардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг диссертацияларнинг асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий журналларда 12 та мақола, шундан 8 таси хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертация тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан ташкил топган. Диссертациянинг ҳажми 170 саҳифани ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида танланган мавзунинг долзарблиги ва зарурияти асосланган, тадқиқот мақсади ва вазифалари шакллантирилган, тадқиқот объекти, предмети ва усуллари аниқланган, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги асосланган, илк бор олинган илмий натижалар санаб ўтилган, олинган натижаларни ишончлилиги, тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, олинган натижаларни жорий этилиши ва иш апробацияст келтирилган, илмий натижаларни эълон қилиниши, диссертация ҳажми ва тузилиши баён этилган.

“Атом ядроларда Вигнер спин-изоспиновая $SU(4)$ -симметрияси” деб номланган биринчи бобда атом ядроларида тикланиши мумкин бўлган Вигнернинг спин-изоспин $SU(4)$ -симметриясига бағишланган манбаларни

қисқача шархи келтирилган. Атом ядроларида Вигнер спин-изоспин $SU(4)$ -симметрияси тикланишини экспериментда икки усул билан кузатиш мумкинлиги кўрсатилган, яъни 1) ГТР ва АР коллектив ҳолатларни кузатиш; 2) Вигнер масса ифодасини таҳлил қилиш орқали. Биринчи усулни амалга ошириш протонлар тезлатгичи бўлишини тақоза қилади, лекин бу усул аниқлиги эксперимент ўтказиш шароитлари билан чекланган. Иккинчи усул амалиёти масса сонини кенг ўзгариш соҳаси учун мавжуд юқори аниқлик билан ўлчанган атом ядролари массаларини хатосиз қайта ишлаш орқали эмпирик функциялар аналитик кўринишини аниқлашни тақоза қилади. Ушбу ишда муаллиф иккинчи бобда баён қилган иккинчи усулни амалга оширди. Бундан ташқари, замонавий назарий ишланмаларнинг асоси бўлган атом ядролари массалари муаммосига бағишланган асосий назариш ишларнинг қисқача шархи келтирилган. Бу бобда маълумотларни қайта ишлашда қўлланилган дастурлаш ва маълумотлар банкига бағишланган масалалар қисқа ёритилган.

“ $a(A)$, $b(A)$ универсал функциялар ва атом ядроларидаги спин-орбитал таъсирлашиш энергиясини ҳисоблаш ” деб номланган иккинчи боби Вигнер эмпирик универсал функциялари $a(A)$ ва $b(A)$ кўринишини ўрнатиш учун зарур илгари сурилган тамоиллар ва ишчи гипотезани баёнидан бошланади. Ишчи гипотезанинг маъноси Вигнер спин-изоспин $SU(4)$ -симметриясини бузувчи омилларнинг таъсири атом ядролари асосий ҳолатларини бир-бирларига нисбатан бирор қонуният асосида силжишидан иборатлигидадир. Бундан ташқари, массалар экспериментал қийматларини таҳлил қилишда, Казимирнинг иккинчи тартибли хади билан чегараланувчи Вигнер масса формуласидан фойдаланилган. Вигнер масса формуласи қуйидаги кўринишга эга

$$M(A, T_z) = a(A) + \frac{1}{2} b(A) C_2(P, P', P'') + E_{\text{Coul}}(A, Z) + E_{\text{sl}}(A, Z) + E_{\text{pair}}(A, Z).$$

бу ерда $E_{\text{Coul}}(A, Z)$ – ядронинг Кулон энергияси, $E_{\text{sl}}(A, Z)$ – ядро массасига спин-орбитал таъсирлашиши қисми, $E_{\text{pair}}(A, Z)$ – жуфтлик энергияси.

Охирги ифодани масса сони тоқ ($E_{\text{pair}}(A, Z) = 0$) бўлган ядролар учун $b(A)$ га нисбатан ечиб қуйдагини оламиз

$$b(A) = \frac{\Delta_{\text{ядро}}(A, T_z) - \Delta_{\text{ядро}}(A, T_z - 1) + \Delta E_{\text{Coul}}(A, Z) + \Delta E_{\text{sl}}(A, Z)}{T_z + 3/2}.$$

Ҳақиқатда, ядролар учун $E_{\text{sl}}(A, Z)$ қиймати номаълум. Шу сабабли $b(A)$ катталик қийматларини $\Delta E_{\text{sl}}(A, Z) = 0$ шарт билан ҳисоблаймиз. Охирги ифодада $\Delta_{\text{ядро}}(A, T_z)$ атом ядроси массасининг ортиқлиги (избыток) ҳисобланади. Мавжуд ҳамма ядро массаларидан иборат жадвалларда нейтрал

атом массасининг ортиқлиги $\Delta_{\text{атом}}(A, T_z)$ келтирилади. Шу сабабли $b(A)$ функция қийматларини ҳисоблашдан аввал, нейтрал атом массаси ортиқлиги жадвалини ядро массаси ортиқлигига жадвалига ўтказиш зарур.

Ҳисоблаб топилган $b(A)$ функция қийматлари тахлили шуни кўрсатдики, уларни ичида кўрилатган масса сони учун доимий қийматлилари бор экан. Бу изоспинлари T_z ва $T_z - 1$ бўлган қўшни ядролардаги спин-орбитал тасирлашиш тенг, ёки қийматлари яқин бўлгандагина бўлиши мумкин. Бундай ядролар учун топилган $b(A)$ функция экспериментал қийматларини қуйидаги функция билан ифодалаш мумкин:

$$b(A) = b_1 \exp(b_2 A) + b_3 \exp(b_4 A).$$

Охирги ифодадаги параметрлар кичик квадратлар усули ёрдамида аниқланган ва улар қуйидаги қийматга эга: $b_1 = 1522(47)$ кэВ, $b_2 = -0.0029(1)$, $b_3 = 4123(200)$ кэВ ва $b_4 = -0.0238(8)$.

$a(A)$ эмпирик универсал функциянинг экспериментал қийматларини қуйидаги формула билан ҳисоблаб топиш мумкин

$$a(A) = \Delta_{\text{ядро}}(A, T_z) + Au - b(A) \times C_2 - E_{\text{Coul}}(A, Z).$$

Бу ифодада $E_{\text{Coul}}(A, Z) = 703.2 \cdot Z^2 A^{-1/3} (1 - 1.28 A^{-2/3})$ – Кулон тасирлашиш энергияси. Таҳлил учун $a(A)/A$ каби солиштира функциядан фойдаланган мақул. Эмпирик универсал $a(A)/A$ функциянинг мавжуд тўплами уни

$$a(A)/A = a_1 \exp(a_2 A) + a_3 \exp(a_4 A) + a_5 \exp(a_6 A) + a_7 \exp(a_8 A)$$

кўринишда ифодалаш мумкинлигини кўрсатди. Параметрларнинг қийматлари 1 - жадвалда келтирилган.

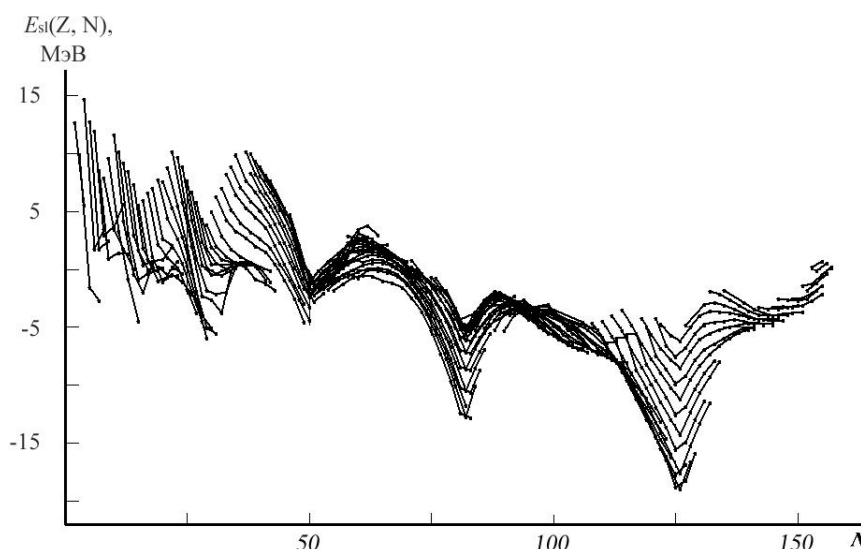
Тоқ масса сонига эга атом ядроларига тегишли ядро массасига спин-орбитал тасирлашишнинг қисмини

$$E_{\text{sl}}(Z, N) = \Delta_{\text{ядро}}(A, T_z) + Au - a(A) - b(A)C_2 - E_{\text{Coul}}(A, Z)$$

формула ёрдамида ҳисобланиши мумкин. 1-расмда массага спин-орбитал тасирлашишнинг қисмини тоқ ядролар учун N катталиқга боғлиқлиги ифодаланган. Бу расмдан кўриниб турибдики, ҳамма “сеҳрли” сонлар яққол акс этмоқда. Оғир ядролар соҳасида массага спин-орбитал тасирлашиш улуши $E_{\text{sl}}(Z, N)$ абсолют қиймати ошиб боради ва ^{208}Pb ядросида 18 МэВга етади.

$a_1 \div a_8$ коэффициентларнинг қийматлари

Аниқланиш соҳаси	Функция	Коэффициентлар
$175 \leq A \leq 195$ и $A \geq 215$	$a_1 \exp(a_2 A)$	$a_1 = 927368(11)$ кэВ/нукл $a_2 = -5.11(5) \times 10^{-6}$
$79 \leq A \leq 121$	$a_3 \exp(a_4 A)$	$a_3 = 2147(92)$ кэВ/нукл $a_4 = -0.0214(5)$
$25 \leq A \leq 39$ и $57 \leq A \leq 65$	$a_5 \exp(a_6 A)$	$a_5 = 1995(78)$ кэВ/нукл $a_6 = -0.048(1)$
$A \leq 25$	$a_7 \exp(a_8 A)$	$a_7 = 7713(708)$ кэВ/нукл $a_8 = -0.22(2)$



1 -расм. Атом массасига спин-орбитал тасирлашиш қисмини $E_{sl}(Z, N)$ изотоплардаги нейтронлар сонига боғлиқлиги

“Вигнернинг спин-изоспин $SU(4)$ -симметриясини бузувчи омиллар ва симметрияни оғир ядролар соҳасида тикланиши” деб номланган учинчи бобида Вигнернинг $a(A)$ ва $b(A)$ эмпирик функцияларини физик маъноси, Вигнер масса формуласи жуфтлик энергиясига эгалигини қўлловчи далиллар келтирилган, атом ядроларида Вигнер $SU(4)$ -симметрияси бажарилиш даражаси аниқланган ва оғир ядролар соҳасида симметрияни тикланиши исботланган.

$a(A)$ и $b(A)$ эмпирик функцияларни физик маъносини аниқлаш учун уни Вайцеккер масса формуласи билан солиштириш керак, чунки Вигнернинг масс формуласи Вайцеккер масса формуласининг мадификацияси ҳисобланади. Унда қуйидаси символик математик муносибатларга эга бўламиз:

$$a(A)/A = (m_{\text{nucl}} - \alpha + \beta A^{-1/3}), \quad b(A)C_2 = \gamma (N - Z)^2 A^{-1}.$$

Охирги ифодада α , β ва γ – хажмий, сиртки ва симметрия энергияси хадларидаги коэффициентлар. Олинган биринчи ифодадан $a(A)/A$ (солиштира эмпирик функция) катталики нуклоннинг ядродаги эффектив массаси сифатида қараш кераклиги кўрилади. Бу катталик ядро кучларини тўйиниши ва сирт таранглигини ўзида мужассамлантирган. Иккинчи муносибатнинг ўнг тарафи симметрия энергияси. Шу муносибатнинг чап тарафи симметрия энергиясига нисбатан анча мураккаб тузилишга эга. Мураккаблик иккинчи даражали Казимир оператори билан боғлиқ бўлиб, унинг аналитик кўриниши тоқ-тоқ, жуфт-жуфт нуконли ва масса сони тоқ ядролар учун турли кўринишга эга (2 -жадвалга қаранг).

2 - жадвал

C_2 Казимир оператори ва $b(A)C_2$ хаднинг аналитик кўриниши, ва уч гуруҳ ядролар учун парабола чўққисининг координатлари

Ядро гуруҳлари	C_2 аналитик кўриниши	$b(A)C_2$	C_2 чўққиси координат.
Z, N – тоқ	$0.5(T_z^2 + 4T_z + 3)$	$0.5b(A)(T_z^2 + 4T_z) + 1.5b(A)$	$(-2, -0.5)$
A – тоқ	$0.5(T_z^2 + 4T_z + 1.5)$	$0.5b(A)(T_z^2 + 4T_z) + 0.75b(A)$	$(-2, -1.25)$
Z, N – жуфт	$0.5(T_z^2 + 4T_z)$	$0.5b(A)(T_z^2 + 4T_z)$	$(-2, -2.0)$

C_2 Казимир оператори изоспин проекцияси T_z га боғлиқ иккинчи даражали полином бўлиб, геометрик жихатдан параболадир. 2-жадвалдан кўриниб турганидек, $b(A)C_2$ хаднинг $0.5b(A)(T_z^2 + 4T_z)$ қисми анъанавий симметрия энергиясидан тузилиши мураккаброқ бўлишига қарамай ҳамма гуруҳ ядролар учун (A ўзгармас) бир хил. T_z^2 изоспин проекциясига пропорционал қисми анъанавий симметрия энергияси бўлиб, у ядроларни $N = Z$ бўлгандаги стабиллигини ифодаласа, T_z қисми нейтрон-протон айирбошлаш жараёни билан боғланган. Шу сабабли $0.5b(A)(T_z^2 + 4T_z)$ хадни ядродаги симметрия энергияси сифатида шарҳланиши асослидир.

2-жадвал яна шуни кўрсатадики, C_2 Казимир оператори эркин хадга эга ва у ядроларни Вигнерча турларига қараб турлича қийматлар қабул қилади. Ядроларда $1.5b(A)$ катталик жуфтлик энергиясини ташкил қилади, чунки $b(A)$ ядрода икки заррача орасидаги спин-изоспин туридаги кучларни эффектив ифодалайди.

Вигнернинг атом ядроси учун масса формуласи қуйидаги содда кўринишга эга

$$M(A, T_z) = a(A) + b(A) \times C_2 + E_{\text{Coul}}(A, Z) + E_{\text{sl}}(Z, N).$$

Охирги ифода Францини ва Радикати омили учун аниқ назарий аналитик ифода олишга имкониятини беради. Францини ва Радикати омили Вигнернинг спин-изоспин $SU(4)$ -симметриясини бажарилиш даражасини баҳолаши мумкин бўлган ўзига хос тест бўлиб ҳисобланади. Бунинг учун Францини ва Радикати омили формуласини Кулон тузатиши билан ёзилган формуласидан фойдаланамиз

$$R = \frac{M(A, T_z) - M(A, T_z - 2) - \Delta E_{\text{Coul}}(Z, Z + 2)}{M(A, T_z - 1) - M(A, T_z - 2) - \Delta E_{\text{Coul}}(Z + 1, Z + 2)}$$

ёки ўгартиришлардан сўнг

$$R = \frac{(T_z^2 + 4T_z + \delta_{T_z}) - [(T_z - 2)^2 + 4(T_z - 2) + \delta_{T_z - 2}]}{[(T_z - 1)^2 + 4(T_z - 1) + \delta_{T_z - 1}] - [(T_z - 2)^2 + 4(T_z - 2) + \delta_{T_z - 2}]}$$

Охирги ифодада $\delta = 3.0, 1.5$ ва 0.0 мос равишда N, Z – тоқ, A – тоқ ва N, Z – жуфт ядролар учун ва атом ядроларида Вигнер симметрияси ўринли деган тахмин билан, охирги ифодани соддалаштирганимиздан сўнг $R_{\text{назарий}}$ омил учун аниқ назарий формула оламиз:

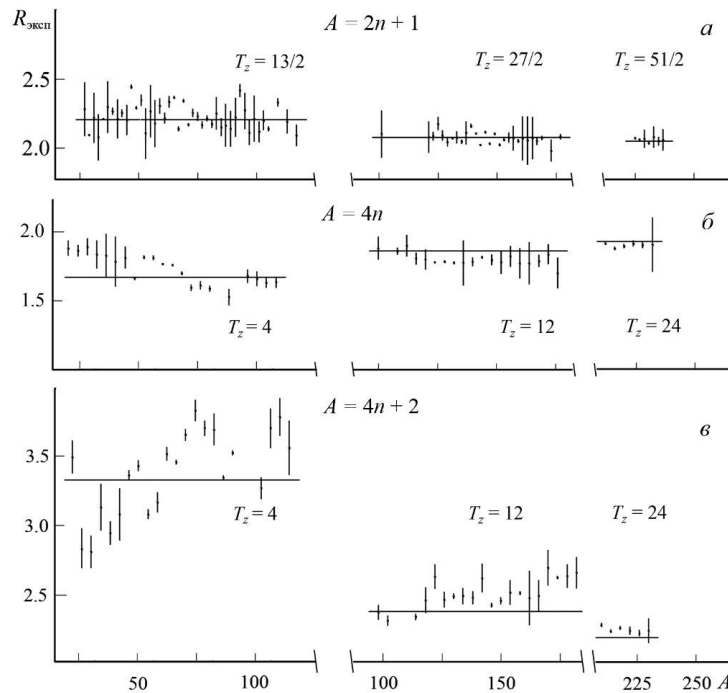
$$R_{\text{назарий}} = \frac{4(T_z + 1)}{2T_z + 1 + \eta}.$$

Бу формулада T_z изоспин учун агарда ядро жуфт-жуфт бўлса $\eta = +3$, агарда ядро масса сони тоқ бўлса $\eta = 0$ ва агарда ядро тоқ-тоқ бўлса $\eta = -3$ қийматга эга. Вигнер симметрияси бажарилганда $R_{\text{назарий}}$ учун ёзилган формула фақат T_z ва η катталикларга боғлиқ. η катталик $R_{\text{назарий}}$ эгри чизигини Вигнер туридаги ядроларга мос равишда учта оилага бўлади ва η катталиқни келиб чиқиши Казимир операторидаги жуфтлашиш ходисаси билан боғлиқ эркин хад билан боғланган.

Францини ва Радикати $R_{\text{назарий}}$ омилини экспериментал қийматлари, масса сони ўзгариш диапазони $5 \leq A \leq 257$ бўлган, имкони бор ҳамма ядролар учун ҳисоблаб топилди.

2-расмда Францини ва Радикати омилининг экспериментал қийматларини $R_{\text{эксп}}$ масса сонига боғлиқлиги изоспини $T_z = 13/2, 27/2$ и $51/2$ ($A = 2n + 1$ -масса сони тоқ ядролар), $T_z = 4, 12$ и 24 ($A = 4n$ -жуфт-жуфт ядролар) ва $T_z = 4, 12$ и 24 ($A = 4n + 2$ -тоқ-тоқ ядролар) бўлган нуклидлар учун мос равишда келтирилган. Расмдаги тўғри чизиклар $R_{\text{назарий}}$ формула ёрдамида чизилган. Расмдан кўринишича Францини ва Радикати омилининг экспериментал қийматлари $R_{\text{эксп}}$ вариацияга эга, яъни симметрияни бузувчи спин-орбитал тасирлашиш яққол сезилмоқда.

Юқорида олинган R омилининг назарий ва экспериментал маълумотларидан фойдаланиб, Вигнернинг спин-изоспин симметриясини бузилиш даражасини баҳолаш мумкин. Спин-изоспин симметрияни бузилиш даражаси $\Delta R = (\bar{R}_{\text{эксп}} - R_{\text{назарий}}) / R_{\text{назарий}}$ муносибат каби баҳоланади. Бу ифодада $\bar{R}_{\text{эксп}} - T_z$ изоспинли ядро учун R омилининг ўртача қиймати. Хисоблар спин-изоспин симметрия айниқса тоқ-тоқ ядроларда кучли бузилганини кўрсатади ва у ўртача $\sim 15 \div 20 \%$, жуфт-жуфт ядроларда эса $\sim 5 \%$ атрофида ва масса сони тоқ ядроларда бузилиш 1% атрофида.



2 -расм. Франчини ва Радикати омилининг экспериментал $R_{\text{эксп}}$ қийматларини изоспинлари $T_z=13/2, 27/2$ ва $51/2$ бўлган ядроларда масса сонига A боғлиқлиги

Олинган маълумотларга асосланиб Вигнернинг спин-изоспин $SU(4)$ -симметриясини атом ядроларида бажарилишини аниқроқ текшириб кўрамиз. Бунинг учун берилган изоспин T_z учун Франчини ва Радикатининг назарий $R_{\text{назарий}}$ ва экспериментал ўртача қийматлари $\bar{R}_{\text{эксп}}$ орасидаги мослик даражасини аниқлаш масаласи кўрилиши керак. $\bar{R}_{\text{эксп}}$ ва $R_{\text{назарий}}$ қийматлари орасидаги фарқ тасодифий ёки тасодифсизлиги масаласини аниқлаш учун Стюдентнинг (В. Госсет) t -мезонидан фойдаланамиз. t -мезонни хисоблаш учун $t = (|\bar{R}_{\text{эксп}} - R_{\text{назарий}}|) \sqrt{n} / \sigma_{\text{эксп}}$ формуладан фойдаланамиз. Бу ифодада $\sigma_{\text{эксп}}$ — стандарт четланилиш, $n - T_z$ изоспин учун $R_{\text{эксп}}$ маълумотларнинг экспериментал миқдори. Мухимлик даражасини $\alpha = 0.01$ қилиб танлаймиз.

Вигнернинг уч турдаги ядролари учун Стъюдент t -мезонининг $t_{\text{хисоб}}$ хисоблар ва $t_{\text{жадвал}}$ жадвал қийматларини изоспинга боғланган ўзаро муносибати (муҳимлик даражаси $\alpha = 0.01$)

Ток A ядролар			Ток-ток ядролар			Жуфт-жуфт ядролар		
T_z	n	$t_{\text{хисоб}} < > t_{\text{жадвал}}$	T_z	n	$t_{\text{хисоб}} < > t_{\text{жадвал}}$	T_z	n	$t_{\text{хисоб}} < > t_{\text{жадвал}}$
3/2	28	58.268 > 2.771	2	17	74.976 > 2.947	2	16	41.912 > 2.947
5/2	37	50.271 > 2.725	3	18	11.241 > 2.947	3	19	18.441 > 2.880
7/2	41	61.677 > 2.704	4	23	4.030 > 2.819	4	21	32.728 > 2.830
9/2	43	111.319 > 2.694	5	22	73.089 > 2.831	5	22	14.793 > 2.831
11/2	43	192.25 > 2.694	6	18	8.618 > 2.947	6	18	21.537 > 2.947
13/2	34	25.696 > 2.723	7	17	15.559 > 2.947	7	16	6.692 > 2.947
15/2	29	10.168 > 2.763	8	13	20.827 > 3.055	8	15	11.371 > 2.977
17/2	34	10.261 > 2.723	9	14	27.521 > 3.012	9	22	39.151 > 2.831
19/2	42	17.841 > 2.698	10	21	31.565 > 2.830	10	23	15.411 > 2.831
21/2	40	0.652 > 2.702	11	22	46.285 > 2.831	11	22	84.883 > 2.831
23/2	37	12.964 > 2.725	12	20	28.961 > 2.880	12	19	80.383 > 2.880
25/2	31	37.655 > 2.750	13	16	40.116 > 2.947	13	20	40.145 > 2.880
27/2	28	10.152 > 2.771	14	17	15.212 > 2.921	14	19	40.046 > 2.880
29/2	25	3.747 > 2.797	15	18	24.906 > 2.950	15	19	34.634 > 2.880
31/2	30	49.115 > 2.756	16	19	15.598 > 2.880	16	20	9.670 > 2.880
33/2	35	40.562 > 2.730	17	17	14.919 > 2.921	17	19	5.266 > 2.880
35/2	25	37.201 > 2.797	18	13	66.612 > 3.055	18	11	13.700 > 3.169
37/2	24	4.373 > 2.807	19	12	28.526 > 3.106	19	10	4.765 > 2.880
39/2	19	22.445 > 2.880	20	9	28.591 > 3.355	20	9	9.359 > 3.355
41/2	16	15.082 > 2.947	21	7	13.844 > 3.707	21	8	11.608 > 3.499
43/2	16	8.940 > 2.947	22	5	15.990 > 4.604	22	8	10.015 > 3.499
45/2	16	32.554 > 2.947	23	6	6.421 > 4.032	23	7	5.919 > 3.707
47/2	12	10.159 > 3.106	24	6	18.115 > 4.032	24	6	7.814 > 4.032
49/2	8	6.681 > 3.499	25	3	134.024 > 9.925	25	9	19.531 > 3.355
51/2	7	4.233 > 3.707	26	6	56.939 > 4.032	26	8	30.055 > 3.499
53/2	9	0.545 < 3.355	27	8	41.699 > 3.499	27	7	8.316 > 3.707
55/2	9	0.876 < 3.355	28	4	10.536 > 5.841	28	5	21.309 > 4.604
57/2	6	0.660 < 4.032						

3-жадвалдан кўриниб турганидек, T_z изоспиннинг бутун ўзгариш соҳасида Вигнернинг симметрияси жуфт-жуфт ва ток-ток ядролар учун, тикланишга интилиш бўлса ҳам, симметрия тикланмайди. Масса сони ток бўлган ядролар ичида изоспини $T_z = 53/2, 55/2$ ва $57/2$ бўлганлари учун t -мезон қийматлари жадвалларда келтираладигандан кичик. Бу фактни статистика нуқтаи назаридан қараганда Вигнернинг спин-изоспин $SU(4)$ -симметрияси изоспини $T_z \geq 53/2$ бўлган оғир ядролар соҳасида муҳимлик даражаси $\alpha < 0.01$ билан тикланади деб талқин қилиниши керак, яъни ишончлилиги 99% дан катта даражада такидлаш мумкин.

Стъюдентнинг t -мезонини қўллаш учун иккита шарт бажарилиши зарур: 1) $R_{\text{назарий}}$ ифодаси аниқ бўлиши; 2) ишлатилаётган R сайланма нормал тақсимотга эга бўлиши керак. Биринчи шарт бажарилган. Стъюдентнинг

оптималь t -мезони натижалари ишончли бўлиши учун $R_{\text{эксп}}$ қийматларини нормал тақсимотга эгаллигини текшириш керак. Бунинг учун биз Шапиро-Уилки мослик мезонидан фойдаландик. Маълумотларни Шапиро-Уилки мослик мезони ёрдамида ўтказилган таҳлили Вигнернинг спин-изоспин симметрияси тикланишини исботлашда қўлланилган Стюдентнинг t -мезони ўринли ишлатилганини кўрсатади.

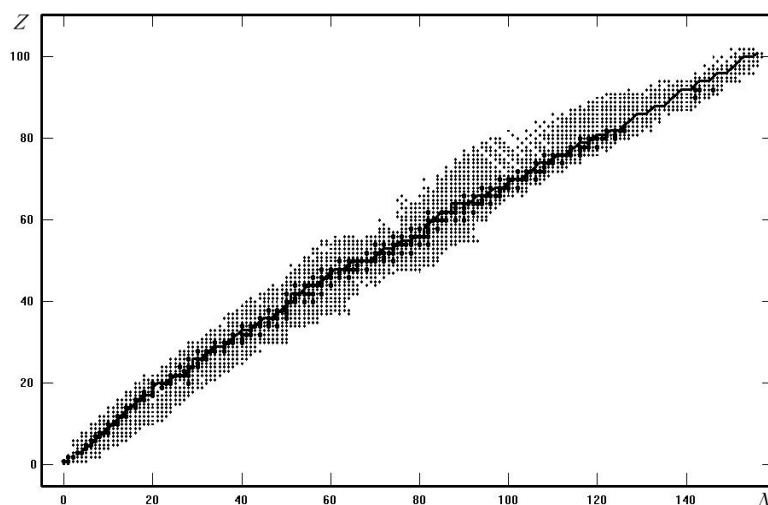
“Вигнернинг масса формуласидан ядро физикасига тегишли амалий масалаларни ечишга татбиқ қилиш” деб номланган тўртинчи боби замонавий ядро физикасининг амалий масалаларини ечишга бағишланган. Вигнернинг масса формуласидан фойдаланиб бета-турғинлик чизиғини, нейтрон ва протон стабиллиги чизиқларини назарий ҳисоблаш масаласи, чексиз ядро материясида нуклон массасини баҳолаш, оғир ядролар соҳасида спин-орбитал тасирлашишни сусайиши ва “турғинлик оролини” мавжудлиги масаласи, янги ўта оғир ядроларни альфа-емирилиш энергияси ва $SU(4)$ -симметрия тикланган қатор оғир ядролар массасини катта аниқлик билан ҳисоблаш масалалари кўрилган.

Бета-турғинлик чизиғини топиш учун қуйидаги икки параболадан иборат ифодани берилган масса сонида минималлаштириш керак

$$F(A, Z) = 0.5[b_1 \exp(b_2 A) + b_3 \exp(b_4 A)] \cdot (T_z^2 + 4T_z + 1.5) + K_1 Z^2 A^{-1/3} (1 - K_2 A^{-2/3}).$$

Охирги ифодада $K_1 = 703.2$ и $K_2 = 1.28$. Сўнгра, $\partial F(A, Z) / \partial T_z |_{A = \text{const}}$ ифодани ҳисоблаб уни нўлга тенглаб, изоспин проекцияси масса сони функцияси каби боғланган формуласини олиш мумкин:

$$T_z |_{\beta - \text{стаб}} = \frac{K_1 (A^{2/3} - K_2) - 2B}{B + 2K_1 (1 - K_2 A^{-2/3})}.$$

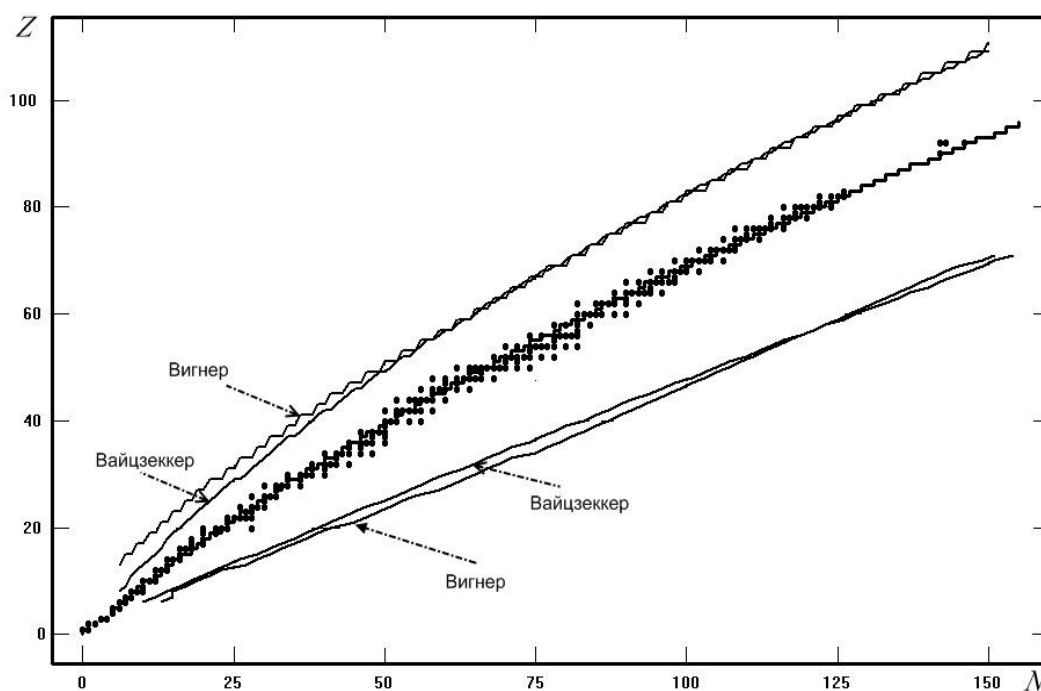


3-расм. Нуклидлар харитаси (Z, N) . Узликсиз чизиқ–“бета-стабиллик” чизиғи (ҳисоблаш), стабил ядролар қора нукта билан белгиланган

Охирги ифода $B = 0.5[b_1 \exp(b_2 A) + b_3 \exp(b_4 A)]$ ва у бета-турғунлик чизиғини беради. Бета-турғунлик чизиғида жойлашган нуклиднинг T_z изоспини аниқ топиш учун ифодани спин-орбитал тасирлашишини қўшиб ҳисоблаш керак. 3-расмда (Z, N) нуклидлар харитаси келтирилган. Унда стабил ядролар қора нукта билан белгиланган ва узликсиз чизиқ юқоридаги формула билан ҳисобланган.

Ядро физикаси ва астрофизика фанлари учун муҳим бўлган турғунлик соҳаси бўлиб, протонларни шундай кўплиги (нейтронларни камлиги) бўлсинки, унда протонни (нейтронни) ядродан ажратиш энергияси нўл бўлсин. Бу чегарани протонлар учун $\varepsilon_p = \{m_p + M(A-1, N) - M(A, N)\}$ формула билан ҳисоблаш мумкин. Бу ифодада ε_p –массаси $M(A, N)$ бўлган ядрода протон боғланиш энергияси, m_p –протон массаси. Шу каби массаси $M(A, N)$ бўлган ядродаги нейтрон боғланиш энергияси $\varepsilon_n = \{m_n + M(A-1, Z) - M(A, Z)\}$ формула билан ҳисобланади.

Вигнернинг масса формуласидан, аниқланган эмпирик функциядан фойдаланиб спин-орбитал таъсирлашиш энергиясиз биз ε_p и ε_n қийматларини ҳисобладик. 4-расм протон ва нейтрон турғунлик чегарасини (Z, N) нуклид харитасидан ўтишини ифодалайди. Шу расмда Вигнер масса формуласига асосланган ҳисоблашлар Вайцзеккер формуласига асосланган ҳисоблашлар билан таққосланмоқда.



4 -расм. Атом ядродарининг протон ва нейтрон стабиллиги чизиқлари. Вигнер ва Вайцзеккера масса формулалари асосида ҳисобланган

Биз томонимиздан таклиф қилинган Вигнернинг солиштирма эмпирик формуласи ёрдамида чексиз ядро моддасида нуклоннинг эффектив массасини аниқлашда мумкин. Ҳақиқатда, чексиз массали ядро учун $A \approx \infty$ ва $a(A)/A = a_1$. $a(A)/A$ катталик нуклонни ядродаги эффектив массаси бўлгани учун a_1 катталикка чексиз ядродаги нуклон массаси деб қараш мумкин. Биз томонимиздан аниқлаштирилган a_1 параметрнинг қиймати $a_1 = 927382(8)$ кэВ/нукл. тенг. a_1 катталикдан ядро массасининг табиий эмпирик бирлиги сифатида фойдаланиш мумкин. Универсал ва эмпирик масса birlikлари орасида $u/a_1 = 1.004434(9)$ боғланиш бор.

Қобиклар модели табиатда урандан оғир ядролар бўлишига тўсиқ қўймайди. Бундан ташқари, қобиклар тўлган сари, спин-орбитал тасирлашиш умуман ошиб боради. Бу эса турғунлиги катта ядролар ҳосил бўлишига сабаб бўлади.

Классик қобиклар модели башоратига кўра $^{208}_{82}\text{Pb}$ ядросидан кейин икки карра “сеҳрли” ядро бўлиб таркибида $Z=126$ нафар протон ва $N=184$ нафар нейтрон бўлган масса сони $A=310$ ли нуклид бўлиши керак. Ядрога мос равишда $1i_{13/2}$ ва $1j_{15/2}$ қобиклар тўлдирилади. $^{310}_{126}$ ядросини суний йўл билан олиш хатто ҳозирги кун учун ҳам жуда жиддий илмий-техник муаммо ҳисобланади. Ўтган асрнинг 60 йилларидан бошлаб нисбатан катта яшаш вақтига эга бўлган, оғир ядролар соҳасида жойлашган ва яшаш вақти катта бўлган нуклидларни назарий йўл билан каромат қилишга бағишланган тадқиқотлар кучайди.

Айрим назарий характерга эга шартлар бажарилганда протонлари $Z=114$ ва нейтронлари $N=184$ бўлган ядрони икки карра “сеҳрли” деб қараш мумкин экан. Шу ядро атрофидаги ядролар соҳасини “турғунлик ороли” деб аташ қабул қилинган. Бу нуклидлар бошқа оғир ядролардан бўлинишга нисбатан турғунлиги билан ажралиб туради ва альфа ва бета усул билан емирилиши мумкин.

Вигнернинг $SU(4)$ -симметриясини тикланиши “турғунлик ороли”га қарашли ядроларда кузатилаётган яшаш вақтларини янгича таҳлил қилиш имконини беради. Вигнернинг спин-изоспин $SU(4)$ -симметриясини ўта оғир ядролар соҳасида тикланишини қуйидаги экспериментал фактлар тасдиқлайди:

1) оғир ядролар соҳасида ГТР ва АР резонансларини асимптотик яқинлашиши физика нуқтаи назаридан $A(N, Z)$ ядросида нейтронлар орбиталиги ёки изоспин ошиши билан зарядли $p\bar{n}$ -каналда спин-орбитал парчаланиш энергияси ΔE_{is} катталигини босилишини англатади ва бу ЧФТН (ТКФС) назариясида изоспин ва спин-изоспин тасирлашиш константаларини тахминан тенглигидан $f'_0 \approx g'_0$ далолат беради;

2) ўта оғир, нейтронлари сони $N > 146$ бўлган, ядролар соҳасига яқинлашган сари массага спин-орбитал тасирлашишнинг экспериментал қисмини $E_{sl}(Z, N) \sim 100$ кэВгача камайиши;

3) атом ядролари асосий ҳолатлари массасини экспериментал маълумотларига асосланиб топилган Францини ва Радикати омилини Стьюдент t -мезони усули ёрдамида статистик тахлили 99,9% катта ишончлилик билан Вигнернинг спин-изоспин $SU(4)$ -симметрияси изоспини $T_z \geq 53/2$ катта тоқ масса сонли ядроларда тикланишини кўрсатади;

4) жуфт масса сонли ядроларда T_z изоспин ошиши билан симметрияни тикланишига интилишни кузатилиши;

5) ўта оғир ядролар учун $E_{sl}(Z, N) = 0$, яъни Вигнер симметрияси тўла тиклаган, деган тахмин билан Вигнер масса формуласига асосланиб ҳисобланган α – емирилиш Q_α энергиясини эксперимент билан мослигини бошқа замонавий назарий ҳисоблашлардан устунлиги;

6) Вигнер $SU(4)$ -симметрияси тикланган ўта оғир ядроларни массасини ҳисоблашдаги катта аниқлик.

Бизни баҳолашимиз бўйича классик икки қаррали “сеҳрли” сонга эга $Z=126$ ва $N=184$ соҳадаги $^{310}_{126}$ ядрога массага спин-орбитал тасирлашиш қўшган қисми тахминан -28 МэВни ташкил қилиши керак. Лекин бундай тасирланиш экспериментда кузатилмаётгани. Шу сабабли биз “турғунлик ороли” соҳасида жойлашган ядроларда кузатилаётган яшаш вақти Вигнер симметриясми тикланиши билан боғлиқ деган тахминни илгари сурамиз.

α – емирилиш энергияси Q_α туртки эффектини ҳисобга олганда емирилиш иштирок этаётган ядролар массалари айирмаси орқали $Q_\alpha(Z, N) = M_1({}^A_ZX) - M_2({}^{A-4}_{Z-2}Y) - M_\alpha + E_1 - E_2$ формула орқали боғланган. Бу ифодада $M_1({}^A_ZX)$ ва $M_2({}^{A-4}_{Z-2}Y)$ бошланғич ва охирги ҳолат массалари, M_α – α – заррача массаси, E_1, E_2 – бошланғич ва охирги ядроларнинг мос равишда уйғонган ҳолатлари энергияси. Экспериментда кузатилган α – емитилиш Q_α энергиясига асосланиб Пархоменко-Собичевскийларнинг эмпирик $\lg T_\alpha(Z, N) = aZ[Q_\alpha(Z, N) - \overline{E}_2]^{-1/2} + bZ + c$ формуласи ёрдамида топилган янги ядро яшаш вақтини ҳисоблаб топиш мумкин. Охирги ифодада $a=1.5372$, $b=-0.1607$ ва $c=-36.573$. формуладаги $\overline{E}_2$ охирги ҳолат ядросининг ўртача уйғониш энергияси. Жуфт-жуфт ядролар учун $\overline{E}_2 = 0$, тоқ-жуфт ядролар учун $\overline{E}_2 = E_p = 0.113$ МэВ, жуфт-тоқ ядролар учун $\overline{E}_2 = E_n = 0.171$ МэВ ва тоқ-тоқ ядролар учун $\overline{E}_2 = E_p + E_n$. 4 Жадвалда Вигнер масса формуласи ёрдамида Вигнер симметрияси тўлиқ тикланганлигига мос келувчи массага спин-орбитал тасирлашиш қисми $E_{sl}(Z, N) = 0$ тахмини билан бажарилган ҳисоблашлар натижаси келтирилган. 4 Жадвалдан кўриниб турганидек экспериментдан ҳисоблашларимиз ўртача квадратик четлашиши замонавий бошқа усуллар натижасидан устун.

Ўта оғир ядроларнинг α – емирилиш Q_α (кэВ) энергияси. Q_α қийматлари ва турли усуллар кароматлари Толоконников ва бошқалар ишидан жалб қилинган

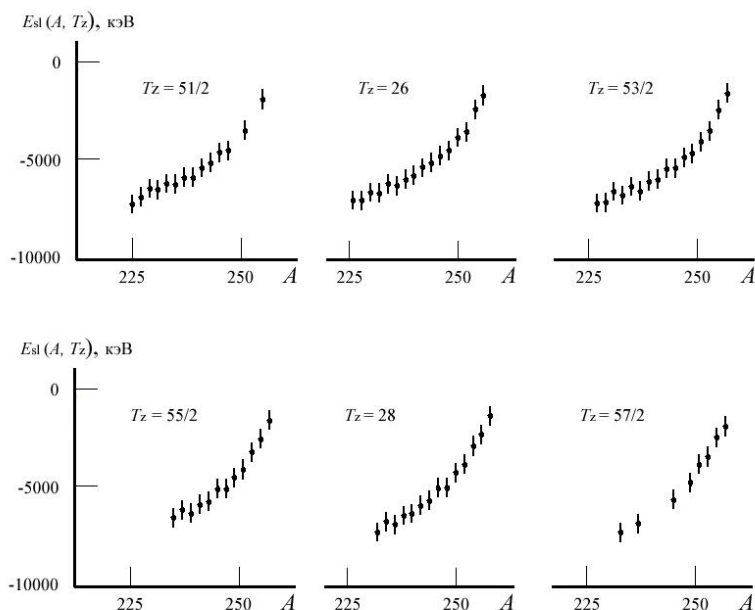
Дастлабки ядро	Эксп.	Вигнер бўйича	Толоконников ва бошқ.	Скирма-Хартри-Фок	Микро-Макроско-Метод	Эмпирик Қобик Модели
²⁹⁴ 118	11810	11332	11450	11400	12110	11550
²⁹⁰ Lv	11000	10923	11810	10700	11080	11420
²⁸⁶ Fl	10330	10511	10060	10300	10860	11110
²⁹⁴ 117	10960	10773	10980	11100	11430	10900
²⁹⁰ 115	10090	10359	10240	10400	10650	10800
²⁸⁶ 113	9760	9942	9310	9400	9980	10500
²⁸² Rg	9130	9521	9160	9100	9850	10000
²⁷⁸ Mt	9690	9096	9760	9450	9550	9490
²⁷⁴ Bh	8930	8667	9350	8770	8830	8880
²⁹³ 117	11140	10951	11070	11000	11530	11230
²⁸⁹ 115	10450	10539	10580	10400	10740	11050
²⁸⁵ 113	9880	10123	9330	9500	10210	10690
²⁹¹ Lv	10890	10745	10560	10800	10910	11170
²⁸⁷ Fl	10160	10332	9810	9800	10560	10890
²⁸³ Cn	9670	9914	9660	9600	10160	10460
²⁷⁹ Ds	9840	9493	10350	10080	10240	9930
²⁷⁵ Hs	9440	9067	10110	9600	9110	9330
²⁷¹ Sg	8670	8638	8570	8200	8710	8700
²⁸⁹ 115	10523	10539	10590	10400	10740	11050
²⁸⁵ 113	10027	10123	9330	9500	10210	10690
²⁸⁸ 115	10630	10706	10720	10700	10950	11270
²⁸⁴ 113	10110	10292	9350	9500	10680	10870
²⁸⁰ Rg	9890	9873	10180	10200	10770	10360
²⁷⁶ Mt	9810	9451	10190	9850	10090	9770
²⁷² Bh	9140	9026	8950	8660	9080	9130
Ўрта квадратик четланиш		270	420	300	420	550

5-жадвалда ҳозирги вақтда экспериментал усуллар билан қидиралаётган тартиб сони $Z=120$ дан бошланган α – занжирлар қаторига қарашли ўта оғир ядроларни α – емирилиш энергияси каромат тарзида ҳисоблаб келтирилган.

Атом ядросининг асосий характеристикаси бўлиб уни массаси ҳисобланади. Ядро массаси муаммосига кўпгина эмпирик ва ярим эмпирик ёндошишлар мавжуд. У ёки бу ёндашувни ҳақиқатга яқинлиги уни маълум экспериментал маълумотлар ва массаси номаълум ядролар массасини қанчалик аниқ каромат қила билишида деб ҳисобланади. $SU(4)$ -симметрия тикланган ва изоспинлари $51/2 \leq T_z \leq 57/2$ ораликда ётган ядро массалари массага спин-орбитал таъсирлашишни қўшган қисмини математик моделлаштириш орқали ҳисоблаш мумкин. 5-расмда $E_{sl}(Z,N)$ катталикни турли изоспинли ядролар учун масса сонига боғлиқлиги келтирилган.

$Z=120$ тартиб сонидан бошланувчи ўта оғир ядроларнинг
 α – занжиридаги α – емирилиш Q_α (МэВ) энергияси

Нукл.	Q_α	Нукл.	Q_α	Нукл.	Q_α	Нукл.	Q_α	Нукл.	Q_α
$^{300}_{120}$	11.42	$^{301}_{120}$	11.24	$^{302}_{120}$	11.07	$^{303}_{120}$	10.89	$^{304}_{120}$	10.73
$^{296}_{118}$	11.01	$^{297}_{118}$	19.83	$^{298}_{118}$	10.66	$^{299}_{118}$	10.48	$^{300}_{118}$	10.31
$^{292}_{Lv}$	10.60	$^{293}_{Lv}$	10.72	$^{294}_{Lv}$	10.25	$^{295}_{Lv}$	10.07	$^{296}_{Lv}$	9.89
$^{288}_{Fl}$	10.18	$^{289}_{Fl}$	10.00	$^{290}_{Fl}$	9.83	$^{291}_{Fl}$	9.65	$^{292}_{Fl}$	9.47
$^{284}_{Cn}$	9.76	$^{285}_{Cn}$	9.58	$^{286}_{Cn}$	9.41	$^{287}_{Cn}$	9.22	$^{288}_{Cn}$	9.05



5-расм. $E_{sl}(Z, N)$ катталикини A масса сонига боғлиқлиги

5-расмдан кўриниб турганидек $E_{sl}(Z, N)$ катталикини A масса сонига боғлиқлигини $E_{sl}(Z, N) = \sum_{j=0}^n q_j P_j(A)$ кўринишга эга кўпхад билан ифодалаш мумкин. Бу формулада $P_j(A)$ – Чебишевнинг ортогонал кўпхади. Бизнинг тадқиқотлар натижасида q_j параметрларни изоспинга боғлиқлигини аниқланди. Бу боғлиқликни ҳам $q_j(T_z) = g_{0,j} P_0(T_z) + g_{1,j} P_1(T_z) + g_{2,j} P_2(T_z)$ кўринишда ифодалаш мумкин. $g_{0,j} - g_{2,j}$ параметрларни қийматлари 6 Жадвалда келтирилган.

Олинган $g_{0,j} - g_{2,j}$ қийматларидан фойдаланиб $E_{sl}(Z, N)$ қийматларини қайта тиклаш имконияти бор ва изоспинлари $51/2 \leq T_z \leq 57/2$ бўлган ядролар массаларини ҳисоблаш мумкин. Хаммаси бўлиб кўрилатган изоспинлар интервалида 74 ядрони ҳозирги кунда массалари маълум. Эксперимент ва ҳисоблар орасидаги ўртача квадратик четлашиш атиги 140 кэВни ташкил қилади. Бу замонавий усуллар натижалари ичида аниқлик бўйича энг яхши кўрсаткич.

$g_{0,j} - g_{2,j}$ параметрларнинг $j = 0 - 3$ учун қийматлари

j	$g_{0,j}$ (кэВ)	$g_{1,j}$ (кэВ)	$g_{2,j}$ (кэВ)
0	-4843(55)	566(50)	186(54)
1	185(2)	42(3)	22(3)
2	6.0(0.4)	2.0(0.5)	-0.1(0.6)
3	0.27(0.03)	0.03(0.05)	-0.03(0.07)

ХУЛОСА

«Вигнернинг спин-изоспин $SU(4)$ -симметрияси, уни бузувчи омиллар, симметрияни бажарилиш даражаси ва оғир атом ядролари соҳасидаги тикланиши» мавзусидаги физика-математика фанлари бўйича фан доктори (DSc) диссертацияси доирасида бажарилган тадқиқотлар асосида қуйидагиларни хулоса қилиш мумкин:

1. Илк бор Вигнернинг $a(A), b(A)$ эмпирик функцияларини ядро массалари асосида аналитик кўриниши ўрнатилди ва бу 1800 нафар ҳолат учун массага спин-орбитал таъсирлашиш қўшган бўлагини ҳисоблаш имкониятини берди.

2. Илк бор Вигнер масса формуласида $0.5b(A)\delta$ ҳад ядролардаги жуфтлик энергияси эканлиги исботланди.

3. Илк бор масса сонининг кенг ўзгариш соҳасида Франчини ва Радикати омиллини экспериментал қийматлари аниқ ҳисоблаб топилди. Изоспин пререкцияси T_z ва Вигнер ядро турига боғлиқ Франчини ва Радикати омилли учун биз томонимиздан аниқ назарий формула олинди ва ҳар бир ядрога Вигнер спин-изоспин симметрияси бажарилиш даражаси аниқланди.

4. Илк бор ушбу ишда олинган Франчини ва Радикати омил-мезонининг экспериментал ва назарий қийматлари асосида математик статистика усуллари қўллаш орқали Вигнер спин-изоспин симметриясини тоқ масса сонли, изоспини $T_z \geq 53/2$ бўлган нуклидларда тикланиши ишончлилиги 99% дан катта эҳтимол билан исботланди.

5. Илк бор Вигнер масса формуласи ёрдамида қатор жуда оғир ядроларнинг α – емирилиш энергияси ва яшаш вақти ҳисобланди ва ҳозирги вақтда экспериментал қидирилаётган тартиб рақами $Z=120$ элементнинг α – емирилиш энергияси ва яшаш вақти каромат қилинди. Вигнер спин-изоспин симметрияси тикланган, изоспини $T_z = 51/2, 26, 53/2, 55/2, 28$ ва $57/2$ бўлган нуклидлар учун катта аниқлик билан уларнинг массалари абсолют қийматлари ҳисобланди.

Тадқиқотнинг **асосий якуни** Вигнернинг спин-изоспин $SU(4)$ -симметриясини оғир ядролар соҳасида тикланишини исботланиши бўлиб, бу атом ядроси назариясини Вигнер симметрияси тамоиллари асосида яратилишига асос бўлиб хизмат қилади.

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

ТАШКЕНТСКИЙ ПЕДИАТРИЧЕСКИЙ МЕДИЦИНСКИЙ ИНСТИТУТ

НУРМУХАМЕДОВ АБДУФАТТАХ МАХКАМОВИЧ

**ВИГНЕРОВСКАЯ СПИН-ИЗОСПИНОВАЯ $SU(4)$ -СИММЕТРИЯ,
НАРУШАЮЩИЕ ФАКТОРЫ, СТЕПЕНЬ РЕАЛИЗАЦИИ
СИММЕТРИИ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ В ОБЛАСТИ ТЯЖЕЛЫХ
АТОМНЫХ ЯДЕР**

01.04.08 – Физика атомного ядра и элементарных частиц, ускорительная техника

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации доктора (DSc) физико-математических наук**

Ташкент – 2020

Тема докторской диссертации (DSc) зарегистрирована под номером B2019.1.DSc/FM134 в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан.

Диссертация выполнена в Ташкентском педиатрическом медицинском институте.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском(резюме)) размещен на веб-странице научного совета (www.inp.uz) и на информационно-образовательном портале “Ziyonet” (www.ziyonet.uz).

Научный консультант:	Муминов Талиб Мусаевич доктор физико-математических наук, профессор, академик Академии наук Республики Узбекистан
Официальные оппоненты:	Новиков Юрий Николаевич физика-математика фанлари доктори, профессор Усманов Пазлитдин Нуриддинович доктор физико-математических наук, профессор Турсунов Эргаш Махкамович доктор физико-математических наук, профессор
Ведущая организация:	Физико-технический институт, Научно-производственное объединение “Физика-Солнце” Академии наук Республики Узбекистан

Защита диссертации состоится «___» _____ 2020 г. в ___ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (Адрес: 100214, г. Ташкент, п. Улугбек, ИЯФ; тел.: (+99871) 289-31-41; факс: (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

С докторской диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный номер _____ (100214, г. Ташкент, п. Улугбек, ИЯФ; тел.: (+99871) 289-31-19).

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2020 г.
(протокол рассылки № _____ от _____ 2020 г.).

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

С.Б. Игамов
ученый секретарь Научного совета по
присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н.,
старший научный сотрудник

И. Нуриддинов
председатель научного семинара при Научном совете
по присуждению ученых степеней
д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (Аннотация диссертации доктора наук (DSc))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире развитие экспериментальной базы ядерной физики направлено на получение нуклидов с необычными свойствами, которые называются экзотическими. Различные созданные экспериментальные комплексы нацелены на изучение нуклидов с аномальным составом протонов и нейтронов. Помимо решения ядерных проблем такие комплексы представляют большой интерес для объяснения астрофизических процессов. В области сверхтяжелых атомных ядер они предназначены для наблюдения релятивистических эффектов и их влияния на описание атомных свойств новых элементов Периодической таблицы Д.И. Менделеева. Для успешного решения поставленных перед этими комплексами задач необходимо получение экспериментальной информации о массиве экзотических ядер на нуклидной карте. Получение этой экспериментальной информации требует адекватных предсказаний свойств ядер методами теоретической физики.

Для решения этой важной задачи наилучшим подходом является использование теории, основанной на суперсимметрии в описании сложных квантовых систем. Такой подход значительно упрощает моделирование свойств ядер и позволяет описать большие массивы данных. Отсюда следует актуальность диссертации, поскольку в диссертационной работе рассматриваются вопросы, связанные с реализацией такой суперсимметрии, как вигнеровская спин-изоспиновая $SU(4)$ -симметрия в атомных ядрах. Востребованными являются возможные следствия установления спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии в ядрах, т.к. существующая симметрия позволит более успешно теоретически описать такую сложную систему как атомное ядро.

В нашей республике уделяется большое внимание экспериментальным и теоретическим аспектам исследования атомных ядер. Направление этих фундаментальных исследований, имеющих большое значение для развития науки нашей страны, связаны со Стратегией¹ действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 гг.

Данная диссертационная работа служит реализации задач, утвержденных в государственных нормативных документах, в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 07 февраля 2017 года, а также в «Дорожной карте основных направлений структурных реформ в Узбекистане на 2019-2021 годы», опубликованной правительством Республики Узбекистан 29 ноября 2018 года.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением

¹ Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 07 февраля 2017 г. «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 годы».

развития науки и технологий в Республике Узбекистан II. “Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Обзор международных научных исследований по теме диссертации. Исследования вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии проводятся ведущими мировыми научными центрами и высшими образовательными учреждениями, такими, как University of Wisconsin-Madison (США), Scuola Normale Superiore-Pisa (Италия), INFN Sezione di Pisa (Италия), The Niels Bohr Institute (Копенгаген, Дания), Cyclotron Laboratory and Physics Department, Michigan State University (США), Indiana University (Bloomington, США), Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт” (Россия), Московский физико-технический институт (Россия) и др.

По исследованиям вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии на мировом уровне были получены научные результаты, в том числе: группой Галонского на циклотроне Университета Индианы (США) в реакции перезарядки pn - типа экспериментально обнаружено вырождение аналогового резонанса (АР) и Гамов-Теллеровского резонанса (ГТР) в области тяжелых ядер. Вырождение АР и ГТР было теоретически предсказано Гапоновым и др. в случае восстановления вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии. Но реакция перезарядки является достаточно грубым методом, связанным с высокими фоновыми условиями эксперимента. Для точного определения области восстановления вигнеровской симметрии необходимо произвести анализ масс ядер. Были предприняты интенсивные попытки экспериментального обнаружения восстановления спин-изоспиновой симметрии в области тяжелых ядер на основе анализа масс ядер. Несмотря на большой объем выполненных исследовательских работ, они не увенчались успехом в результате допущенных авторами методических ошибок.

В настоящее время в мире исследования вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии проводятся по ряду приоритетных направлений, в том числе: получение экспериментальной информации о массиве экзотических ядер, экспериментальное обнаружение восстановления спин-изоспиновой симметрии в области тяжелых ядер в лабораториях Национального исследовательского центра “Курчатовский институт» и Московского физико-технического института (Россия).

Степень изученности проблемы. Исследованиями вигнеровской симметрии занимаются многие ученые ведущих научных центров мира, например, американские (Э. Вигнер, А. Галонский и др., Д. Баитум и др.), итальянские (П. Франчини и А. Радикати), российские (Ю.В. Гапонов, Ю.И. Григорьян, Ю.С. Лютостанский, Б. Шульгина, Д.М. Владимиров и др.).

По анализу экспериментальной реализации массовой формулы Э. Вигнера, пользуясь данными по массам ядер в области $A \leq 110$, определена степень универсальности эмпирических функций Э. Вигнера и экспериментальные значения фактора-критерия, которые по Э. Вигнеру

зависят только от изоспина T_z . (П. Франчини и А. Радикати). Однако они пользовались ограниченным числом экспериментальных значений масс ядер, и ими была допущена методическая ошибка – при вычислении фактор-критерия, они вместо массы ядра использовали табличные значения масс нейтральных атомов. Проведен анализ экспериментальных данных масс ядер на предмет обнаружения восстановления вигнеровской симметрии в области тяжелых ядер (Ю.В. Гапонов, Ю.И. Григорьян, Ю.С. Лютостанский, Б. Шульгина, Д.М. Владимиров). Авторы исправили фактор-критерий с учетом кулоновских поправок и эффект спаривания учитывался ими искусственно. Использование неверных исходных данных не позволило аналитически описать эмпирические функции Вигнера, оценить степень реализации вигнеровской симметрии в атомных ядрах и определить область восстановления спин-изоспиновой симметрии.

Существуют факторы, приводящие к нарушению вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии в атомных ядрах. Роль и доля нарушающих факторов в спин-изоспиновой симметрии не установлены и степень нарушения симметрии в каждом нуклиде не изучена. Кроме этого, остается открытой гипотеза об экспериментальном обнаружении восстановления вигнеровской спин-изоспиновой симметрии в атомных ядрах. Главным препятствием для решения этой проблемы является неопределенность функциональной зависимости универсальных эмпирических функций массовой формулы Вигнера от параметров ядра. Для оценки степени нарушения вигнеровской симметрии необходимо знать точное математическое выражение критерия-фактора, при помощи которого возможен статистический анализ данных на предмет восстановления спин-изоспиновой симметрии в атомных ядрах.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высших образовательных и научно-исследовательских учреждений, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских работ Института ядерной физики и Ташкентского педиатрического медицинского института по темам: ОТ-Ф2-011 «Исследования эффекта полного внешнего отражения в γ –диапазоне электромагнитного излучения» (2007 – 2011); Ф2-ФА-Ф114 «Исследование формирования легких элементов и свойств экзотических ядер, образующихся в реакциях при низких энергиях» (2012 – 2016).

Целью исследования является выяснение роли нарушающих спин-изоспиновую $SU(4)$ -симметрию факторов, определение степени нарушений вигнеровской симметрии в ядрах и доказательство восстановления спин-изоспиновой симметрии в области тяжелых атомных ядер.

Задачи исследования:

на основе экспериментальных (литературных) данных по массам атомных ядер получить эмпирические аналитические выражения функций для вигнеровской массовой формулы в широком диапазоне изменения массового числа;

произвести физическую интерпретацию универсальных эмпирических функций Вигнера путем сопоставления массовой формулы Вигнера с формулой Вайцзеккера;

оценить степень реализации вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии в атомных ядрах путем расчета фактора-критерия для атомных ядер в широком диапазоне изменения массового числа;

получить точную теоретическую формулу фактора-критерия для случая полной реализации вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии, зависящую от изоспина и учитывающую вигнеровский тип ядер;

произвести анализ расчетных значений фактора-критерия методом t -критерия Стьюдента на предмет реализации вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии для атомных ядер в широком диапазоне изменения массового числа, определить область восстановления симметрии и установить наивысшую достоверность статистических выводов t -критерия Стьюдента;

для области ядер с восстановленной вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрией рассчитать абсолютные значения масс атомных ядер и сопоставить с экспериментальными данными.

Объектом исследования является спин-изоспиновая $SU(4)$ -симметрия, характерная для сильного взаимодействия.

Предметом исследования являются экспериментальные данные по массам атомных ядер в широком диапазоне изменения массового числа, накопленные за все время развития ядерной физики, и опубликованные в открытой научной литературе.

Методы исследования: анализ экспериментальных (литературных) данных по массам атомных ядер в широком диапазоне изменения массового числа в рамках вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии с применением методов математической статистики и последующего синтеза для прогнозирования масс атомных ядер.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

аналитически описаны эмпирические функции $a(A)$, $b(A)$ Вигнера по экспериментальным (литературным) значениям масс и вычислены экспериментальные значения вклада спин-орбитального взаимодействия в массу ядра для более, чем 1800 нуклидов;

доказано, что в вигнеровской массовой формуле член $0.5b(A)\delta$ определяет парную энергию;

корректно вычислены экспериментальные значения и получена точная формула для фактора Франчини и Радикатти $R_{\text{теор}}$ в широком диапазоне изменения массового числа A , которая зависит от проекции изоспина T_z основного состояния атомного ядра и от вигнеровского типа ядер;

произведена оценка степени нарушения вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии в атомных ядрах во всей наблюдаемой области изменения массового числа;

на основе полученных экспериментальных данных $R_{\text{эксп}}$ и значений $R_{\text{теор}}$ с применением статистических методов доказано восстановление вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии для нуклидов с нечетным массовым числом A , начиная с изоспина $T_z \geq 53/2$ с достоверностью больше 99%.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:
произведена физическая интерпретация эмпирических функций Вигнера;
получена формула, описывающая линию бета-стабильности, которая удовлетворительно согласуется с экспериментом;

рассчитаны границы протонной и нейтронной устойчивости атомных ядер во всем диапазоне изменения массового числа;

на основе массовой формулы Вигнера рассчитаны энергии и времена жизни α – распада ряда новых сверхтяжелых ядер с точностью, превышающей точность современных подходов к проблеме массы ядра;

предсказана энергия α – распада и время жизни сверхтяжелых нуклидов с порядковым номером $Z=120$, поиск которых ведется в настоящее время в ведущих научных центрах мира;

с рекордной точностью (140 кэВ) рассчитаны массы группы атомных ядер с изоспинами $T_z = 51/2, 26, 53/2, 55/2, 28$ и $57/2$, для которых вигнеровская спин-изоспиновая $SU(4)$ -симметрия восстановлена.

Достоверность полученных результатов обосновывается высоким уровнем точности использованных экспериментальных (литературных) данных, технологичностью обновления базы в случае появления новых данных в литературе, современным уровнем программирования, использованием современных математических методов для обработки данных и применением статистических методов с высоким уровнем значимости.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость представленных в диссертационной работе результатов заключается в возможности их использования для развития теории тяжелых и сверхтяжелых ядер, т.к. факт восстановления спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии в этой области нуклидов создает новую основу теоретическим разработкам.

Разработанные в диссертационной работе методика расчета абсолютных значений масс атомных ядер с восстановленной спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрией и метод расчета энергии альфа-распада позволяют прогнозировать массу и энергию альфа-распада сверхтяжелых экзотических ядер с изоспинами $T_z \geq 51/2$, что имеет практическую ценность при планировании экспериментов по поиску “острова стабильности” и открытия нового элемента таблицы Менделеева с порядковым номером 120, поиск которого в настоящее время ведется в крупных мировых научных центрах.

Внедрение результатов исследований. На основе исследования физики явления вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии в атомных

ядрах и применения полученных результатов по восстановлению симметрии к нуклидам из области тяжелых ядер:

результаты, полученные в ходе исследования аналитического описания эмпирических функций Вигнера по экспериментальным значениям масс, вывод о наличии парной энергии в массовой формуле Вигнера, корректно вычисленные экспериментальные значения фактора Франчини – Радикатти $R_{\text{эсп}}$ и полученная точная теоретическая формула для этого фактора $R_{\text{теор}}$ использованы в проекте ПИТРАП (письмо федерального бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»» от 15.10.2019 г.). Использование научных результатов позволило им с большой точностью воссоздать ландшафт массовой поверхности, необходимой для астрофизических оценок пути процесса быстрого нейтронного захвата (r-процесса) при взрывах звёзд;

вывод о восстановлении вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии в области тяжелых атомных ядер, полученный путем статистического анализа вычисленных экспериментальных значений фактора Франчини–Радикатти t -критерием Стюдента, использованы при теоретическом рассмотрении проблемы восстановления вигнеровской симметрии в атомных ядрах (ссылки в зарубежных научных журналах: Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, 2015; Physics of Atomic Nuclei, 2015; EPJ Web of Conferences, 107, 06004, 2016; Physics of Atomic Nuclei, 2020). Использование научных результатов позволило авторам создать теорию обменных резонансов, теоретически обосновать восстановление вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии в области тяжелых нуклидов и произвести самосогласованные расчеты энергий альфа-распада для новых сверхтяжелых ядер.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 20 Международных и республиканских конференциях.

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликованы 26 научных работ, 12 научных статей в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертации, из них 8 в зарубежных научных журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, списка условных обозначений. Объем диссертации составляет 170 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе «**Вигнеровская спин-изоспиновая $SU(4)$ -симметрия в атомных ядрах**» приведен краткий обзор литературных источников, посвященных возможному восстановлению вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии в атомных ядрах. Показано, что экспериментально наблюдать восстановление в атомных ядрах вигнеровскую спин-изоспиновую $SU(4)$ -симметрию можно двумя способами: а) путем поиска ГТР и АР коллективных состояний спин-изоспинового типа; б) путем исследования массового соотношения Вигнера. Реализация первого способа требует наличия ускорительной и прочей дорогостоящей техники, хотя точность этого способа сильно ограничена условиями проведения эксперимента. Второй способ для своей реализации требует высокоточных экспериментальных данных по массам атомных ядер в широком диапазоне изменения массового числа, путем корректной обработки которых можно в принципе установить аналитический вид эмпирических функций Вигнера. В настоящей работе автор реализовал второй способ, изложенный в Главе II. Кроме этого приводится краткий обзор основных теоретических подходов к проблеме масс атомных ядер, на которых базируются существующие современные теоретические разработки. В этой главе также освещается вопрос, связанный с языком программирования и организацией баз данных.

Вторая глава «**Расчет универсальных функций $a(A)$, $b(A)$ и энергии спин-орбитального взаимодействия в атомных ядрах**» диссертации начинается с изложения выдвигаемых принципов и рабочей гипотезы, необходимых для определения аналитического вида эмпирических универсальных функций Вигнера $a(A)$ и $b(A)$. Рабочей гипотезой является положение о том, что влияние нарушающих вигнеровскую спин-изоспиновую $SU(4)$ -симметрию факторов сводится к сдвигу основных состояний атомных ядер относительно друг друга по определенным закономерностям. Кроме этого, при анализе экспериментальных данных по массам, ограничимся массовой формулой Вигнера с членом, содержащим оператор Казимира второй степени C_2 . Массовая формула Вигнера имеет вид

$$M(A, T_z) = a(A) + \frac{1}{2}b(A)C_2(P, P', P'') + E_{\text{Coul}}(A, Z) + E_{\text{sl}}(A, Z) + E_{\text{pair}}(A, Z),$$

где $E_{\text{Coul}}(A, Z)$ – кулоновская энергия ядра, $E_{\text{sl}}(A, Z)$ – вклад спин-орбитального взаимодействия в массу ядра, $E_{\text{pair}}(A, Z)$ – парная энергия. Решая последнее выражение относительно функции $b(A)$ для ядер с нечетным массовым числом, для которых по определению $E_{\text{pair}}(A, Z) = 0$, имеем:

$$b(A) = \frac{\Delta_{\text{ядро}}(A, T_z) - \Delta_{\text{ядро}}(A, T_z - 1) + \Delta E_{\text{Coul}}(A, Z) + \Delta E_{\text{sl}}(A, Z)}{T_z + 3/2}$$

Для реальных ядер величина $E_{\text{sl}}(A, Z)$ неизвестна. Поэтому величина $b(A)$ вычислена при условии $\Delta E_{\text{sl}}(A, Z) = 0$. По умолчанию в последней формуле $\Delta_{\text{ядро}}(A, T_z)$ является избытком массы атомного ядра. Во всех существующих таблицах для масс ядер, приводятся не сами значения избытка массы ядра, а избыток массы нейтрального атома $\Delta_{\text{атом}}(A, T_z)$. По этой причине, перед тем как приступить к вычислениям численных значений функции $b(A)$, необходимо пересчитать табличные данные избытка масс нейтральных атомов в таблицу избытка масс атомных ядер.

Анализ экспериментальных значений эмпирической функции $b(A)$ показал, что для рассматриваемого массового числа имеются случаи с постоянными значениями $b(A)$. Это может иметь место, если энергии спин-орбитального взаимодействия в соседних ядрах, с изоспинами T_z и $T_z - 1$, численно равны или близки. Экспериментальные данные $b(A)$ для таких ядер можно аналитически описать следующей функцией:

$$b(A) = b_1 \exp(b_2 A) + b_3 \exp(b_4 A).$$

Численные значения параметров, полученные МНК, следующие: $b_1 = 1522(47)$ кэВ, $b_2 = -0.0029(1)$, $b_3 = 4123(200)$ кэВ и $b_4 = -0.0238(8)$.

Экспериментальные значения универсальной функции $a(A)$, можно вычислить следующей формулой:

$$a(A) = \Delta_{\text{ядро}}(A, T_z) + Au - b(A) \times C_2 - E_{\text{Coul}}(A, Z),$$

где $E_{\text{Coul}}(A, Z) = 703.2 \cdot Z^2 A^{-1/3} (1 - 1.28 A^{-2/3})$ – энергия кулоновского взаимодействия.

Для анализа удобна величина $a(A)/A$ – удельная универсальная функция. Анализ всей совокупности экспериментальных данных для удельной универсальной функции $a(A)/A$ показывает, что экспериментальные данные можно описать функцией вида:

$$a(A)/A = a_1 \exp(a_2 A) + a_3 \exp(a_4 A) + a_5 \exp(a_6 A) + a_7 \exp(a_8 A).$$

Численные значения параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1

Численные значения коэффициентов $a_1 \div a_8$

Диапазон вычислений	Функции	Коэффициенты
$175 \leq A \leq 195$ и $A \geq 215$	$a_1 \exp(a_2 A)$	$a_1 = 927368(11)$ кэВ/нукл $a_2 = -5.11(5) \times 10^{-6}$
$79 \leq A \leq 121$	$a_3 \exp(a_4 A)$	$a_3 = 2147(92)$ кэВ/нукл $a_4 = -0.0214(5)$
$25 \leq A \leq 39$ и $57 \leq A \leq 65$	$a_5 \exp(a_6 A)$	$a_5 = 1995(78)$ кэВ/нукл $a_6 = -0.048(1)$
$A \leq 25$	$a_7 \exp(a_8 A)$	$a_7 = 7713(708)$ кэВ/нукл $a_8 = -0.22(2)$

Вычисление вклада спин-орбитального взаимодействия $E_{sl}(Z, N)$ в массу атомного ядра для ядер с нечетным массовым числом A можно производить по формуле:

$$E_{sl}(Z, N) = \Delta_{\text{ядро}}(A, T_z) + Au - a(A) - b(A)C_2 - E_{\text{Coul}}(A, Z).$$

На рисунке 1 вклад спин-орбитального взаимодействия в массу атомного ядра представлен в зависимости от N . Как видно из рисунка 1 все “магические” числа проявляются явно. С продвижением в область тяжелых ядер вклад спин-орбитального взаимодействия в массу атомного ядра $E_{sl}(Z, N)$ увеличивается и достигает 18 МэВ для ^{208}Pb .

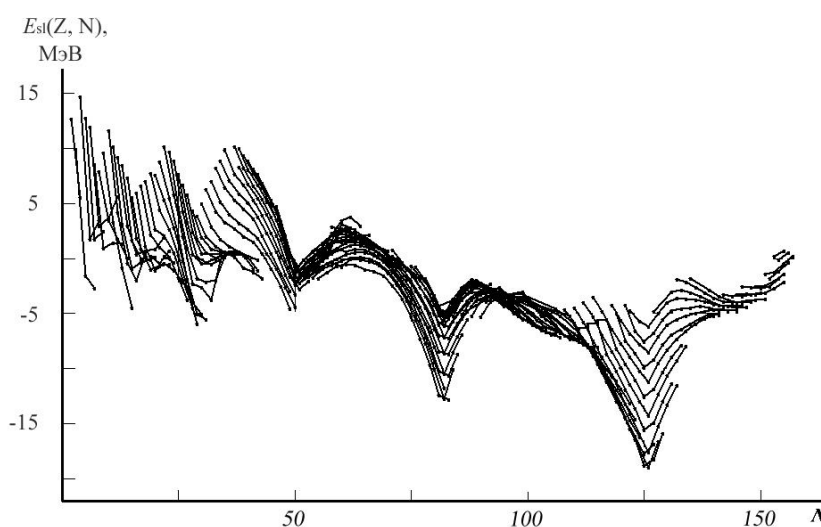


Рис 1. Зависимость вклада в массу атомного ядра спин-орбитального взаимодействия $E_{sl}(Z, N)$ от числа нейтронов для изотопов

В третьей главе «Нарушающие вигнеровскую спин-изоспиновую $SU(4)$ -симметрию факторы и восстановление симметрии в области тяжелых атомных ядер» излагаются вопросы физической интерпретации эмпирических функций Вигнера $a(A)$ и $b(A)$, приведены аргументы в пользу наличия парной энергии в массовой формуле Вигнера, установлена степень нарушения $SU(4)$ -симметрии в атомных ядрах и приведены доказательства восстановления симметрии в области тяжелых ядер.

Для физической интерпретации эмпирических функций $a(A)$ и $b(A)$ необходимо сопоставить массовую формулу Вигнера с формулой для масс Вайцеккера, поскольку вигнеровская массовая формула является модификацией формулы Вайцеккера. Тогда получим следующие символические равенства:

$$a(A)/A = (m_{\text{nucl}} - \alpha + \beta A^{-1/3}), \quad b(A)C_2 = \gamma (N - Z)^2 A^{-1},$$

где α , β и γ – коэффициенты при объемном, поверхностном членах, а также при энергии симметрии.

Из первого соотношения следует, что величину $a(A)/A$ (удельная эмпирическая функция) нужно рассматривать как эффективную массу нуклона в ядре. Причем $a(A)/A$ эффективно учитывает как насыщение ядерных сил системы частиц, так и поверхностную энергию, которая характерна для всех конечных систем. Правая часть второго соотношения является энергией симметрии. Левая часть второго соотношения имеет более сложную структуру, чем энергия симметрии. Это связано с оператором Казимира второй степени C_2 , аналитический вид которого различен для нечетно-нечетных, четно-четных нуклидов и для ядер с нечетным массовым числом (см. таблицу 2).

Оператор Казимира C_2 , является полиномом второй степени, зависящим от проекции изоспина T_z на ось z , и геометрически представляет собой параболу. Как видно из Таблицы 2, часть $b(A)C_2$ равная $0.5b(A)(T_z^2 + 4T_z)$, одинакова для всех групп ядер при A постоянном, хотя имеет более сложную структуру, чем традиционная энергия симметрии. Член, пропорциональный T_z^2 , является традиционной энергией симметрии и отражает тенденцию к стабильности ядер с $N = Z$, а член, пропорциональный T_z , связан с нейтрон-протонным обменным взаимодействием. Поэтому интерпретация слагаемого $0.5b(A)(T_z^2 + 4T_z)$, как энергии симметрии является обоснованной.

Из таблицы 2 также видно, что оператор Казимира C_2 имеет свободный член, принимающий различные значения в зависимости от принадлежности ядра к той или иной группе ядер вигнеровского типа.

Аналитический вид оператора Казимира C_2 , слагаемого $b(A)C_2$ и координаты вершины параболы для трех групп ядер

Группа ядер	Аналитический вид C_2	$b(A)C_2$	Координаты вершины параболы C_2
Z, N – нечет.	$0.5(T_z^2 + 4T_z + 3)$	$0.5b(A)(T_z^2 + 4T_z) + 1.5b(A)$	$(-2, -0.5)$
A – нечет.	$0.5(T_z^2 + 4T_z + 1.5)$	$0.5b(A)(T_z^2 + 4T_z) + 0.75b(A)$	$(-2, -1.25)$
Z, N – четн.	$0.5(T_z^2 + 4T_z)$	$0.5b(A)(T_z^2 + 4T_z)$	$(-2, -2.0)$

В массовой формуле Вигнера величина $1.5b(A)$ является парной энергией для ядер с нечетным массовым числом, поскольку $b(A)$ отражает эффективные двухчастичные силы спин-изоспинового типа.

Массовую формулу Вигнера можно записать в простой форме

$$M(A, T_z) = a(A) + b(A) \times C_2 + E_{\text{Coul}}(A, Z) + E_{\text{sl}}(Z, N).$$

Последнее выражение позволяет получить точное аналитическое выражение для фактора R Францини и Радикати, которое является своеобразным тестом, позволяющим оценить степень нарушения вигнеровской $SU(4)$ -симметрии и определить область восстановления симметрии в регионе тяжелых атомных ядер. Для этого воспользуемся формулой фактора Францини и Радикати с учетом кулоновских поправок

$$R = \frac{M(A, T_z) - M(A, T_z - 2) - \Delta E_{\text{Coul}}(Z, Z + 2)}{M(A, T_z - 1) - M(A, T_z - 2) - \Delta E_{\text{Coul}}(Z + 1, Z + 2)}$$

или

$$R = \frac{(T_z^2 + 4T_z + \delta_{T_z}) - [(T_z - 2)^2 + 4(T_z - 2) + \delta_{T_z - 2}]}{[(T_z - 1)^2 + 4(T_z - 1) + \delta_{T_z - 1}] - [(T_z - 2)^2 + 4(T_z - 2) + \delta_{T_z - 2}]}$$

Учитывая, что $\delta = 3.0, 1.5$ и 0.0 для N, Z – нечетные, A – нечетное и N, Z – четные, соответственно, и считая вигнеровскую симметрию, имеющую место в атомных ядрах, после упрощения последнего выражения получим простую и точную теоретическую формулу для фактора $R_{\text{теор}}$:

$$R_{\text{теор}} = \frac{4(T_z + 1)}{2T_z + 1 + \eta},$$

где $\eta = +3$, если ядро с изоспином T_z является четно-четным, $\eta = 0$, если ядро имеет нечетное массовое число и $\eta = -3$, если ядро является нечетно-

нечетным. Формула для $R_{\text{теор}}$ впервые получена нами. Как видно из формулы для $R_{\text{теор}}$, при выполнении вигнеровской симметрии, фактор $R_{\text{теор}}$ зависит только от изоспина, T_z и η . Величина η приводит к разделению кривой $R_{\text{теор}}$ на три семейства в соответствии с вигнеровским типом ядер, и ее происхождение связано свободным членом в операторе Казимира, учитывающим спаривательный эффект.

Экспериментальные значения фактора Франчини и Радикати $R_{\text{эксп}}$ вычислены для всех возможных случаев в диапазоне изменения массового числа $5 \leq A \leq 257$.

На рисунке 2 приводятся зависимости экспериментальных значений фактора Франчини и Радикати $R_{\text{эксп}}$ от массового числа A для трех групп ядер с изоспинами $T_z = 13/2, 27/2$ и $51/2$ ($A = 2n + 1$ -ядра с нечетными массовыми числами), $T_z = 4, 12$ и 24 ($A = 4n$ -четно-четные ядра) и $T_z = 4, 12$ и 24 ($A = 4n + 2$ -нечетно-нечетные ядра) соответственно. Прямые линии на рисунке построены согласно выражению для $R_{\text{теор}}$. Как видно, экспериментальные значения фактора Франчини и Радикати подвержены вариациям, т.е. чувствительны к влиянию нарушающего спин-орбитального взаимодействия.

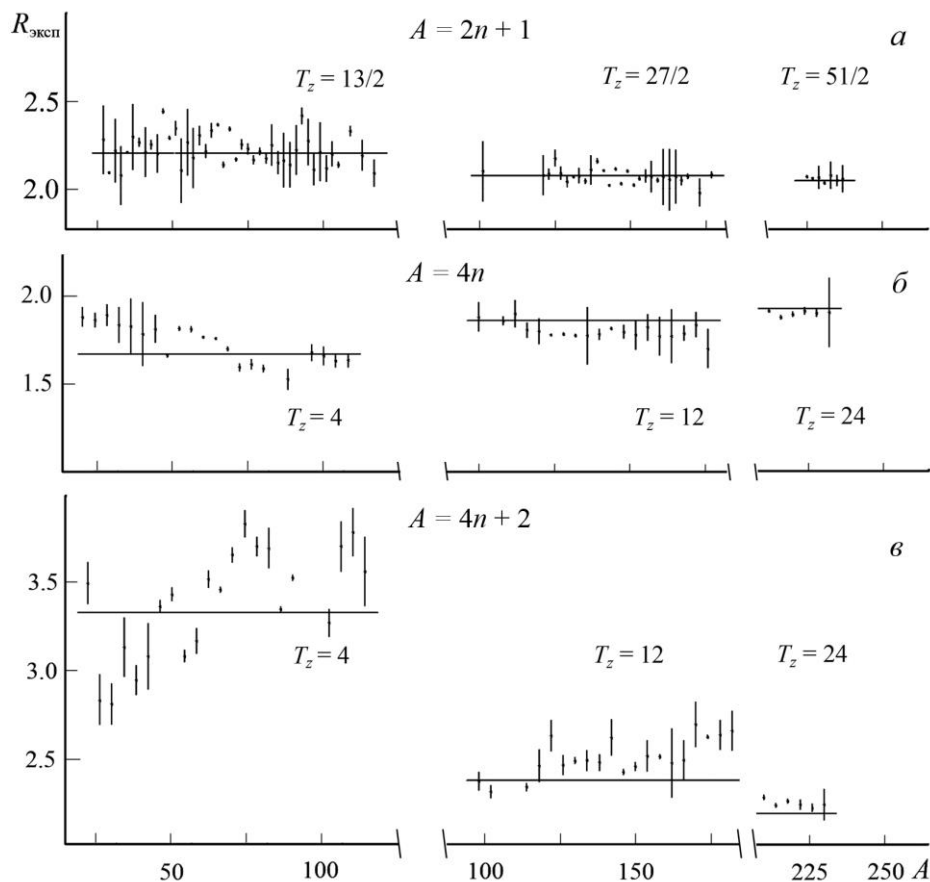


Рис. 2. Зависимость экспериментальных значений фактора Франчини и Радикати $R_{\text{эксп}}$ от A для ядер с изоспинами $T_z = 13/2, 27/2$ и $51/2$

Из полученных выше теоретических и экспериментальных данных фактора R можно оценить степень нарушения вигнеровской симметрии в атомных ядрах. Степень нарушения спин-изоспиновой симметрии ΔR определяется как отношение $\Delta R = (\overline{R}_{\text{эксп}} - R_{\text{теор}}) / R_{\text{теор}}$, где

$\overline{R}_{\text{эксп}}$ – взвешенное среднее значение фактора R для ядер с изоспином T_z . Расчеты показывают, что спин-изоспиновая симметрия в нечетно-нечетных ядрах нарушена наиболее существенно и составляет в среднем $\sim 15 \div 20 \%$, в четно-четных ядрах $\sim 5 \%$ и в ядрах с нечетным массовым числом нарушение порядка 1% .

На основе полученных результатов попытаемся оценить степень реализации вигнеровской $SU(4)$ -симметрии в атомных ядрах более точно. Для этого рассмотрим вопрос о степени согласия между теоретической формулой $R_{\text{теор}}$ и экспериментальными средними значениями фактора Франчини и Радикатти $\overline{R}_{\text{эксп}}$ для изоспина T_z . Для решения вопроса о случайном или неслучайном расхождении $\overline{R}_{\text{эксп}}$ и $R_{\text{теор}}$ воспользуемся t -критерием Стьюдента (В. Госсет). t -критерий вычисляется согласно выражению $t = (\overline{R}_{\text{эксп}} - R_{\text{теор}}) \sqrt{n} / \sigma_{\text{эксп}}$, где $\sigma_{\text{эксп}}$ – стандартное отклонение, n – количество экспериментальных данных R для изоспина T_z . Выберем уровень значимости $\alpha = 0.01$.

Из таблицы 3 видно, что вигнеровская симметрия для четно-четных и нечетно-нечетных ядер во всем диапазоне изменения T_z не восстанавливается, хотя наблюдается тенденция к восстановлению. Как видно, для нечетных атомных ядер с изоспинами $T_z = 53/2, 55/2$ и $57/2$ расчетные значения t -критерия меньше, чем табличные. Этот факт статистически можно интерпретировать как восстановление вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии для тяжелых ядер с изоспинами $T_z \geq 53/2$ на уровне значимости $\alpha < 0.01$ т.е с достоверностью больше 99%.

Для применения t -критерия Стьюдента необходимо выполнение двух условий: 1) выражение $R_{\text{теор}}$ должно быть точным; 2) генеральная совокупность, из которой производится выборка R , должна иметь нормальное распределение. Первое условие выполняется. Для уверенного применения оптимального t -критерия Стьюдента, необходимо проверить нормальности распределения выборки $R_{\text{эксп}}$. Для этого мы использовали критерии согласия Шапиро–Уилка. Проведенный нами анализ данных критерием согласия Шапиро–Уилка показывает, что примененный метод t -критерия Стьюдента, посредством которого доказывается восстановление вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии в области тяжелых атомных ядер, является обоснованной.

Таблица 3

Соотношение между расчетными $t_{\text{расч}}$ и табличными $t_{\text{табл}}$ значениями
 t – критерия Стьюдента для трех видов ядер вигнеровского типа в
 зависимости от проекции изоспина ядра T_z (уровень значимости $\alpha = 0.01$)

Ядра с нечетным A			Нечетно-нечетные ядра			Четно-четные ядра		
T_z	n	$t_{\text{расч}} \diamond t_{\text{табл}}$	T_z	n	$t_{\text{расч}} \diamond t_{\text{табл}}$	T_z	n	$t_{\text{расч}} \diamond t_{\text{табл}}$
3/2	28	58.268 > 2.771	2	17	74.976 > 2.947	2	16	41.912 > 2.947
5/2	37	50.271 > 2.725	3	18	11.241 > 2.947	3	19	18.441 > 2.880
7/2	41	61.677 > 2.704	4	23	4.030 > 2.819	4	21	32.728 > 2.830
9/2	43	111.319 > 2.694	5	22	73.089 > 2.831	5	22	14.793 > 2.831
11/2	43	192.25 > 2.694	6	18	8.618 > 2.947	6	18	21.537 > 2.947
13/2	34	25.696 > 2.723	7	17	15.559 > 2.947	7	16	6.692 > 2.947
15/2	29	10.168 > 2.763	8	13	20.827 > 3.055	8	15	11.371 > 2.977
17/2	34	10.261 > 2.723	9	14	27.521 > 3.012	9	22	39.151 > 2.831
19/2	42	17.841 > 2.698	10	21	31.565 > 2.830	10	23	15.411 > 2.831
21/2	40	0.652 > 2.702	11	22	46.285 > 2.831	11	22	84.883 > 2.831
23/2	37	12.964 > 2.725	12	20	28.961 > 2.880	12	19	80.383 > 2.880
25/2	31	37.655 > 2.750	13	16	40.116 > 2.947	13	20	40.145 > 2.880
27/2	28	10.152 > 2.771	14	17	15.212 > 2.921	14	19	40.046 > 2.880
29/2	25	3.747 > 2.797	15	18	24.906 > 2.950	15	19	34.634 > 2.880
31/2	30	49.115 > 2.756	16	19	15.598 > 2.880	16	20	9.670 > 2.880
33/2	35	40.562 > 2.730	17	17	14.919 > 2.921	17	19	5.266 > 2.880
35/2	25	37.201 > 2.797	18	13	66.612 > 3.055	18	11	13.700 > 3.169
37/2	24	4.373 > 2.807	19	12	28.526 > 3.106	19	10	4.765 > 2.880
39/2	19	22.445 > 2.880	20	9	28.591 > 3.355	20	9	9.359 > 3.355
41/2	16	15.082 > 2.947	21	7	13.844 > 3.707	21	8	11.608 > 3.499
43/2	16	8.940 > 2.947	22	5	15.990 > 4.604	22	8	10.015 > 3.499
45/2	16	32.554 > 2.947	23	6	6.421 > 4.032	23	7	5.919 > 3.707
47/2	12	10.159 > 3.106	24	6	18.115 > 4.032	24	6	7.814 > 4.032
49/2	8	6.681 > 3.499	25	3	134.024 > 9.925	25	9	19.531 > 3.355
51/2	7	4.233 > 3.707	26	6	56.939 > 4.032	26	8	30.055 > 3.499
53/2	9	0.545 < 3.355	27	8	41.699 > 3.499	27	7	8.316 > 3.707
55/2	9	0.876 < 3.355	28	4	10.536 > 5.841	28	5	21.309 > 4.604
57/2	6	0.660 < 4.032						

Четвертая глава «Применение массовой формулы вигнера к решению практических задач ядерной физики» посвящена решению практических задач современной физики атомного ядра. Рассматриваются возможности массовой формулы Вигнера для расчета линии бета-стабильности, линий протонной и нейтронной стабильности, оценивается масса нуклона в бесконечной ядерной материи, рассматривается вопрос существования «острова стабильности» и подавления вклада спин-орбитального взаимодействия в области тяжелых ядер, рассчитывается энергия альфа-распада новых сверхтяжелых ядер и вычисляются массы нуклидов с восстановленной $SU(4)$ -симметрией с рекордной точностью.

Для описания линии бета-стабильности необходимо минимизировать выражение

$$F(A, Z) = 0.5[b_1 \exp(b_2 A) + b_3 \exp(b_4 A)] \cdot (T_z^2 + 4T_z + 1.5) + K_1 Z^2 A^{-1/3} (1 - K_2 A^{-2/3})$$

при постоянном массовом числе, которое состоит из двух парабол. В последнем выражении $K_1 = 703.2$ и $K_2 = 1.28$. Далее, вычисляя $\partial F(A, Z) / \partial T_z |_{A = \text{const}}$ и приравняв к нулю, можно получить формулу относительно проекции изоспина T_z , как функцию массового числа A :

$$T_z |_{\beta\text{-стаб}} = \frac{K_1 (A^{2/3} - K_2) - 2B}{B + 2K_1 (1 - K_2 A^{-2/3})}$$

где $B = 0.5[b_1 \exp(b_2 A) + b_3 \exp(b_4 A)]$. Последнее выражение описывает линию “бета-стабильности”. Для точного определения T_z нуклида, находящегося на линии “бета-стабильности”, необходимо вычислить значение выражения с учетом энергии спин-орбитального взаимодействия. На рис. 3 приведена нуклидная карта (Z, N) , где бета-стабильные ядра обозначены “жирными” черными точками, а сплошная линия соответствует расчету согласно выражению.

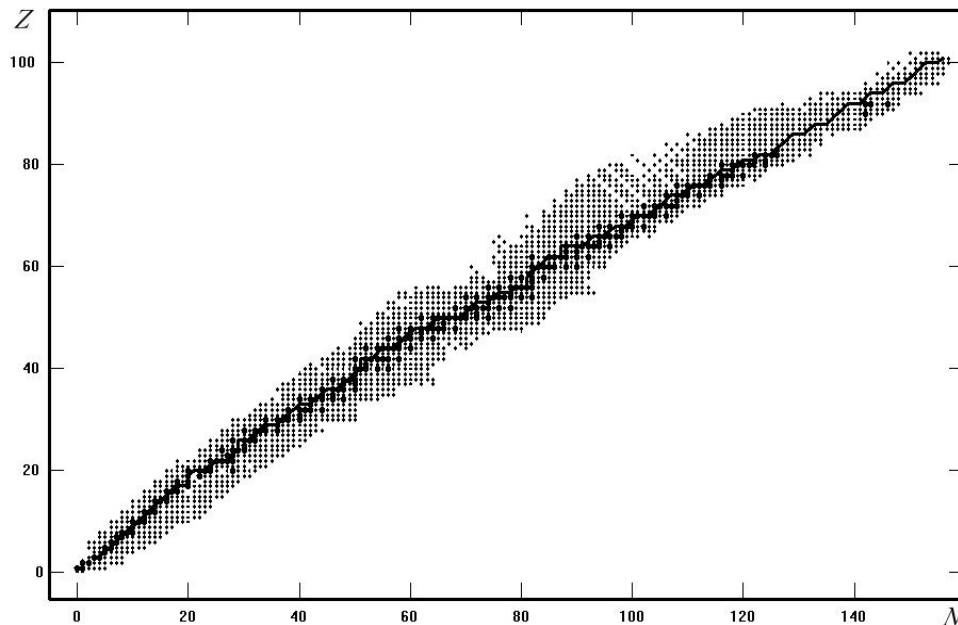
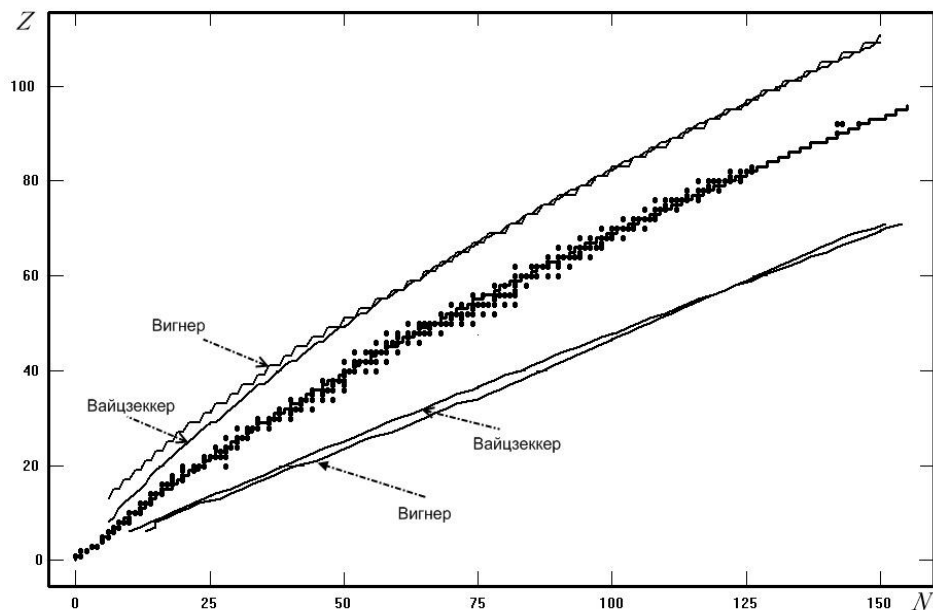


Рис. 3. Нуклидная карта (Z, N) . Сплошная линия—линия “бета-стабильности” (расчет), стабильные нуклиды обозначены “жирными” черными точками

Важным пределом области стабильности, существенным как для ядерной физики, так и для астрофизики, является величина протонного избытка (нейтронного дефицита), при которой энергия отделения протона (нейтрона) становится равной нулю. Этот предел можно вычислить для протонов следующей формулой $\varepsilon_p = \{m_p + M(A-1, N) - M(A, N)\}$, где ε_p – энергия связи протона в ядре с массой $M(A, N)$, m_p – масса протона. Аналогичной формулой вычисляется энергия связи нейтронов ε_n в ядре с массой $M(A, Z) - \varepsilon_n = \{m_n + M(A-1, Z) - M(A, Z)\}$.

Основываясь на массовом соотношении, при известных эмпирических функциях Вигнера, без учета энергии спин-орбитальной энергии, нами рассчитаны значения ε_p и ε_n . Рисунок 4 иллюстрирует поведение линии протонной и нейтронной стабильности ядер, т.е. такой кривой на плоскости (Z, N) для которой выполняется условие $\varepsilon_p \approx 0$ и $\varepsilon_n \approx 0$. На рис. 4 производится сравнение расчетов, выполненных согласно массовой формуле Вигнера, и результатов расчета, основанного на формуле Вайцзеккера для энергии связи ядра.



**Рис. 4. Линии протонной и нейтронной стабильности атомных ядер.
Расчеты произведены на основе массовой формулы Вигнера и
Вайцзеккера**

Определенный нами аналитический вид эмпирической удельной функции Вигнера $a(A)/A$ позволяет оценить эффективную массу нуклона в бесконечной ядерной материи. Действительно, для ядер с бесконечно большой массой или при $A \approx \infty$, $a(A)/A = a_1$. Поскольку величина $a(A)/A$ является эффективной массой нуклона в ядре, коэффициент a_1 можно интерпретировать как эффективную массу нуклона в бесконечной ядерной

материи. Уточненный нами параметр a_1 имеет значение $a_1 = 927382(8)$ кэВ/нукл. Величиной a_1 можно пользоваться как эмпирической единицей массы ядра, имеющей естественное происхождение. Коэффициент перевода между унифицированной единицей массы u и эмпирической ядерной единицей массы $a_1 - u/a_1 = 1.004434(9)$.

Оболочечная модель не ставит ограничений на возможность существования в природе ядер тяжелее урана. Более того, согласно модели оболочек, по мере заполнения подоболочек и оболочек, спин-орбитальное взаимодействие в целом возрастает, что должно приводить к образованию более устойчивых ядер.

Классическая оболочечная модель предсказывает, что следующим после $^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$ дважды “магическим” ядром является гипотетический нуклид с массовым числом $A=310$, имеющий в своем составе протоны $Z=126$ и нейтроны $N=184$ ($A=Z+N=310$), которыми должны заполниться оболочки $1i_{13/2}$ и $1j_{15/2}$, соответственно. Получение нуклида $^{310}_{126}$ искусственным путем является серьезной научной проблемой даже на сегодняшний день. Начиная с 60-х гг. XX столетия велись интенсивные теоретические исследования по предсказанию области ядер с относительно большим временем жизни, которые, в принципе, можно искусственно получить доступными техническими средствами.

При выполнении некоторых условий теоретического характера ядро с числом протонов $Z=114$ и нейтронов $N=184$ можно рассматривать дважды “магическим” нуклидом. Область ядер вокруг нуклида с числом протонов $Z=114$ и числом нейтронов $N=184$ была названа “островом стабильности”. Эти ядра должны отличаться от других тяжелых ядер особой устойчивостью по отношению к делению, могут испытывать альфа или бета распад.

Восстановление вигнеровской $SU(4)$ -симметрии позволяет интерпретировать наблюдающиеся времена жизни нуклидов из “острова стабильности” по-новому. В пользу восстановления вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии в области сверхтяжелых ядер служат следующие экспериментальные факты:

1) асимптотическое сближение ГТР и АР в области тяжелых ядер, что физически отвечает эффективному подавлению спин-орбитального расщепления ΔE_{ls} в заряженном $p\bar{n}$ -канале возбуждений ядра $A(N, Z)$ с ростом избытка нейтронов или изоспина, которое свидетельствует о приближенном равенстве $f'_0 \approx g'_0$ констант изоспинового и спин-изоспинового взаимодействия ТКФС,

2) убывание экспериментальных значений вклада спин-орбитального взаимодействия в массу основного состояния ядер $E_{s1}(Z, N)$ по мере продвижения в область сверхтяжелых нуклидов с числом нейтронов $N > 146$ до ~ 100 кэВ;

3) статистический анализ методом t -критерия Стьюдента фактора Франчини и Радикатти $R_{\text{эсп}}$, полученного на основе экспериментальных значений масс основных состояний атомных ядер, который с достоверностью 99,9% указывает на восстановление вигнеровской $SU(4)$ -симметрии для ядер с нечетным массовым числом A и изоспином $T_z \geq 53/2$;

4) наблюдающаяся тенденция к восстановлению вигнеровской симметрии для четных A ядер с ростом изоспина T_z ;

5) наилучшее согласие расчетных значений энергии α -распада Q_α , вычисленных в предположении $E_{s1}(Z, N) = 0$ (соответствующее восстановлению вигнеровской $SU(4)$ -симметрии), с экспериментальными данными для сверхтяжелых ядер по сравнению с другими современными теоретическими подходами (смотрите далее);

6) рекордная точность результатов расчета избытка масс сверхтяжелых ядер, выполненных для нуклидов с восстановленной спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрией (смотрите далее).

По нашим оценкам для классической дважды “магической” области $Z=126$ и $N=184$ вклад спин-орбитального взаимодействия в массу ядра $^{310}_{126}$ должен составлять порядка -28 МэВ, влияние которого экспериментально не наблюдается (см. рис. 1). Это приводит к предположению, что наблюдающиеся времена жизни ядер из “острова стабильности” связаны с восстановлением вигнеровской $SU(4)$ -симметрии.

Энергия α -распада Q_α определяется с учетом эффекта отдачи через разность масс связанных α -распадом ядер выражением $Q_\alpha(Z, N) = M_1(^A_ZX) - M_2(^{A-4}_{Z-2}Y) - M_\alpha + E_1 - E_2$, где $M_1(^A_ZX)$ и $M_2(^{A-4}_{Z-2}Y)$ масса основного состояния материнского и дочернего ядра, M_α – масса α -частицы, E_1, E_2 – энергия возбужденного состояния материнского и дочернего ядра соответственно. Зная экспериментальные значения энергии α -распада Q_α , можно вычислить время жизни обнаруженного нового изотопа по эмпирической формуле Пархоменко–Собичевского $\lg T_\alpha(Z, N) = aZ[Q_\alpha(Z, N) - \overline{E}_2]^{-1/2} + bZ + c$. В последнем выражении $a=1.5372$, $b=-0.1607$ и $c=-36.573$. Параметр $\overline{E}_2$ представляет собой среднюю энергию возбуждения дочернего ядра. Для четно-четных ядер $\overline{E}_2=0$, для нечетно-четных ядер $\overline{E}_2=E_p=0.113$ МэВ, для четно-нечетных ядер $\overline{E}_2=E_n=0.171$ МэВ и для нечетно-нечетных ядер $\overline{E}_2=E_p+E_n$. В таблице 4 приведены результаты наших расчетов Q_α массовой формулой Вигнера в предположении $E_{s1}(Z, N)=0$, что соответствует полному подавлению вклада спин-орбитального взаимодействия в массу ядра. Как видно из таблицы 4, среднеквадратическое отклонение расчетов от эксперимента для нашего подхода наилучшее, чем в других подходах.

Таблица 4

Энергия α – распада Q_α (кэВ) сверхтяжелых ядер. Экспериментальные значения Q_α и предсказания других подходов заимствованы из работы Толоконникова и др.

Материн. ядро	Эксп.	По Вигнеру	Толоконников и др.	Скирма-Хартри-Фок	Микро-Макро. Метод.	Полу-Эмпир. Мо-дель Оболоч.
²⁹⁴ 118	11810	11332	11450	11400	12110	11550
²⁹⁰ Lv	11000	10923	11810	10700	11080	11420
²⁸⁶ Fl	10330	10511	10060	10300	10860	11110
²⁹⁴ 117	10960	10773	10980	11100	11430	10900
²⁹⁰ 115	10090	10359	10240	10400	10650	10800
²⁸⁶ 113	9760	9942	9310	9400	9980	10500
²⁸² Rg	9130	9521	9160	9100	9850	10000
²⁷⁸ Mt	9690	9096	9760	9450	9550	9490
²⁷⁴ Bh	8930	8667	9350	8770	8830	8880
²⁹³ 117	11140	10951	11070	11000	11530	11230
²⁸⁹ 115	10450	10539	10580	10400	10740	11050
²⁸⁵ 113	9880	10123	9330	9500	10210	10690
²⁹¹ Lv	10890	10745	10560	10800	10910	11170
²⁸⁷ Fl	10160	10332	9810	9800	10560	10890
²⁸³ Cn	9670	9914	9660	9600	10160	10460
²⁷⁹ Ds	9840	9493	10350	10080	10240	9930
²⁷⁵ Hs	9440	9067	10110	9600	9110	9330
²⁷¹ Sg	8670	8638	8570	8200	8710	8700
²⁸⁹ 115	10523	10539	10590	10400	10740	11050
²⁸⁵ 113	10027	10123	9330	9500	10210	10690
²⁸⁸ 115	10630	10706	10720	10700	10950	11270
²⁸⁴ 113	10110	10292	9350	9500	10680	10870
²⁸⁰ Rg	9890	9873	10180	10200	10770	10360
²⁷⁶ Mt	9810	9451	10190	9850	10090	9770
²⁷² Bh	9140	9026	8950	8660	9080	9130
Среднеквадратическое отклонение		270	420	300	420	550

В таблице 5 прогнозируются энергии α – распада Q_α (МэВ) сверхтяжелых ядер из α – цепочки, начинающийся с $Z=120$, поиск которых в настоящее время ведется.

Основной характеристикой атомного ядра является его масса. Существует множества эмпирических и полуэмпирических подходов к проблеме массы ядра. Состоятельность того или иного подхода определяется точностью, с которой теория может описывать известные экспериментальные данные и предсказывать не изученные.

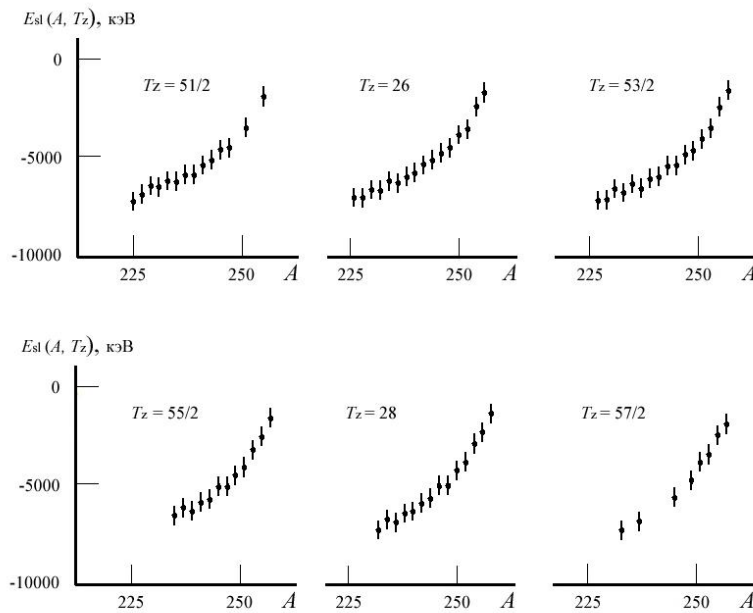
Массу нуклидов с восстановленной $SU(4)$ -симметрией и изоспинами $51/2 \leq T_z \leq 57/2$ можно описать эмпирически, путем математического моделирования вклада спин-орбитального взаимодействия в массу ядра. На

рис. 5 приводится зависимость $E_{sl}(Z, N)$ от массового числа для групп ядер с различными T_z .

Таблица 5

Энергия α – распада Q_α (МэВ) сверхтяжелых ядер из α – цепочки, начинающегося с $Z=120$

Нукл.	Q_α	Нукл.	Q_α	Нукл.	Q_α	Нукл.	Q_α	Нукл.	Q_α
$^{300}_{120}$	11.42	$^{301}_{120}$	11.24	$^{302}_{120}$	11.07	$^{303}_{120}$	10.89	$^{304}_{120}$	10.73
$^{296}_{118}$	11.01	$^{297}_{118}$	19.83	$^{298}_{118}$	10.66	$^{299}_{118}$	10.48	$^{300}_{118}$	10.31
$^{292}_{Lv}$	10.60	$^{293}_{Lv}$	10.72	$^{294}_{Lv}$	10.25	$^{295}_{Lv}$	10.07	$^{296}_{Lv}$	9.89
$^{288}_{Fl}$	10.18	$^{289}_{Fl}$	10.00	$^{290}_{Fl}$	9.83	$^{291}_{Fl}$	9.65	$^{292}_{Fl}$	9.47
$^{284}_{Cn}$	9.76	$^{285}_{Cn}$	9.58	$^{286}_{Cn}$	9.41	$^{287}_{Cn}$	9.22	$^{288}_{Cn}$	9.05



На рис. 5. Зависимость $E_{sl}(Z, N)$ от массового числа A

Как видно из рис. 5 зависимость $E_{sl}(Z, N)$ от массового числа A можно описать многочленом вида $E_{sl}(Z, N) = \sum_{j=0}^n q_j P_j(A)$, где $P_j(A)$ – ортогональные многочлены Чебышева. Наши исследования выявили зависимость параметра q_j от изоспина. Эту зависимость также можно описать ортогональным многочленом Чебышева $q_j(T_z) = g_{0,j} P_0(T_z) + g_{1,j} P_1(T_z) + g_{2,j} P_2(T_z)$. Численные значения постоянных $g_{0,j} - g_{2,j}$ приведены в таблице 6.

Полученные значения $g_{0,j} - g_{2,j}$ позволяют восстановить значения $E_{sl}(Z, N)$ для рассматриваемых ядер и вычислить избытки масс ядер с изоспинами $51/2 \leq T_z \leq 57/2$. Всего ядер в рассматриваемом интервале изоспинов 74. Среднеквадратическое отклонение расчетов от эксперимента

составляет всего 140 кэВ, что является рекордной точностью среди современных методов расчета масс ядер.

Таблица 6

Численные значения параметров выражения $g_{0,j} - g_{2,j}$ для $j = 0 - 3$

j	$g_{0,j}$ (кэВ)	$g_{1,j}$ (кэВ)	$g_{2,j}$ (кэВ)
0	-4843(55)	566(50)	186(54)
1	185(2)	42(3)	22(3)
2	6.0(0.4)	2.0(0.5)	-0.1(0.6)
3	0.27(0.03)	0.03(0.05)	-0.03(0.07)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (DSc) на тему: «Вигнеровская спин-изоспиновая $SU(4)$ -симметрия, нарушающие факторы, степень реализации симметрии и восстановление в области тяжелых атомных ядер» получены следующие результаты:

1. Впервые аналитически описаны эмпирических функции $a(A)$, $b(A)$ Вигнера по экспериментальным значениям масс, что позволило вычислить вклады спин-орбитального взаимодействия в массы ядер более, чем 1800 нуклидов.

2. Впервые доказано, что в вигнеровской массовой формуле член $0.5b(A)\delta$ определяет парную энергию.

3. Впервые корректно вычислены экспериментальные значения фактора Франчини и Радикатти в широком диапазоне изменения массового числа A . Получена точная формула для фактора Франчини и Радикатти $R_{\text{теор}}$, которая зависит от проекции изоспина T_z основного состояния атомного ядра и от вигнеровского типа ядер, что позволила оценить степень нарушения вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии в атомных ядрах.

4. Впервые на основе полученных в настоящей работе экспериментальных данных $R_{\text{эксп}}$ и значений $R_{\text{теор}}$ с применением статистических методов доказано восстановление вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии для нуклидов с нечетным массовым числом A начиная с изоспина $T_z \geq 53/2$ с достоверностью больше 99%.

5. На основе массовой формулы Вигнера рассчитаны энергии и времена жизни α – распада ряда новых сверхтяжелых ядер, и выполнено предсказание энергии α – распада и время жизни сверхтяжелых нуклидов с $Z=120$, поиск которых ведется в настоящее время, С рекордной точностью рассчитаны массы группы атомных ядер (с изоспинами

$T_z = 51/2, 26, 53/2, 55/2, 28$ и $57/2$), для которых вигнеровская спин-изоспиновая $SU(4)$ -симметрия восстановлена.

Главный итог проведенного нами исследования сводится к установлению факта восстановления вигнеровской спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии в области тяжелых атомных ядер, что является основой создания теории ядра на принципах вигнеровской симметрии.

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

TASHKENT PEDIATRIC MEDICAL INSTITUTE

NURMUKHAMEDOV ABDUFATTAKH MAXKAMOVICH

**WIGNER'S SPIN-ISOSPIN $SU(4)$ -SYMMETRY, VIOLATING FACTORS,
LEVEL OF REALIZATION AND RESTORATION IN THE FIELD OF
HEAVY ATOMIC NUCLEI**

**01.04.08 – Physics of atomic nucleus and elementary particles.
Accelerator technique**

DISSERTATION ABSTRACTS
For degree of doctor of science (DSc) on physical and mathematical sciences

Tashkent – 2020

The theme of the doctoral dissertation (DSc) was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No. B2019.1.DSc/FM134.

Doctoral dissertation was carried out at Tashkent Pediatric Medical Institute.

The abstracts of the dissertation were published in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the web site of the Scientific Council at www.inp.uz and on the web site of Ziyonet informational educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific consultant:

Muminov Talib Musaevich

doctor of sciences in physics and mathematics,
professor, academician of the Academy of sciences of
the Republic of Uzbekistan

Official opponents:

Novikov Yuriy Nikolaevich

doctor of sciences in physics and mathematics,
professor

Usmanov Pazlitdin Nuritdinovich

doctor of sciences in physics and mathematics, professor

Tursunov Ergash Makhkamovich

doctor of sciences in physics and mathematics, professor

Leading organization:

**Physical-technical Institute of SPA “Physics-Sun” of
Uzbek Academy of Sciences**

The defense of the dissertation will be held on « ____ » _____ 2020 at _____ at the meeting of Scientific council DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: Ulugbek Town, Mirzo Ulugbek district of Tashkent city, tel.: (+99871) 289-31-41; fax: (+99871) 289150-36-65; e-mail: info@inp.uz).

The text of doctoral (DSc) dissertation can be read through in the Information Resource Center of Institute of Nuclear Physics, (registered under № _____. Address: INP, Ulugbek Town, Mirzo Ulugbek district, 100124, Tashkent city, tel.: (+99871) 289-31-19).

Abstracts of dissertation were distributed on « ____ » _____ 2020.
(Registry record № _____ dated _____ 2020).

M.Yu. Tashmetov

Chairman of the Scientific Council
On Award of Scientific Degrees, D.Ph.-M.S., professor

S.B. Igamov

Scientific Secretary of the Scientific Council
On Award of Scientific Degrees, D.Ph.-M.S.

I. Nuritdinov

Chairman of the Scientific Seminar of the Scientific
Council of the Award of Scientific Degrees,
D.Ph.-M.S., professor

INTRODUCTION (Annotation of doctoral (DSc) dissertation)

Relevance and demand of the topic of the dissertation. At present, the development of the experimental base for nuclear physics is aimed at obtaining nuclides with unusual properties, which are called exotic. Various created experimental complexes are aimed at studying nuclides with anomalous composition of protons and neutrons. In addition to solving nuclear problems, such complexes are of great interest for explaining astrophysical processes. In the field of superheavy atomic nuclei, they are designed to observe relativistic effects and their influence on the description of the atomic properties of new elements of D.I. Mendeleev. To successfully solve the problems posed to these complexes, it is necessary to obtain experimental information on the array of exotic nuclei on the nuclide map. Obtaining this experimental information requires adequate predictions of the properties of nuclei by methods of theoretical physics. To solve this important problem, the best approach is to use the theory based on supersymmetry in describing complex quantum systems. This approach greatly simplifies the modeling of the properties of kernels and allows you to describe large data sets.

Hence follows the relevance of the thesis, since the thesis deals with issues related to the implementation of such supersymmetry as the Wigner spin-isospin $SU(4)$ symmetry in atomic nuclei. Possible consequences of the establishment of spin-isospin $SU(4)$ symmetry in nuclei are in demand, since the existing symmetry will make it possible to theoretically describe more successfully such a complex system as an atomic nucleus.

In our Republic, much attention is being paid to the experimental and theoretical aspects of the study of atomic nuclei. The direction of these fundamental studies, which are of great importance for the development of science in our country, are associated with the Strategy of Actions for the Further Development of the Republic of Uzbekistan for 2017-2021.

This dissertation work serves to implement the tasks approved in state regulatory documents, in the Decrees of the President of the Republic of Uzbekistan No. UP-4947 "On the Strategy of Actions for the Further Development of the Republic of Uzbekistan" dated February 07, 2017, as well as in the "Roadmap of the main directions of structural reforms in Uzbekistan for 2019-2021", published by the Government of the Republic of Uzbekistan on November 29, 2018.

Compliance of the research with the priority directions of development of science and technology of the Republic of Uzbekistan. The dissertation research was carried out in accordance with the priority direction of the development of science and technology in the Republic of Uzbekistan: II. "Energy, energy and resource conservation".

Review of international scientific research on the topic of the dissertation. Studies of the Wigner spin-isospin $SU(4)$ -symmetry are carried out by the world's leading scientific centers and higher educational institutions, such as the University of Wisconsin-Madison (USA), Scuola Normale Superiore-Pisa (Italy), INFN

Sezione de Pisa (Italy), The Niels Bohr Institute (Copenhagen, Denmark), Cyclotron Laboratory and Physics Department, Michigan State University (USA), Indiana University (Bloomington, USA), National Research Center “Kurchatov Institute” (Russia), Moscow Institute of Physics and Technology (Russia) and etc.

According to the research of the Wigner spin-isospin $SU(4)$ -symmetry at the world level, scientific results were obtained, including: by the Galonsky group at the cyclotron of Indiana University (USA) in the np -type, the degeneracy of the analog resonance (AR) was experimentally found and Gamow-Teller resonance (GTR) in the region of heavy nuclei. The degeneracy of AR and GTE was theoretically predicted by Gaponov et al. In the case of restoration of the Wigner spin-isospin $SU(4)$ symmetry. But the recharge reaction is a rather crude method associated with high background conditions of the experiment.

To accurately determine the region of restoration of Wigner symmetry, it is necessary to analyze the nuclear masses. Intensive attempts have been made to experimentally detect the restoration of spin-isospin symmetry in the region of heavy nuclei based on an analysis of the nuclear masses. Despite the large volume of research work performed, they were not crowned with success as a result of methodological errors made by the authors.

At present, in the world, studies of the Wigner spin-isospin $SU(4)$ -symmetry are carried out in a number of priority areas, including: obtaining experimental information on an array of exotic nuclei, experimental detection of the restoration of spin-isospin symmetry in the region of heavy nuclei in the laboratories of the National Research Center “Kurchatov Institute” and Moscow Institute of Physics and Technology (Russia).

The degree of knowledge of the problem. Many scientists from leading scientific centers of the world are engaged in studies of Wigner symmetry, for example, American (E. Wigner, A. Galonsky et al., D. Baitum, etc.), Italian (P. Francini and A. Radicati), Russian (Yu. Gaponov, Y.I. Grigoryan, Y.S. Lyutostansky, B. Shulgina, D.M. Vladimirov and others).

By analyzing the experimental implementation of the E. Wigner mass formula, using data on the masses of nuclei in the region $A \leq 110$, the degree of universality of E. Wigner's empirical functions and the experimental values of the criterion factor, which, according to E. Wigner, depend only on the isospin T_z (P. Francini and A. Radicati). However, they used a limited number of experimental values of the nuclear masses, and they made a methodological error - when calculating the criterion factor, instead of the nuclear mass, they used tabular values of the masses of neutral atoms. An analysis of experimental data on nuclear masses was carried out to detect the restoration of Wigner symmetry in the region of heavy nuclei (Yu.V. Gaponov, Yu.I. Grigor'yan, Yu.S. Lyutostanskiy, B. Shulgina, D.M. Vladimirov). The authors corrected the factor criterion taking into account the Coulomb corrections and took into account the pairing effect artificially. The use of incorrect initial data made it impossible to analytically describe the empirical Wigner functions, to estimate the degree of realization of the Wigner symmetry in atomic nuclei, and to determine the region of restoration of the spin-isospin symmetry.

There are factors leading to the breaking of the Wigner spin-isospin $SU(4)$ -symmetry in atomic nuclei. The role and fraction of breaking factors in the spin-isospin symmetry have not been established, and the degree of symmetry breaking in each nuclide has not been studied. In addition, the hypothesis about the experimental detection of the restoration of the Wigner spin-isospin symmetry in atomic nuclei remains open. The main obstacle to solving this problem is the uncertainty of the functional dependence of the universal empirical functions of the Wigner mass formula on the parameters of the kernel. To assess the degree of Wigner symmetry breaking, it is necessary to know the exact mathematical expression of the criterion factor, with the help of which a statistical analysis of the data is possible for the restoration of the spin-isospin symmetry in atomic nuclei.

The relationship of the topic of the dissertation with the research work of higher educational and research institutions where the dissertation was performed. The dissertation work was carried out in accordance with the plans of research work of the Institute of Nuclear Physics and the Tashkent Pediatric Medical Institute within the framework of research projects: OT-F2-011 "Investigations of the effect of total external reflection in the γ -range of electromagnetic radiation" (2007 - 2011); $\Phi 2$ - ΦA - $\Phi 114$ "Investigation of the formation of light elements and the properties of exotic nuclei formed in reactions at low energies" (2012 - 2016).

The aim of the study is to elucidate the role of $SU(4)$ -spin-isospin-symmetry breaking factors for the practical application of the optimal analytical form of the Wigner mass formula, to determine the degree of Wigner symmetry breaking in nuclei, and to prove the restoration of the spin-isospin symmetry in the region of heavy atomic nuclei (if this takes place) and the application of the results obtained for the practical solution of problems in nuclear physics.

Research objectives:

on the basis of experimental data on the masses of atomic nuclei, obtain empirical analytical expressions for the functions for the Wigner mass formula in a wide range of changes in the mass number;

to make a physical interpretation of the universal empirical Wigner's functions by comparing the Wigner's mass formula with the Weizsacker formula;

to evaluate the degree of realization of the Wigner spin-isospin $SU(4)$ -symmetry in atomic nuclei by calculating the factor-criterion for atomic nuclei in a wide range of changes in the mass number;

to obtain the exact theoretical formula for the factor criterion for the case of full realization of the Wigner spin-isospin $SU(4)$ -symmetry, which depends on the isospin and takes into account the Wigner type of nuclei;

analyze the calculated values of the factor-criterion using the Student's t -test for the implementation of the Wigner spin-isospin $SU(4)$ -symmetry for atomic nuclei in a wide range of changes in the mass number, determine the area of symmetry restoration and establish the highest reliability of the statistical conclusions of the Student's t -test;

for the region of nuclei with the restored Wigner spin-isospin $SU(4)$ -symmetry, calculate the absolute values of the masses of atomic nuclei and compare them with experimental data.

The object of investigation is the spin-isospin $SU(4)$ -symmetry, which is characteristic of the strong interaction.

The subject of research is the experimental data on the masses of atomic nuclei in a wide range of changes in the mass number, accumulated over the entire period of development of nuclear physics, and published in the open scientific literature.

Research methods: analysis of experimental data on the masses of atomic nuclei in a wide range of changes in the mass number within the Wigner spin-isospin $SU(4)$ -symmetry using the methods of mathematical statistics and subsequent synthesis to predict the masses of atomic nuclei.

The scientific novelty of the research is as follows:

the empirical functions $a(A)$, $b(A)$ of Wigner are analytically described on the basis of experimental values of masses and the experimental values of the contribution of spin-orbit interaction to the nuclear mass for more than 1800 nuclides are calculated;

it is proved that in the Wigner mass formula the member of $0.5b(A)\delta$ determines the pair energy;

the experimental values were correctly calculated and the exact formula for the Francini and Radicatti factors R_{teor} was obtained in a wide range of changes in the mass number of A which depends on the isospin projection T_z of the ground state of the atomic nucleus and on the Wigner type of nuclei;

the degree of violation of the Wigner spin-isospin $SU(4)$ -symmetry in atomic nuclei in the entire observed range of the mass number variation was estimated;

based on the obtained experimental data R_{exp} and the values of R_{teor} using statistical methods, the restoration of the Wigner spin-isospin $SU(4)$ -symmetry for nuclides with an odd mass number A , starting from the isospin $T_z \geq 53/2$ is more than 99% reliability.

The practical results of the study are as follows:

a physical interpretation of Wigner's empirical functions is made;

a formula was obtained describing the beta stability line, which is in satisfactory agreement with experiment;

the boundaries of the proton and neutron stability of atomic nuclei were calculated in the entire range of changes in the mass number;

on the basis of Wigner's mass formula, the energies and lifetimes of the α -decay of a number of new superheavy nuclei were calculated with an accuracy exceeding the accuracy of modern approaches to the problem of nuclear mass;

the decay energy α -and the lifetime of superheavy nuclides with the serial number $Z = 120$ are predicted, which are currently being searched for in leading scientific centers of the world;

the masses of the group of atomic nuclei with isospins $T_z = 51/2, 26, 53/2, 55/2, 28$ and $57/2$ for which the Wigner spin-isospin $SU(4)$ -symmetry has been restored have been calculated with record accuracy (140 keV).

The reliability of the obtained results are substantiated by the high level of accuracy of the experimental (literature) data used, the adaptability of updating the database in case of new data in the literature, the modern level of programming, the use of modern mathematical methods for data processing and the use of statistical methods with a high level of significance.

Scientific and practical significance of the research results. The scientific significance of the results presented in the dissertation work lies in the possibility of their use for the development of the theory of heavy and superheavy nuclei, since the fact that the spin-isospin $SU(4)$ -symmetry is restored in this nuclide region creates a new basis for theoretical developments. The method for calculating the absolute values of the masses of atomic nuclei with the restored spin-isospin $SU(4)$ -symmetry and the method for calculating the alpha decay energy developed in the dissertation work will make it possible to predict the mass and alpha decay energy of superheavy exotic nuclei with isospins $T_z \geq 51/2$ which is of practical value when planning experiments to search for an "island of stability" and the discovery of a new element of the periodic table with serial number 120, which is currently being searched for in major world scientific centers.

Implementation of research results. Based on the study of the physics of the phenomenon of Wigner spin-isospin $SU(4)$ -symmetry in atomic nuclei and the application of the results obtained on symmetry restoration to nuclides from the region of heavy nuclei:

the results obtained during the study of the analytical description of the empirical Wigner functions based on the experimental values of the masses, the conclusion about the presence of pair energy in the Wigner mass formula, the correctly calculated experimental values of the Francini - Radicatti factor R_{exp} and the obtained exact theoretical formula for this factor R_{teor} used in the PITRAP project (letter from the federal budgetary institution "Petersburg Institute of Nuclear Physics of the National Research Center "Kurchatov Institute" dated 15.10.2019). The use of scientific results allowed them to recreate with high accuracy the landscape of the mass surface, which is necessary for astrophysical assessments of the path of the fast neutron capture (r-process) process in the explosions of stars;

The conclusion on the restoration of the Wigner spin-isospin $SU(4)$ -symmetry in the region of heavy atomic nuclei, obtained by statistical analysis of the calculated experimental values of the Francini-Radicatti factor by the Student t-criterion, were used in the theoretical consideration of the problem of the restoration of Wigner symmetry in atomic nuclei (references in foreign scientific journals: Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, 2015; Physics of Atomic Nuclei, 2015; EPJ Web of Conferences, 107, 06004, 2016; Physics of Atomic Nuclei, 2020). Application of research outcomes allowed authors to develop a theory of exchange resonances, justify theory of restoration of the Wigner spin-isospin $SU(4)$ symmetry in the field of heavy nuclides, and provide adjusted calculations of alpha decay energies for new superheavy nuclei.

The use of scientific results allowed the authors to create a theory of exchange resonances, theoretically substantiate the restoration of the Wigner spin-isospin $SU(4)$ -symmetry in the region of heavy nuclides, and perform self-consistent calculations of alpha decay energies for new superheavy nuclei.

Approbation of work. The main results of the dissertation work were reported and discussed at 20 International and Republican conferences.

Publication of results. On the topic of the dissertation, 26 scientific works, 12 scientific articles were published in publications recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of the dissertation, 8 of them in foreign scientific journals.

The structure and scope of the thesis. The thesis consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a bibliography. The size of the dissertation is 170 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Нурмухамедов А.М. Универсальные функции массовой формулы Вигнера // Доклады Академии Наук Республики Узбекистан. – Ташкент: АН РУз, 2008. - № 3. - сс 30-33 (01.00.00. №7).
2. Нурмухамедов А.М. Особенности массовой формулы Вигнера для атомных ядер // Доклады Академии Наук Республики Узбекистан. - Ташкент: АН РУз, 2009. - № 1. - С. 38-41 (01.00.00. №7).
3. Nurmukhamedov A.M. Analysis of Experimental Data on Nuclear Masses within Wigner Spin–Isospin $SU(4)$ Symmetry // Physics of Atomic Nuclei. – Moscow (Russia), 2009. - Vol. 72, N 3. - pp. 401–409 (№2. Journal Impact Factor; IF=0.50).
4. Nurmukhamedov A.M. Properties of Universal Functions in the Wigner Mass Formula for Nuclei // Physics of Atomic Nuclei. - Moscow (Russia), 2009. - Vol. 72, N 6. - pp. 1435–1443 (№2. Journal Impact Factor; IF=0.544).
5. Nurmukhamedov A.M. Evaluation of restoration of violated wigner's spin-isospin $SU(4)$ -symmetry in atomic nuclei //Physics of Atomic Nuclei. - Moscow (Russia), 2012. - Vol. 75, N 1. - pp. 27–32 (№2. Journal Impact Factor; IF=0.544).
6. Нурмухамедов А.М. Об обоснованности применения t – критерия Стьюдента для экспериментального доказательства восстановления вигнеровской $SU(4)$ -симметрии в атомных ядрах // Узбекский Физический журнал. – Ташкент: АН РУз, 2013.- № 3. - С. 156-160 (01.00.00. №5).
7. Nurmukhamedov A.M. Some Special Features of Wigner’s Mass Formula for Nuclei // Physics of Atomic Nuclei. - Moscow (Russia), 2014. - Vol. 77, N 12.- pp. 1435-1441 (№2. Journal Impact Factor; IF=0.544).
8. Нурмухамедов А.М. Об обоснованности гипотезы “остров стабильности” // Узбекский Физический журнал. - Ташкент: АН РУз, 2014. - № 6. - С. 409-417 (01.00.00. №5).
9. Nurmukhamedov A.M. The Alternative Method of Evaluation of Pair Energy of Nucleons in Atomic Nuclei // Physics of Atomic Nuclei. - Moscow (Russia), 2015. - Vol. 78, N10. - pp. 1435-1441 (№2. Journal Impact Factor; IF=0.544).
10. Nurmukhamedov A.M. The restoration of Wigner’s $SU(4)$ -symmetry in the superheavy nucleus and its correlation with the problem “island of stability”, or does the “island of stability” exist? // Modern Physics Letters A. – Singapore, 2016. -Vol. 31, N 27. – id.1650145-15 (10 p.) (№2. Journal Impact Factor; IF=1,367).
11. Nurmukhamedov A.M. Alpha-Decay Energy and Lifetime of New Superheavy Nuclei with Restored. Wigner’s $SU(4)$ -Symmetry // Physics of Atomic Nuclei. - Moscow (Russia), 2018. - Vol. 81, No. 2. - pp. 162–167. (№2. Journal Impact Factor; IF=0.544).

12. Nurmukhamedov A.M. Presize calculation of the mass of atomic nuclei with restored spin-isospin $SU(4)$ -symmetry and with nuclei isospins $T_z = 51/2, 26, 53/2, 55/2, 28, 57/2$ // Physics of Atomic Nuclei. - Moscow (Russia), 2019. - Vol. 82, N 2. - pp.108-116 (№2. Journal Impact Factor; IF=0.544).

II бўлим (II часть; part II)

13. Нурмухамедов А.М. Эмпирические универсальные функции массовой формулы Вигнера в рамках спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии. // Журнал “Естественные и технические науки”. – М.: Спутник, 2007. - № 5. - С. 116-119.

14. Нурмухамедов А.М. Спин-орбитальное взаимодействие, как основной фактор нарушающий вигнеровскую спин-изоспиновую $SU(4)$ -симметрию // Журнал “Естественные и технические науки”. – М.: Спутник, 2007. - № 5. - С. 112-115.

15. Nurmukhamedov A.M. Empiric universal function of $b(A)$ for Wigner mass formula // The fifth Eurasian conference «Nuclear Science and ITS Application». – Ankara (Turkey), 2008.- pp. 43-44.

16. Nurmukhamedov A.M. Empiric universal function of $a(A)$ for Wigner mass formula // The fifth Eurasian conference «Nuclear Science and ITS Application». – Ankara (Turkey), 2008.- pp. 44-45.

17. Нурмухамедов А.М. Парная энергия в атомных ядрах // «Наука и производство»: Республиканская научно-практическая конференция, 10-11 июня, 2009, Сборник трудов в 2 т. - Жетысай: Университет «Сырдария» МОН РК, 2009. - С. 299-310.

18. Нурмухамедов А.М. Вигнеровская массовая формула для атомного ядра в рамках спин-изоспиновой $SU(4)$ -симметрии // Вестник каракалпакского отделения АН РУз. – Нукус, 2009. - № 1 (214). - С. 11-13.

19. Nurmukhamedov A.M. Empirical Unit Of Nuclear Mass // International Conference on Nuclear Physics “Nucleus 2010” (LX Meeting on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure). - St.Petersburg, 2010. - pp. 258.

20. Nurmukhamedov A.M. Pair Energy In Atomic Nuclei // International Conference on Nuclear Physics “Nucleus 2010” (LX Meeting on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure). - St.Petersburg, 2010. - pp. 259.

21. Nurmukhamedov A.M. About validity of use of Student’s t – criterion for experimental proof of restoration of Wigner’s $SU(4)$ spin–isospin symmetry in atomic nuclei // Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies: LXII international conference «NUCLEUS 2012», June 25 – 30, 2012. - Voronezh, 2012. -C. 173.

22. Nurmukhamedov A.M. Abnormal values of empiric function $b(a)$ of the mass formula of wigner in the field of light nuclei // Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies: LXII international conference «NUCLEUS 2012», June 25 – 30, 2012. - Voronezh, 2012. -C. 174.

23. Nurmukhamedov A.M. Mass of nucleon in nuclear matter // International Conference «Nuclear Sciences and its Application», Samarkand, September 25-28, 2012. – Tashkent, 2012. - p. 103-105.

24. Nurmukhamedov A.M. Pair energy of proton and neutron in atomic nuclei // International Conference «Nuclear Sciences and its Application», Samarkand, September 25-28, 2012. – Tashkent, 2012. -p. 105-107.

25. Нурмухамедов А.М. Существует ли “остров стабильности”? // ICNRP’ 2013 Conference “Nuclear and Radiation Physics”, dedicated to the 20th anniversary of independence of the Republic of Kazakhstan, September 24-27, 2013. – Almaty (Kazakhstan), 2013. -p. 156-157.

26. Нурмухамедов А.М. Об обоснованности гипотезы “остров стабильности”// Научно-практическая конференция ИАК-VII: сборник тезисов. – Ташкент: Национальный Университет РУз, 2015. - С. 22.

Автореферат «Til va adabiyot ta'limi»- «Преподавание языка и литературы» илмий-методик журнали таҳририятида таҳриридан ўтказилиб, ўзбек ва рус тилларидаги матинлар ўзаро мувофиқлаштирилди (16.11.2020)

Бичими 60x84 1/16. Ризограф босма усули. Times гарнитураси.

Шартли босма табағи: 3,75. Адади 100. Буюртма № 28.

Баҳоси келишилган нархда.

«ЎзР Фанлар Академияси Асосий кутубхонаси» босмахонасида чоп этилган.
Босмахона манзили: 100170, Тошкент ш., Зиёлилар кўчаси, 13-уй.