ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИУТИ

ИГАМОВ САЙРАМБАЙ БАДАМБАЕВИЧ

ЎТА ПАСТ ЭНЕРГИЯЛАРДА ЯДРОВИЙ – АСТРОФИЗИК РАДИАЦИОН ҚАМРАШ РЕАКЦИЯЛАРИНИ ҲИСОБЛАШНИНГ МОДИФИКАЦИЯЛАНГАН ИККИ ВА УЧ ЗАРРАЧАЛИ УСУЛЛАРИ

01.04.08 – Атом ядроси ва элементар зарралар физикаси. Тезлаштирувчи техника

ФИЗИКА МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc) ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2019

УДК 539.144.3

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

Игамов Сайрамбай Бадамбаевич
Ўта паст энергияларда ядровий – астрофизик қамраш реакцияларини ҳисоблашнинг модификацияланган икки ва уч заррачали усуллари … 3

Игамов Сайрамбай Бадамбаевич
Модифицированные двух- и трехчастичные методы расчета ядерно-астрофизических реакций радиационного захвата при сверхнизких энергиях ……. 26

Igamov Sayrambay
Modified two- and three – particle methods of the calculation of the nuclear - astrophysical radiative capture reactions at extremely low energies …… …….. 48

Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ
List of published works…… 51

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

ИГАМОВ САЙРАМБАЙ БАДАМБАЕВИЧ

ЎТА ПАСТ ЭНЕРГИЯЛАРДА ЯДРОВИЙ – АСТРОФИЗИК РАДИАЦИОН ҚАМРАШ РЕАКЦИЯЛАРИНИ ҲИСОБЛАШНИНГ МОДИФИКАЦИЯЛАНГАН ИККИ ВА УЧ ЗАРРАЧАЛИ УСУЛЛАРИ

01.04.08 – Атом ядроси ва элементар зарралар физикаси.
Тезлаштирувчи техника

ФИЗИКА МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc) ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2019

Физика-математика фанлари бўйича фан доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2018.3.DSc/FM33 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (www.inp.uz) ва «Ziyonet» Ахборот таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:	**Ярмухамедов Рахим** физика-математика доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	**Каноков Зокиржон** физика-математика фанлари доктори, профессор
	Усманов Пазлитдин Нуритдинович физика-математика фанлари доктори, доцент
	Олимов Косим физика-математика фанлари доктори, профессор
Етакчи ташкилот:	**Ал-Фороби номидаги Қозоқ Миллий Университети**

Диссертация ҳимояси Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ҳузуридаги DSc.30.05.2018.FM./T.65.01 рақамли Илмий кенгашнинг асосида тузилган бир марталик илмий кенгашнинг 2019 йил _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент ш., Дўрмон йўли кўчаси 33, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти. Тел. (+99871) 262-31-69; факс (+99871) 263-32-54; e-mail: info@iplt.uz).

Диссертация билан Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган. (Манзил: 100125, Тошкент ш., Дўрмон йўли кўчаси 33, ИПЛТИ. Тел. (+99871) 2623169).

Диссертация автореферати 2019 йил «___ » _____ куни тарқатилди.
(2019 йил “____”_____даги ____ рақамли реестр баённомаси)

Х.Б.Ашуров
илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш
раиси, т.ф.д., профессор

Д.Т.Усманов
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) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда жаҳонда Қуёш ва массив юлдузларда кечаётган *pp*-занжир ва CNO – цикл орқали енгил ядролар ҳосил бўлиши билан борадиган ядровий – астрофизик жараёнлар тезлигини юқори аниқликда аниқлаш замонавий ядровий астрофизиканинг, шунингдек космологиянинг энг муҳим муаммоларидан ҳисобланади. Муаммонинг ечими ушбу жараёнларнинг асосини ташкил этадиган, A(a,γ)B радиацион қамраш ядровий - астрофизик реакцияларнинг ўта қуйи энергиялардаги ($E\leq$ 100 кэВ), шу жумладан гамов пики энергияларидаги кесимларини (астрофизик S - факторларини) юқори аниқликда аниқлашга бориб тақалади. Бу энергияларда лаборатория шароитида реакция кесимларини жорий экспериментал услублар ёрдамида керакли аниқликда ўлчашларни амалга оширишнинг имкони бўлмаяпти. Шу сабабли, ўта қуйи энергияларда кечаётган A(a,γ)B радиацион қамраш ядровий - астрофизик реакциялар кесимларининг юкори аниқликдаги қийматларини топиш учун назарий ва экспериментал услубиятлар ишлаб чиқиш ўта муҳимдир.

Ҳозирги кунда жаҳонда қуйи ва ўта қуйи энергиялар ядро физикаси соҳасида фундаментал тадқиқотлар олиб боришга катта аҳамият берилмоқда. Шу маънода (10-15 МэВ/N) ва ўта қуйи энергиялар учун ядровий реакциялар кесимини аниқлашнинг асимптотик назарияси яратилди ва ривожлантирилаяпти ҳамда прецизион экспериментал услубиятлар технологиялари такомиллаштирилаяпти. Ядровий реакциялар асимптотик назарияси асосий ғояси перифериялы сиртли узатиш A(x,y)B реакциялари (бунда $x\rightarrow y+a$; a+A→B), ўта қуйи энергияда радиацион қамраш A(a,γ)B реакциялари кесимлари $A + a \rightarrow B$ боғланган ҳолат тўлқин функциясининг асимптотик нормировка коэффициенти (АНК) га тўғридан тўғри боғлиқ эканлигидан иборат. Шундан келиб чиқиб, ушбу реакциялар кесимларини юқори аниқликда аниқлаш муаммолари АНК нинг экспериментал қийматларини юқори аниқликда аниқлашга бориб тақалади.

Бугунги кунда Ўзбекистонда қуйи энергияларда кечадиган ядровий реакциялар кесимини аниқлашнинг асимптотик назарий усулларининг яратилиши ва ривожлантирилиши, замонавий технологияларга асосланган прецизион экспериментал услубиятларнинг жорий этилиши жаҳон миқёсидаги муҳим илмий натижаларни қўлга киритиш имконини берди. Хусусан, енгил ядролар тўқнашишлари билан кечадиган ядровий реакцияларни тадқиқ қилишга мўлжалланган компютерлашган бошқариш тизимига эга электрон статик тезлатгичнинг ишга туширилгани, дунё тадқиқот марказлари олимлари, шу жумладан, республикамиз олимлари таҳлил қилишнинг асимптотик усулларининг яратилиши ва ривожлантирилиши бунга сабаб бўлди. Олинган натижаларнинг аниқлик даражасини яна ҳам ошириш йўлида замонавий технологияларни тадбиқ этиш орқали ядровий реакциялар экспериментал услубиятларини

такомиллаштириш, фундаментал катталик ҳисобланган АНК нинг юқори аниқликдаги экспериментал қийматларини аниқлашнинг назарий усулларини ривожлантириш ва уларни енгил ядролар тузилиши масалаларига ҳамда замонавий ядровий – астрофизика ва космологиянинг муаммоларини ҳал этишга тадбиқ этиш долзарб масала бўлиб қолмоқда. Қуёш ва массив юлдузларда кечадиган ҳар хил ядровий астрофизика жараёнлар тезлигини аниқлаш учун қуйи ва ўта қуйи энергияларда ядро физикаси соҳасида фундаментал тадқиқотлар олиб бориш Ўзбекистонни янада ривожлантириш бўйича 2017-2021 йиллардаги Ҳаракатлар[1] стратегиясига киритилган. Бу тадқиқотлар ядровий астрофизика, бошқариладиган термоядровий жараёнлар физикаси, ҳамда ядровий энергетика муаммоларига тўғридан – тўғри боғлиқ.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2013 йил 1 мартдаги ПФ–4512- сон “Муқобил энергия манбаларини янада ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон “Фанлар Академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора тадбирлари тўғрисида”ги Қарорларида, 2017 йил 7 февралдаги ПФ–4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида” ги Фармонида ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожлантиришнинг II.«Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи. Ядро тузилиши назариясини ривожлантириш ҳамда қуйи ва ўта қуйи энергияларда ядровий жараёнларни тадқиқ қилиш бўйича жаҳоннинг етакчи илмий марказларида, жумладан: Техас Университетининг Циклотрон институтида (АҚШ), Суррей Университетида (Буюк Британия), Европа Коллабрацияси тезлаштирувчи лабораторияси, Осака ва Токия Университетлари ядровий тадқиқотлар марказлари (Япония), Экспериментал ядро физикаси ва астрофизикаси маркази (АҚШ), ТРИУМФ – Канада зарралар тезлатгичлари маркази (Канада), Ядро физикаси миллий институти (Катания, Италия), Брюссель Либре Университети (Белгия), Атом энергияси институти (Хитой), М.В. Ломоносов номидаги Москва давлат университети қошидаги ядро физикаси илмий тадқиқот институти (Россия), “Курчатов институти” Миллий тадқиқот маркази (Россия), Ядро физикаси институти (Қозоғистон), Ядро физикаси институти (Ўзбекистон), Ал – Фараби номидаги Қозоқ Милий университети (Қозоғистон), В.Г.Фесенков номидаги Астрофизика институтида (Қозоғистон) илмий ишлар олиб борилмоқда.

[1] 2017 йил 7 февральдаги ПФ-4947-сонли “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида” Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони

Енгил ядролар тузилиши, зарядланган заррачани сиртли узатиш ядровий жараёнлари механизмлари ҳамда қуйи ва ўта қуйи энергияларда радиацион қамраш реакцияларини назарий тадқиқи бўйича дунё миқёсида бир қатор муҳим натижаларга эришилган, жумладан: енгил ядролар тузилиши фундаментал характеристикалари (масалан, боғланиш энергияси, ўрта квадратик радиуси ва АНК) турли микроскопик моделлар ва турли икки заррали потенциаллар ёрдамидаги *ab initio* ҳисоблашлар доирасида тадқиқ қилинган, ва бунда олинган қийматларнинг қўлланилган моделлар ва потенциалларга кучли боғлиқлишги аниқланган (Брюсселнинг Либре Университети, Токио Университети ва бошқ.); уйғониш назарияси бўйича ўтиш оператори бош қисмининг нолинчи ва биринчи тартиб доирасида олинган модификацияланган бузилган тўлқинлар усули асосида (МБТУ) *a* заррачани узатиш сиртли реакцияларининг бориши асосий механизмлари ва бир қатор B (A + *a* $\rightarrow$ B) ядролар учун АНК нинг экспериментал қийматларини олиш эҳтимолликлари ўрганилган (Техас университетининг Циклотрон институти, Суррей университети, Хитой Атом энергияси институти, “Курчатов институти” Миллий тадқиқот маркази, Қозоғистон Ядро физикаси институти ва Ўзбекистон Ядро физикаси институти); *pp*-занжири ва CNO циклининг муҳим ядровий - астрофизик реакциялари микроскопик ва икки – ва уч – заррали потенцил моделлари доирасида ўрганилиб чиқилган (Техас университетининг Циклотрон институти, Суррей университети, Хитой Атом энергияси институти, Брюсселнинг Либре Университети, Европа Коллаборацияси тезлаштирувчи лабораторияси, Осака ва Токио Ядровий тадқиқот марказлари, Қозоғистоннинг Аль-Фараби номидаги Қозоқ Миллий университети ва Астрофизика институти).

Дунёда енгил ядролар тузилиши, зарядланган заррачани сиртли узатиш ядровий жараёнлари механизмлари ҳамда қуйи ва ўта қуйи энергияларда радиацион қамраш реакцияларининг назарий тадқиқи бўйича мос равишда қуйидаги устувор йўналишларда фундаментал тадқикотлар олиб борилмоқда: енгил ядролар учун АНК қийматлари учун микроскопик ҳисоблашлар, олинаётган натижаларнинг қўлланилаётган модел параметрларига сезгирлигини аниқлаш, АНК нинг экспериментал қийматларини олиш ҳамда уларни *pp* - занжир ва CNO цикл реакцияларининг S – факторларини ҳисоблаш, уларнинг гамов пики то нолгача энергияларда экстраполяцион қийматларини аниқлаш учун ишлатиш.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳозирги кунда дунёнинг етакчи олимлари, жумладан, белгиялик (D. Baye, P. Discouvement), америкалик (A. M. Mukhamedzhanov, P.E. Tribble, K. M. Nollett, R. G. H. Robertson ва бошқ.), германиялик (D. Bemmerer, K. Langanke, P. Mohr, C. Rolfs, T. Neff), япониялик (T. Kajino, T. Motabayashi, K. Ogata, H. Hidetoshi), италиялик (C. Spitareli, M. La Cognata), буюк британиялик (R.C. Johnson, N. K. Timofeyuk), франциялик (A. Coc), канадалик (B. Davids), россиялик (Л. Д Блохинцев, В. И. Кукулин,С. Б. Сакута), қозоғистонлик (Н Буртебоев, М. Жусупов, С.В. Дубовиченко), ўзбекистонлик (Р. Ярмухамедов, С.В. Артемов,

Б.Ф. Иргазиев) ва бошкалар томонидан протоннинг сиртли узатиш реакциялари ва қуйи ва ўта қуйи энергияларда радиацион қамраш реакциялари бўйича бутун бир тадқиқот ишлари цикллари амалга оширилган. Аммо бу ишларнинг аксарияти моделли ёндашишларга бағишланган бўлиб, бундай ёндашишлар енгил ядролар учун АНК нинг қийматини ҳисоблашда сезиларли ноаниқликларга олиб келган. Оқибатда, *pp*-занжир ва CNO цикл ядровий - астрофизик реакциялар тезликларини ҳисоблашлар бўйича аниқ қийматлар олинмаган.

Айтиб ўтилган муаллифларнинг аксарияти АНК нинг қийматлари ҳақида маълумот олишда ва уларни *pp*-занжир ва CNO цикл ядровий - астрофизик реакцияларнинг S – факторларини ўта қуйи энергиялар соҳасига экстраполяция қилишда ишлатишда яқинлашган назариялардан фойдаланганлар. Бундай яқинлашишлар орқали экспериментал маълумотларни назарий йўл билан олишда муаллифлар, биринчидан, протонни сиртли узатиш реакциялари амплитудасини поляризациялашган потенциалнинг қаторга ёйилмасининг нолинчи ва биринчи ҳадларининг ҳиссалари билан чегараланибгина қолиб, юқори тартибдаги ҳадлар ҳиссаларини ҳисобга олмаганлар. Иккинчидан, протоннинг нишон ядроси билан тўғридан тўғри радиацион қамраш реакцияси амплитудасини ҳисоблашда икки заррали потенциаллар доирасида физик жараёнларга адекват бўлмаган моделли яқинлашишлар ишлатилган (С.В. Дубовиченко, D. Baye, P. Discouvement ва бошқалар). Ҳар хил моделлар ва ёндашишлар доирасида амалга оширилган таҳлил натижалари ўзаро катта ички четлашишлардан билан бирга экспериментал натижалардан ҳам узоқлашишлар борлигини кўрсатди. Айниқса, бу кўрсаткичлар протоннинг қолдиқ ядронинг саёз ҳолатларига тутилганда яққол намоён бўлади. Масалан, протонни сиртли узатиш реакцияларини МБТУ доирасидаги (A.M. Mukhamedzhanov, P.E. Tribble) ёки микроскопик моделдаги (D. Baye, P. Discouvement) таҳлилидан олинган АНК қийматлари билан ўта қуйи энергияларда ҳисобланган ^{7}Be(p,γ)^{8}B тўғри радиацион қамраш реакцияси астрофизик S – фактор қийматлари бу катталикнинг замонавий прецизион экспериментал қийматларидан ё ошиб кетган, ё пастлаб кетган. Шундан келиб чиқиб, кўрилаётган сиртли жараёнларда уйғониш назариясига биноан поляризацион потенциаллар қатори ёйилмасида юқори (иккинчи ва ундан кейинги) ҳадлар ҳиссаларини инобатга олиш ҳамда ядровий реакцияларни АНК билан параметризациялашни физик жараёнларга тўғри мослай билиш мақсадга мувофик бўлади.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Ядро физикаси институти илмий-тадқиқот ишлари режасининг Ф-2.1.19 ”Қуйи энергияларда ядровий астрофизикада зарядланган заррани узатишнинг перифериялы реакцияларининг асимптотик назариясини ва ядро тузилишини ҳисоблашнинг мувофиқлаштирилган методини яратиш” (2003-2007); ФА-Ф2-Ф077 ”Ядровий

астрофизикада қуйи ва ўта қуйи энергияларида ядролар ва перифериялы ядро реакцияларининг фундаментал хусусиятларини ҳисоблаш методларини ишлаб чиқиш ва ривожлантириш" (2007-2011); Ф2-ФА-Ф117 "Ядровий астрофизикада ядро фундаментал хусусиятларининг динамик хоссалари устида тадқиқотлар" (2012-2016) илмий тадқиқот лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади зарядланган заррачани сиртли узатиш, қуйи ва ўта қуйи энергияларда радиацион қамраш ядровий жараёнларини ҳисоблашнинг асимптотик усулларини ишлаб чиқиш, $A + a \rightarrow B$ учун АНК нинг экспериментал қийматларини аниқлаш ва уларни *pp*- занжир ва CNO цикл реакциялари астрофизик S- факторларининг ўта қуйи энергияларда қийматларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

зарядланган заррачани тўғри радиацион қамраш $A(a,\gamma)B$ ядровий - астрофизик реакцияни $A + a \rightarrow B$ учун АНК ҳақидаги маълумотдан фойдаланиб моделга тааллуқсизлик йўли билан ҳисоблашнинг модификацияланган икки заррачали потенциал усулини (МИЗПУ) ишлаб чиқиш;

қуйи энергияларда $t(\alpha,\gamma)^7Li$ ва ^7Be $(p,\gamma)^8B$ тўғри радиацион қамраш реакциялари астрофизик S – факторлари бўйича олинган замонавий прецизион экспериментал маълумотларни ($S^{exp}(E)$) МИЗПУ доирасида таҳлилни амалга ошириш, $\alpha + t \rightarrow {}^7Li$ ва $^7Be + p \rightarrow {}^8B$ реакциялар учун АНК экспериментал қийматларини аниқлаш, олинган ушбу қийматларни ўта қуйи энергияларда кўрсатилган реакциялар астрофизик S – факторларини ва уларнинг хатоликларини аниқлашда ишлатиш;

сиртли узатиш ядровий реакция $A(x, y)B$ ($x= y + a$, $B= A + a$ ва a – узатилаётган заррача) учун модификацияланган бузилган тўлқинлар усулини (МБТУ) узатиш механизмлари учун уч заррачали кулон динамикасини яқинлаштирилган ҳолда ҳисобга олиш усули билан умумлаштириш;

МБТУ ни $^6Li(^3He,d)^7Be$, $^{13}C(^3He,d)^{14}N$ $^{14}N(^3He,d)^{15}O$ реакцияларининг дифференциал кесимларининг эксперимент натижалари таҳлилига қўллаш орқали $^6Li + p \rightarrow {}^7Be$, $^{13}C+ p \rightarrow {}^{14}N$ ва $^{14}N+ p \rightarrow {}^{15}O$ лар учун АНК экспериментал қийматларни аниқлаш;

резонанс ҳолат орқали кечадиган $A(a,\gamma)B$ ядровий – астрофизик реакцияларини модификацияланган R – матрица усули орқали ҳисоблашни реакция тўғри қамраш қисми амплитудасининг тўлиқ амплитудаги ҳиссасини аниқ ҳисобга олиш орқали ривожлантириш ва резонанс ҳолат орқали кечадиган $^6Li(p,\gamma)^7Be$, $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$, $^{13}C(p,\gamma)^{14}N$ ва $^{14}N(p,\gamma)^{15}O$ реакцияларнинг астрофизик S-факторларининг қуйи энергиялардаги экспериментал қийматларни таҳлилларини амалга ошириш. АНК нинг $^6Li + p \rightarrow {}^7Be$, $^{12}C+ p \rightarrow {}^{13}N$, $^{13}C+ p \rightarrow {}^{14}N$ ва $^{14}N+ p \rightarrow {}^{15}O$ лар учун қийматларидан фойдаланиб, ўта қуйи энергияларда астрофизик S – фактор қийматлар ва уларнинг хатоликларини ҳамда юлдуз муҳити ҳароратлари учун ($0.01 \leq T_9 \leq 10$, $T_9= 10^9$ K) кўрсатилган реакциялар тезлигини аниқлаш;

кўп зарядли ^{208}Pb ядросининг Кулон майдонида тўғри ^{6}Li $\rightarrow \alpha + d$ парчаланиш реакциясини сўнги ҳолатдаги уч заррали кулон эффектларини инобатга олган ҳолда ҳисоблашнинг асимптотик усулини ишлаб чиқиш, $\alpha + d \rightarrow {}^{6}$Li учун АНК қийматларини аниқлаш, олинган АНК қийматларини $d(\alpha,\gamma)^{6}$Li реакция астрофизик S – факторининг ўта қуйи энергияларда ҳисоблаш учун қўллаш;

(^{12}B, ^{12}N) акс тасвир ядроларда NN - потенциалларнинг (V1 ва V2) Волков, M3Y тўрта туриларини ишлатиб, кўп заррали қобиқлар модели доирасида ядро ички ҳолат тўлқинларининг қопланиш интегралларини, ^{11}B + $n \rightarrow {}^{12}$B ва ^{11}C + $p \rightarrow {}^{12}$N лар учун АНК ва спектроскопик факторларни (СФ) ҳисоблашни, ҳамда натижаларнинг ишлатилаётган потенциаллар турларига таъсирчанлигини аниқлашни кўп заррали қобиқлар модели доирасида микроскопик ҳисоблаш усулини ривожлантириш;

^{11}C + $p \rightarrow {}^{12}$N учун АНК нинг ҳисоблаб топилган қийматлари билан ўта қуйи энергияларда ^{11}C$(p,\gamma)^{12}$N тўғри радицион қамраш реакцияси учун астрофизик S-факторларни қийматларини аниқлаш.

Тадқиқот объекти енгил ядролар тузилиши, массив юлдузлар ва Қуёш бағрида кечадиган ядровий – астрофизик реакцияларидан иборат.

Тадқиқот предмети қуйи ва ўта қуйи энергияларда енгил ядролар қатнашувида сирт билан кечадиган ядровий жараёнлардир.

Тадқиқот усули. Қуйи энергияларда сиртли ядровий жараёнларнинг асосий механизмларини аниқлаш учун икки ва уч тана моделида Шредингер формализми енгил ядролар тузилиши ва ядровий реакциялар назарияси ҳамда аналитик усуллар ва қуйи энергиялар ядровий реакциялар дисперсион назариялари, ФОРТРАН тилида дастурлаш.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

моделга таалуқсизликка асосланган аниқлашнинг модификацияланган икки заррачали потенциал усулини доирасида АНК нинг экспериментал қийматларини аниклаш ишлаб чиқилган;

$\alpha + t \rightarrow {}^{7}$Li($g.s.$), $\alpha + t \rightarrow {}^{7}$Li(0.478 МэВ) ва ^{7}Be + $p \rightarrow {}^{8}$B лар учун АНК нинг экспериментал ҳамда $0 \leq E \leq 25$ кэВ энергияларда t(α,γ) ^{7}Li ва ^{7}Be$(p,\gamma)^{8}$B реакциялар астрофизик S – факторлари қийматлари аниқланган;

уч заррали (A, a ва y) модели доирасида A(x,y)B периферриал ядровий реакцияларда (бу ерда $x=y+a$ ва B=A+a) a заррачани узатиш механизмида уч заррачали кулон динамикасини якинлаштирилган ҳолда ҳисобга олишнинг умумлашган модификацияланган бузилган тўлқинлар усули ривожлантирилган;

^{6}Li(^{3}He,d)^{7}Be, ^{13}C(^{3}He,d)^{14}N ва ^{14}N(^{3}He,d)^{15}O реакцияларда протон узатиш механизмида уч заррачали кулон динамикасининг ҳиссаси ва унинг ^{6}Li + $p \rightarrow {}^{7}$Be, ^{13}C+ $p \rightarrow {}^{14}$N ва ^{14}N + $p \rightarrow {}^{15}$O ларга таъсири миқдорий баҳоланган;

амплитуданинг тўғри қамраш қисми учун A + $a \rightarrow$ B АНК ҳақидаги аниқ маълумотни ҳисобга олган холда A(a,γ)B ядровий - астрофизик реакцияни ифодалайдиган модификацияланган икки заррачали R- матрица усули ривожлантирилган;

^{6}Li(p,γ)^{7}Be, ^{12}C(p,γ)^{13}N, ^{13}C(p,γ)^{14}N, ^{14}N(p,γ)^{15}O реакияларининг $0 \leq E \leq 25$ кэВ энергиялар учун астрофизик S - факторлари, $0.01 \leq T_9 \leq 10$ ҳарорат оралиғи учун тезликлари ҳамда ^{13}N ядросининг (2. 365 МэВ; $1/2^-$) резонанс ҳолати учун радиацион кенглиги аниқланган;

юлдузлар бағрида водород ёнишининг CNO цикли энг суст ^{14}N(p, γ)^{15}O реакцияси орқали ёниши қабул қилингандан яна 1.8 марта секин бўлиши аниқланган;

^{208}Pb (^{6}Li,α d)^{208}Pb кулон парчаланишининг уч карра дифференциал кесимини уч заррачали таҳлил усули ишлаб чиқилган;

$\alpha + d \rightarrow {}^{6}$Li учун АНК нинг экспериментал қийматлари ва $0 \leq E \leq 100$ кэВ энергияларда $d(\alpha,\gamma)^{6}$Li реакцияси астрофизик S – факторининг қийматлари аниқланган;

(^{12}B, ^{12}N) акс тасвир ядролар учун (^{11}B + n)- ва (^{11}C + p)-конфигурациялар қопланиш интегралларини ҳисоблашнинг микроскопик усули ривожлантирилган;

(^{12}B, ^{12}N) акс тасвир ядроларда Волков (V1 ва V2) ва M3Y (M3Y (E), M3Y (R), M3Y (P) ва M3Y NN потенциаллари учун ^{11}B + $n \rightarrow {}^{12}$B ва ^{11}C + $p \rightarrow {}^{12}$N АНК, СФ, ўртача квадратик радиус қийматлари аниқланган ва уларнинг ишлатилаётган потенциалларнинг турига таъсирчанлиги эътироф этилган;

ўта қуйи энергияларда ^{11}C(p,γ)^{12}N реакцияси астофизик S- факторининг қийматлари аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

$\alpha + d \rightarrow {}^{6}$Li, $\alpha + t \rightarrow {}^{7}$Li($g.s.$), $\alpha + t \rightarrow {}^{7}$Li(0.478 МэВ), ^{7}Be + $p \rightarrow {}^{8}$B, ^{6}Li + $p \rightarrow {}^{7}$Be, ^{13}C+ $p \rightarrow {}^{14}$N и ^{14}N + $p \rightarrow {}^{15}$O лар учун АНК экспериментал қийматлари аниқланган ва шу қийматлари ёрдамида ўта қуйи $0 \leq E \leq 25$ кэВ энергияларда мос ҳолда $d(\alpha,\gamma)$ ^{6}Li, $t(\alpha,\gamma)^{7}$Li, ^{7}Be(p,γ)^{8}B, ^{6}Li(p,γ)^{7}Be, ^{12}C(p, γ)^{13}N, ^{13}C(p,γ)^{14}N, ^{14}N(p,γ)^{15}O лар астрофизик S – факторлар топилган;

кўриб чиқилган NN- потенциалларнинг олти туридан фақат M3Y(E) тури ^{11}C + $p \rightarrow {}^{12}$N учун АНК ни эксперимент қийматига яқин қилиб тиклаган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги назарий ядро физикаси математик физиканинг замонавий усулларини қуйи энергияларда ядровий реакциялар дисперсион назарияси ҳамда замонавий ҳисоблашларнинг ва алгоритмларнинг самарали усулларини қўллашдан иборат; олинган назарий натижаларнинг замонавий прецизион тажрибалар билан олинган экспериментал маълумотлар ва бошқа назарий тадқиқот натижалари билан мос келишлигини батафсил текширишдан иборат; диссертация хулосаларининг енгил ядролар тузилиши ҳамда қуйи ва ўта қуйи энергияларда сиртли ядровий жараёнлар назариялари асосий ҳолатлари билан мос келишидан иборат.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий ахамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти зарядланган заррачаларни узатиш барьер ости реакцияларини ифодалай олиши билан, шу йўл билан олинган

маълумотларни Қуёшда кечадиган *pp* – занжир реакциялари ва массив юлдузларда ўрин олган иссиқ CNO цикл ядровий - астрофизик жараёнларни ҳисоблашга тадбиқ қилина олиши билан, ушбу жараёнларда туғиладиган янги ядролар бўсаға ости ва резонанс ҳолатларини ифодалай олиши билан белгиланади.

Натижаларнинг амалий аҳамияти уларнинг атом ва ядро физикаси бир нечта тана квант-механикавий муаммоларини ечишда, ҳамда Қуёш нейтрино оқимининг олдидан айтиб беришда ва Коинотда Катта Портлаш даврида пайдо бўлган енгил элементларни миқдорий аниқлашда муваффақиятли қўлланиши мумкин. Асимптотик усуллар ва уларни қўллаш асосида олинган АНК қийматлари (масалан, $\alpha + t \rightarrow {}^{7}\mathrm{Li}$, ${}^{7}\mathrm{Be} + p \rightarrow {}^{8}\mathrm{B}$ ва ${}^{6}\mathrm{Li} + p \rightarrow {}^{7}\mathrm{Be}$ АНК лари) ва сиртли узатиш ҳамда радиацион қамраш реакциялари кесимларининг янги қийматлари Италия, Венгрия, Польша, Япония, Қозоғистон ва Ўзбекистон илмий марказалари тезлатгичларида янги прецизион экспериментлар қўйилишларига сабаб бўлди ва бўлиб келмоқда.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Ўта қуйи энергияларда кечадиган ядровий астрофизика реакцияларини ҳисоблашнинг таклиф этилган модификацияланган икки заррачали потенциал ва ривожлантирилган *R* – матрица усуллари ҳамда зарядланган заррачани узатиш механизмида уч – заррачали кулон динамикасини ҳисобга олиш усули асосида:

ривожлантирилган бошланғич, оралиқ ва сўнги ҳолатларда периферал барьер усти A(x, y)B (x= y + *a*, B= A + *a*, бунда *a* – узатма заррача) реакцияларини зарядли заррача *a* ни узатиш механизмида уч заррачали кулон эффектларини яқинлаштирилган ҳолда ифодалашнинг умумлаштирилган модификацияланган бузилган тўлқинлар усули (МБТУ) Қозоғистон Республикаси Энергетика вазирлиги Ядро физикаси институтида амалга оширилган енгил ядроларнинг дейтрон ва алфа заррачалар билан таъсирлашувида кечадиган ядровий реакцияларни таҳлил қилишда фойдаланилган (Қозоғистон Республикаси Энергетика вазирлиги Ядро физикаси институтининг 2018 йил 12 июндаги 34-02-13/836 - сонли маълумотномаси). Илмий натижаларининг қўлланилиши бир қатор CNO – цикли ядровий астрофизик реакциялари астрофизик S-факторларининг экспериментал қийматларининг аниқ ифодаланишига ва унинг гамов пики атрофи энергия ҳудудига юқори аниқликдаги экстраполяциясига эришиш имконини берган;

таклиф этилган қуйи энергияларда A(*a*,*γ*)B тўғри радиацион қамраш ядровий - астрофизик реакциясини ифодалаш учун янги модификацияланган икки заррачали потенциал усули (МИЗПУ) ҳамда A(*a*,*γ*)B резонанс радиацион қамраш ядровий – астрофизик реакциясини ифодалашнинг резонанс ва тўғри радиацион қамрашларини, $A + a \rightarrow B$ АНК си ҳақидаги маълумотдан фойдаланган ҳолдаги ривожлантирилган модификацияланган *R* – матрицали усули Ўзбекистон Миллий университети ЭГ-2 электрон тезлаткичида олиб борилаётган илмий изланишлар экспериментал методикаларини яратишда қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва

ўрта – махсус таълим вазирлигининг 2018 йил 6 сентябрдаги 89-0303148 - сонли маълумотномаси). Илмий натижаларининг қўлланилиши протоннинг ^{12}C ва ^{16}O ядролари билан қамраши бўйича янги эксперимент натижалари олишга ҳамда протоннинг ^{12}C ва ^{14}N ядролари томонидан радиацион қамраш ядровий - астрофизик реакциялари тезлигини аниқлашга имкон берган;

$^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ радиацион қамраш реакцияси астрофизик *S* – фактор бўйича олинган натижалар халқаро олимлар томонидан хорижий илмий журналларда (Nuclear Physicis A 918, 61-169, 2013, IF =1.992; Nuclear Physicis A 834, 661-663, 2010, IF =1.992; Reviews of Modern Physics 83, 195-245, 2011, IF =36.917 ва бошқалар) Қуёш қаърисида ва массив юлдузларда юз берадиган $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ реакция тезлигини аниқлаш бўйича маълумотлар базасини яратиш ҳамда олинган натижалар бўйича қиёслаш таҳлилларини олиб боришда ишлатилганлиги қайд этилган.

Тадқиқотнинг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари 15 та халқаро ва республика анжуманларида муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 26 та илмий иш нашр қилинган, жумладан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиянинг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 11 та мақола, шулардан 10 таси хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертация тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 184 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлар ва усуллари тавсифланган, Ўзбекистон Республикасининг фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

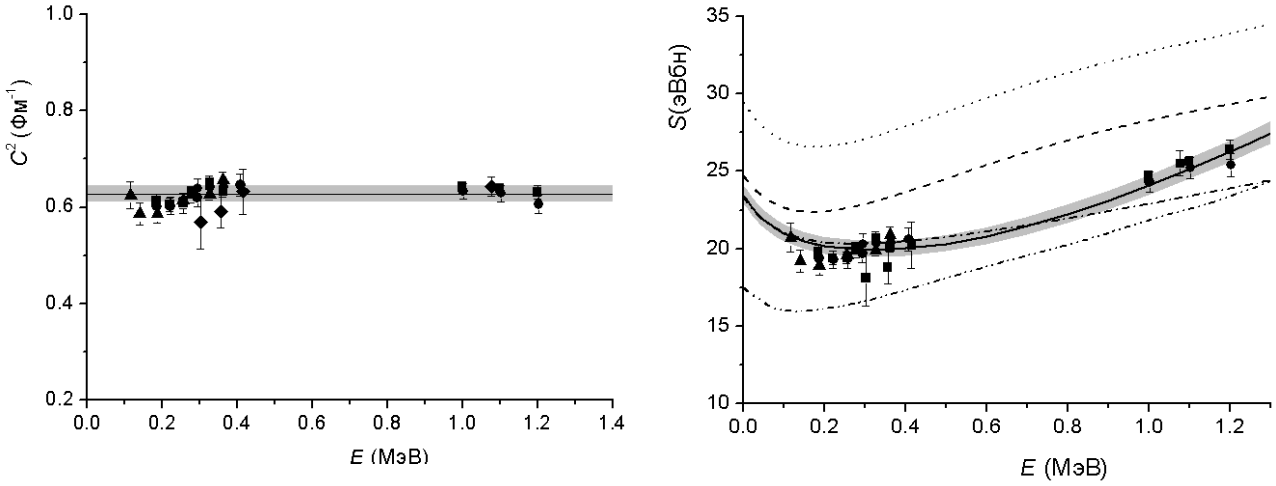
Диссертациянинг **“Модификацияланган икки заррачали потенциал услуби”** номли биринчи бобида $t(\alpha,\gamma)^7Li$ ва $^7Be(p,\gamma)^8B$ реакциялар ҳақида адабиётларнинг қисқа обзори ҳамда бошқа авторлар томонидан олинган натижаларнинг батафсил критик таҳлили келтирилган. Шунингдек, $A(\alpha,\gamma)B$ тўғри радиацион қамраш реакцияларининг МИЗПУ доирасида ўрганишнинг асосий ғояси баён этилган.

Биринчи бобнинг биринчи бўлимида тўғри радиацион қамраш реакция астрофизик S –факторининг математик ифодаси умум спин кинематика доирасида $A+a\rightarrow B$ учун АНК квадрат (C^2) ининг аналитик ҳисобланадиган, $(A+\alpha)$ - боғланган ҳолат ҳамда $A\alpha$- сочилиш тўлқин функцияларини узун

тўлқинли ёндашишда олинган электромагнит ўтиш оператори билан сверткаси радиал интегралини ўз ичига олган $R(E,b)$ – функция билан факторланган кўпайтмаси кўринишида олинган. Бу ерда b - бир заррачали АНК, қайсики (А+α) – боғланган ҳолат бир заррачали қобиқ тўлқин функцияси “думи” нинг амплитудасини белгилайди. У Вудс – Саксон потенциали геометрик параметрлари (радиус r_0 ва диффузиялангани a) га ўта тобе бўлиб, моделли параметр ҳисобланади. МИЗПУ да иккита шарт шаклланган бўлиб: 1) $R(E,b)$= const ҳолати E нинг бирор бир қотирилган қийматида b нинг ҳар қандай вариацияси учун сақланиши керак; 2) $C= S(E)/ R(E,b)$ нисбат b нинг ҳамда E нинг ўзгаришига таалуқсиз бўлиши керак.

Шу икки шартнинг бажарилиши $E=E_i$ (i=1,2, … N) экспериментал энергиялар учун $(C_i^{exp})^2= S^{exp}(E_i)/ R(E_i,b)$ ифода ёрдамида АНК нинг моделга таалуқсиз экспериментал қийматларини аниқлашга, уларнинг ўртача қийматидан фойдаланиб, $S(E)= (C^{exp})^2 R(E,b)$ ифода ёрдамида астрофизик S - факторнинг гамов пикидан то нолгача энергияларда (ўта қуйи энергиялар соҳаси) қийматларини хатоликлари билан биргаликда ҳисоблаб топиш имконини беради.

Кўрсатилган шартлар диссертацияда таҳлил остига олинган $t(\alpha,\gamma)^7$Li ва ^{7}Be$(p,\gamma)^8$B реакциялар учун ўта юқори аниқликда бажарилиши аниқланган. t+α→^{7}Li(асосий), t+α →^{7}Li(0.478 МэВ) ва ^{7}Be + p→^{8}B лар учун АНК нинг экспериментал қийматлари ҳамда астрофизик S- факторнинг ўта қуйи энергияларда қийматлари хатоликлари билан биргаликда аниқланди. Бу қийматлар t+α→^{7}Li(асосий) ва t+α →^{7}Li(0.478 МэВ) лар учун мос равишда $(C^{exp})^2$ = 12.74±1.10 ва 9.00±0.90 Фм$^{-1}$ ҳамда ^{7}Be + p→^{8}B учун $(C^{exp})^2$=0.626±0.017 Фм$^{-1}$ тенг бўлиб чиқди. Астрофизик S- факторнинг E= 0



1 – расм. Чапда - ^{7}Be +p→^{8}B учун $E=E_i$ (i=1,2, … N) да топилган АНК экспериментал қийматлари келтирилган. Тўғри чизиқ ва тасма кенглиги орқали АНК нинг ўртача қиймати ва уни топиш хатолиги берилган. Ўнгда - ^{7}Be$(p,\gamma)^8$B реакция учун ҳисобланган астрофизик S – фактор $S(E)$ нинг қийматлари келитирилган. Узлуксиз эгри чизиқ ва тасма кенглиги астрофизик S – факторнинг ўртача қиймати ва уни топиш хатолигини билдиради, пунктир чизиқлар ва штрих чизиқлар [Phys. Rev. C 70, 065802 (2004)] ишда

Белгия олими P. Descouvemont томонидан микроскопик ҳисоблаш доирасида *NN* - потенциалларнинг Волков(V2) ва Минессота(MN) турлари учун олинган натижалар; тасма – бизнинг натижаларимиз (тасма кенгли усул хатолигини аниқлайди); икки нуқтали пунктирлар– G. Tabacaru, ва бошқ.[Phys.Rev. C73 (2006)025808] ҳамда H. M. Xu, ва бошқ.[Phys. Rev. Lett. 73, 2027 (1994)] томонидан ҳисобланган натижалар. Эксперимент натижалар A. R. Junghans, ва бошқ.[Phys. Rev. Lett. 88, 041101 (2002)] ҳамда L. T. Baby, ва бошқ [Phys. Rev. C67 (2003) 065805] ишларидан келтирилган.

ва 20 кэВ (гамов пики) лардаги қийматлари $t(\alpha,\gamma)^7$Li реакция учун $S(0)$ = 0.0974±0.010 кэВ·бн и S(20 кэВ) = 0.0944±0.010 кэВ·бн, ^{7}Be(p, γ)^{8}B реакция учун $S(0)$ = 23.35±0.65 эВ·бн и S(20 кэВ) = 22.65±0.63 эВ·бн тенг бўлди. Олинган натижалар илмий адабиётларда берилган бошка натижалар билан солиштирилган.

1 - расмда ^{7}Be(p,γ)^{8}B реакция учун $(C_i^{\exp})^2$ олинган қийматлари ва ҳисобланган $S(E)$ натижалари бошқа манбалар билан солиштирилгандаги ҳолати келтирилган.

Бошқа муаллифларнинг $t+\alpha\rightarrow^7$Li ва ^{7}Be + $p\rightarrow^8$B лар учун АНК, $t(\alpha,\gamma)^7$Li ва ^{7}Be(p, γ)^{8}B лар учун астрофизик S- факторларнинг ўта қуйи энергияларда олган натижаларини критик қиёсий таҳлили асосида шундай хулосага келиндики, ушбу ишда тақдим этилган $S^{\exp}(E_i)$ замонавий прецизион эксперимент натижаларини моделга таалуқсизлик йўли билан таҳлил қилиш доирасида олинган натижалар энг аниқ натижалар ҳисобланади.

Диссертациянинг “**Зарядланган заррачани узатиш механизмининг уч заррачали динамикаси ва бузилган тўлқинлар умумлашган модификацияланган усули**” номли иккинчи бобида уч танали Шредингер формализми доирасида A(x, y)B (x= y + a, B= A + a, бу ерда – узатилаётган заррача) зарядланган заррачани узатиш периферал реакцияси амплитудаси (M^{TB}) ифодаси олинган. M^{TB} амплитудаси ўтиш операторида узатиш бош механизми ҳиссаси, қайсики оралиқ ҳолатда мавжуд барча уч заррачали (A, a ва y) қайта кулон сочилишларни ўз ичига олади, ($\Delta V_{i,f}^C$) кулон қутбланган потенциали бўйича қаторга ёйилмасининг барча тартибдаги (нолинчи, биринчи ва юқори) ҳадлари яқинлаштирилган ҳолда ҳисобга олинади. Бунда бошланғич ва сўнги ҳолатлардаги мавжуд кулон - ядровий бузилишлар таъсири оптик модел доирасида кўриб чиқилади. M^{TB} амплитудани модификацияланган бузилган тўлқинлар усули (МБТУ) доирасида олинган амплитудаси деб олиб, y + $a \rightarrow$ x ва A + $a \rightarrow$ B каналлар АНК (C_{Aa} ва C_{ya}) орқали параметрланган ҳолатда ёзиш мумкин. M^{TB} амплитуданинг cosθ ўзгарувчи бўйича аналитик хоссаларидан келиб чиқиб, бурчак тақсимот бўйича бош максимум учун дифференциал кесим (ДК) ифодаси қуйидаги кўринишда олинди:

$$\frac{d^{TB}\sigma}{d\Omega} = \left|R_a\right|^2 C_{Aa}^2 C_{ya}^2 R_{post}^{DBWA}\left(E_i,\theta;b_B,b_x\right) . \qquad (1)$$

Бу ерда R_a - уч заррачали кулон қайта нормировкалаш фактори (УЗККҚНФ) ва $R_{post}^{DBWA}(E_i,\theta;b_B,b_x)$ – бузилган тўлқинлар усули (БТУ) ($\Delta V_{i,f}^{C}$=0) “post”-яқинлашишда ҳисобланадиган ДК, бунда E_i – тўқнашаётган ядролар нисбий кинетик энергияси, θ – массалар маркази саноғида олинган сочилиш бурчаги, b_B, ва b_x - x ва B ядролар ((y + a) ва (A + a)) - боғланган ҳолатлар бир заррачали АНК. (1) да УЗККҚНФ R_a ифоданинг ўнг томонида пайдо бўлишига бошланғич ва сўнги ҳолатларда уч заррали кулон эффектларини яқинлаштирилган ҳолда ҳисобга олиш сабабдир.

Мазкур бобда ^{3}He-ионларининг ^{6}Li, ^{12,13}C ва ^{14}N ядролари билан барьер усти энергияларда бомбардимон қилганда сўнги ядронинг боғланган ва бўсаға ости ҳолатларига протон узатиш периферал реакциялари ДК экспериментал қийматларини таҳлили натижалари келтирилган. (1) ифодадаги эркин параметрлар бўлмиш b_B ва b_x (x=^{3}He) ларини вариация қилиш орқали АНК (C_{Ap}^2) ни аниқлашнинг моделга таалуқсиз йўлини топиш шарт - шароитлари муҳокама қилинган. АНК (C_{Ap}^2) нинг янги қийматлари аниқланган, уч заррачали кулон эффектларининг таъсири миқдорий баҳоланган. Кўрсатилдики, уч заррачали кулон эффектларининг олинаётган АНК қийматига таьсири сезиларли бўлиб, 26% - 50% ($|R_a|^2$=1.26 – 1.50) ораликда ҳосил бўлаётган ядро турига қараб ўзгариши мумкин. Таҳлиллар БТУ “post”-яқинлашишни, уч заррачали кулон эффектларини ҳисобга олмасдан, протон узатиш перифериал реакцияларини таҳлил қилиб, A + $p\rightarrow$ B АНК нинг ишончли қийматларини олишга ишлатиш яроқсиз эканлигини кўрсатди.

Диссертациянинг **“Резонансли радиацион қамраш реакцияси учун R – матрица усули”** номли учинчи бобида қуйи энергияларда B* резонанас ҳолат орқали борадиган A(a,γ)B радиацион қамраш реакциясини ифодалашнинг модификацияланган R – матрица усулининг асосий ғояси ва бандлари баён этилган. Оралиқ ҳолатда B* резонанс орқали борадиган A + a $\rightarrow$ B*$\rightarrow$ B + γ реакция механизмига жавоб берадиган $M_{\alpha\beta}^{(R)}(E)$ қутбий амплитуданинг ички ($0\le r \le r_C$, r_C – канал радиуси) ички соҳадаги ҳиссасини аниқлаш учун бир сатхли R – матрицали якинланиш ишлатилган.

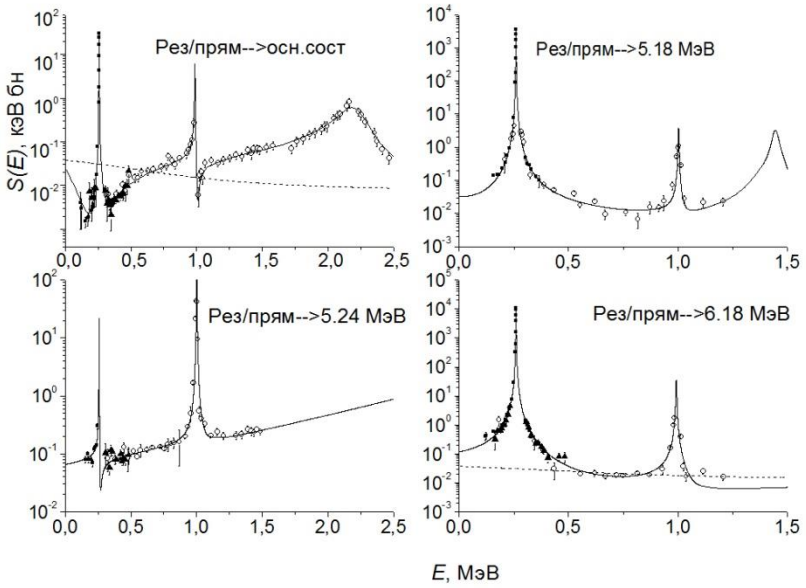
Қутбий амплитуда $M_{\alpha\beta}^{(R)}$ (E) $E_\lambda^{(R)}$ резонанс энергияси, B*$\rightarrow$ A + a ва B*$\rightarrow$ B + γ парчаланишларга мос равишда $\Gamma_\alpha^a(E)$ ва $\Gamma_{\lambda;\beta}^{\gamma}(E)$ лар парциал a заррача ва радиацион (γ-) резонанс кенгликлари оркали тавсифланади. Бу ерда α= (l_i I J_i) ва β= (L J_i J_f) –квант сонларининг жамламаси, l_i , I, L ва J_i (J_f) - мос равишда a заррачанинг орбитал моменти, канал спини, электромагнит (EL- ва ML-) ўтиш мултиполлиги ва B ядроси резонанс (боғланган) ҳолатининг спини. Радиацион парциал кенглиги ($\Gamma_{\lambda;\beta}^{\gamma}(E)$) иккита қўшилувчиларга ажратилади: $[\Gamma_{\lambda;\beta}^{\gamma}(E)]^{1/2}$= $[\Gamma_{\lambda;\beta}^{\gamma}(E)]_{\rm int}^{1/2}$+$[\Gamma_{\lambda;\beta}^{\gamma}(E)]_{ext}^{1/2}$, бу ерда $[\Gamma_{\lambda;\beta}^{\gamma}(E)]_{\rm int}$ ва $[\Gamma_{\lambda;\beta}^{\gamma}(E)]_{ext}$ – мос равишда радиацион парциал кенгликнинг ички ($0\le r \le r_C$) ва ташқи (a - канал) ($r > r_C$) қисмлари. Бу кенгликлар мос ҳолда

келтирилган парциал кенгликларга ($\gamma^{\gamma}_{\lambda;\beta}$ (*int*) ва $\gamma^{\gamma}_{\lambda;\beta}$ (*ext*)) пропорционал боғланган бўлиб, қўшимча Томас энергетик силжишини ҳам ўз ичига олади. Ҳисобларда $\gamma^{\gamma}_{\lambda;\beta}$ (int) мослаштирувчи параметр деб олинади, $\gamma^{\gamma}_{\lambda;\beta}$ (ext) эса A + $a \rightarrow$ B АНК си билан параметрланган аниқ аналитик ифода оркали ҳисобланади. a заррача ва γ-радиацион кенгликлар экспериментал кийматлари мос равишда $\Gamma^{\exp}_{a;\alpha} = |\Gamma^{a}_{\alpha}(E^{(R)}_{\lambda})|$ и $\Gamma^{\exp}_{\gamma;\beta} = |\Gamma^{\gamma}_{\lambda;\beta}(E^{(R)}_{\lambda})|$ каби аниқланади. Амплитуданинг тўғри радиацион қамраш қисми қуйида берилган:

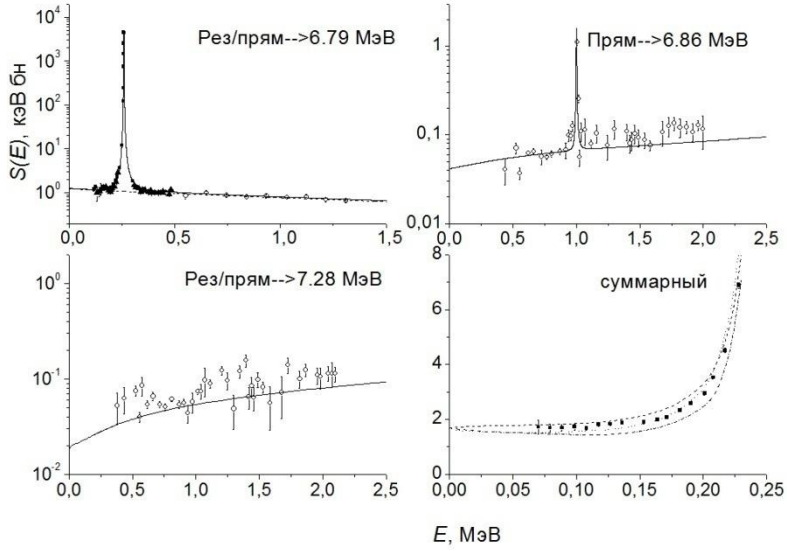
$$I_{l_f L l_i} = C_{Aa;l_f I} \int_{r_{ch}}^{\infty} dr r^{L-\nu} W_{-\eta_f;l_f+1/2}(2\kappa r)[I_{l_i}(r) - e^{2i\delta^{(HS)}_{l_i}} O_{l_i}(r)] , \qquad (2)$$

бу ерда $I_l(r)$ ($O_l(r)$) – Aa - сочилиш кириш (чиқиш) тўлқинларининг асимптотикалари, ν = 0 (1) *EL* (*ML*) – ўтишлар учун, к – a заррачанинг B ядро бағридаги ҳаракатининг тўлқинлар сони ва $C_{Aa;l_f I}$ - A + $a \rightarrow$B АНК си, ($\delta^{(HS)}_{l}$) –ўтиб бўлмас сферада сочилиш фаза силжиши. (2) да АНК $C_{Aa;l_f I}$ тўғри радиацион қамраш амплитудасининг реакция тўлиқ амплитудасидаги ҳиссасини фиксирлайди. Умум спин кинематикасида резонансли радиацион қамраш реакцияси астрофизик S – фактори учун яққол ифодаси олинган.

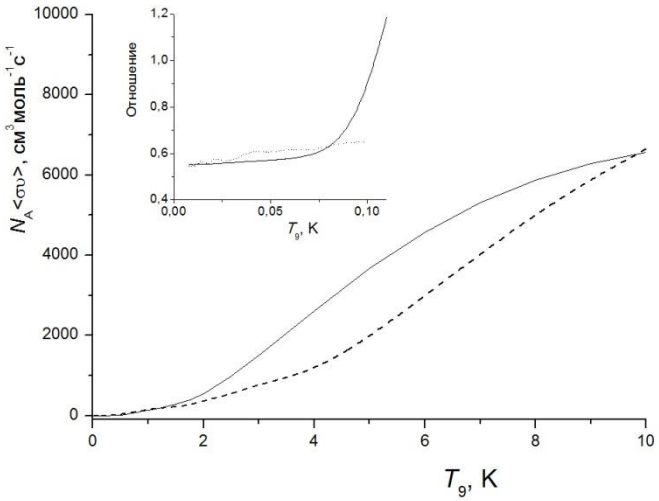
Қуйи энергияларда протоннинг ^{6}Li, ^{12,13}C ва ^{14}N ядролари томонидан қамралиш реакцияси астрофизик S-факторлари экспериментал қийматларни модификацияланган R-матрицали усул доирасида таҳлили натижалари келтирилган. Таҳлил диссертациянинг иккинчи бобида олинган A + $p \rightarrow$ B АНК нинг қийматларини фойдаланиб амалга оширилди, протон парциал кенгликлар қийматлари бошқа ишлардан олинди. r_C ва $\gamma^{\gamma}_{\lambda;\beta}$ (*int*) (ёки $\Gamma^{\exp}_{\gamma;\beta}$) мустақил параметрлар бўлиб, уларнинг қийматлари ҳисобланаётган астрофизик S – факторларининг эксперимент натижаларига χ^2 усул ёрдамида мослаштириш орқали аниқланади. Шу йўсинда γ-радиацион кенглик $\Gamma^{\exp}_{\gamma;\beta}$, ва тўғри радиацион қамраш амплитудаларининг қийматлари аниқланди. $0 \leq E \leq$ 50 кэВ энергияларда реакциянинг тўғри радиацион қамраш қисмининг доминантлиги кўрсатилган. Мисол тариқасида 2-, 4- расмларда қуйи энергияларда ^{14}N(p, γ)^{15}O реакция ва унинг $0.01 \leq T_9 \leq 10$ ҳароратларда тезлигининг таҳлил натижалари келтирилган. Олинган натижалар бошқа муаллифларнинг натижалари билан солиштирилган. Илмий таҳлиллар асосида қуйидаги янги қийматлар тақдим этилган: ^{12}C(p,γ)^{13}N реакция учун - S(0)= 1.62±0.20 кэВ бн ва S(25 кэВ)= 1.75±0.22 кэВ бн, ^{13}N (2. 365 МэВ) $\rightarrow$ ^{12}N(осн.) + γ радиацион кенглиги $\Gamma^{\exp}_{\gamma;\beta}$=0.65±0.07 эВ; ^{14}N($p$,$\gamma$)^{15}O реакция учун - S(0)= 1.13 кэВ бн ва юлдузлар бағрида водороднинг ушбу реакция орқали ёниши, аслида умум қабул қилинганидан яна 1.8 марта сустроқ кечади; ^{6}Li(p,γ)^{7}Be реакция учун - S(0)=70.2±12.0 эВбн, парциал протон резонанс кенглики $\Gamma_p \approx$50 кэВ.



2 – расм. ^{15}O ядросининг қуйи тўрта боғланган ҳолатларга ўтиш астрофизик S-факторлари. Эксперимент натижалари (квадратчалар) [G. Imbriani et al.,Eur.Phys.J.A25, 455 (2005)], (учбурчакчалар) [R. C. Runkle et al., Phys. Rev. Lett. 94, 082503(2005)] ва (доирачалар) [U. Schr¨ oder et al.,Nucl.Phys.A467, 240 (1987)] ишлардан келтирилган. Чизиқлар – биз ҳисобланган натижалар: узлуксиз чизиқ–тўлик астрофизик S-фактор; штрих чизиқ - тўғри радиацион қамраш астрофизик S-фактори.



3 - расм. ^{15}O ядросининг қуйи тўрта боғланган ҳолатларга ўтиш астрофизик S-факторлари. Эксперимент натижалари (квадратчалар) [G. Imbriani et al.,Eur.Phys.J.A25, 455 (2005)], (учбурчакчалар) [R. C. Runkle et al., Phys. Rev. Lett. 94, 082503(2005)] ва (доирачалар) [U. Schr¨ oder et al.,Nucl.Phys.A467, 240 (1987)] ишлардан келтирилган. Чизиқлар – биз ҳисобланган натижалар: узлуксиз чизиқ–тўлиқ астрофизик S-фактор; штрих чизиқ - тўғри радиацион қамраш астрофизик S-фактори. Йиғинди астрофизик S – факторнинг экспериментал қийматлари (•) [A. Lemutet al., Phys. Lett. B634, 483 (2006)] ишдан келитирилган; штрих, пунктир ва штрих пунктир чизиқлар мос равшида [A. M. Mukhamedzhanov, P. Bem, B. A. Brown,et al.,Phys. Rev. C67, 065804 (2003)., A. Lemutet al., Phys. Lett. B634, 483 (2006); R. C. Runkle et al., Phys. Rev. Lett. 94, 082503(2005).] иш натижалари.



4 - расм. $^{14}N(p,\gamma)^{15}O$ реакция тезлиги. Узлуксиз чизиқ – бизнинг натижамиз, штрих чизиқ - [C.Angulo, M.Arnould et all., Nucl.Phys**. A656**, 3 (1999)] натижаси. Қўшимча расмда ушбу ишда олинган (узлуксиз чизиқ) ва [A. M. Mukhamedzhanov, P. Bem, B. A. Brown,et al.,Phys. Rev. C67, 065804 (2003)] да олинган натижаларнинг (пунктири чизиқ) [C.Angulo, M.Arnould et all., Nucl.Phys**. A656**, 3 (1999)] маълутомлар базасидан келтирилган натижаларга нисбати келтирилган.

Диссертациянинг “**Оғир ядро ^{208}Pb нинг кулон майдонида ^{6}Li $\rightarrow$ *d* + α парчаланиши, *d* + α$\rightarrow^6$Li учун асимптотик нормировка коэффициенти ва ўта қуйи энергияларда *d*(α, γ)^{6}Li ядровий – астрофизик реакцияси**” номли тўртинчи бобида ^{208}Pb(^{6}Li, *d*α) ^{208}Pb кулон парчаланиш реакциясини уч заррачали усул доирасида ифодалаш орқали *d* + α$\rightarrow^6$Li нинг АНК сини экспериментал қийматларини аниқлаш таклиф этилган. Уч танали модел доирасида (*d*, α ва ^{208}Pb) кулон парчаланиш ^{208}Pb(^{6}Li, *d*α) ^{208}Pb реакцияси матрица элементи ифодаси олинган. Бунда (*d*, α ва ^{208}Pb) уч тана қутбланган потенциалига тўғри келадиган $\Delta V_f^C(\boldsymbol{r},\boldsymbol{\rho})$ ўтиш оператори сўнги ҳолат уч заррачали кулон тўлқин функцияси (УЗКТФ) $\Psi_{k;p}^{(-)*}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{\rho})$ ва ^{6}Li ядросининг (*d* + α) канал учун қопланиш интеграли $I_{\alpha d}$ (***r***) билан свертка килинади, бунда ***r*** (***ρ***) – дейтрон ва α- заррача масса марказларини ^{208}Pb ядроси билан туташтирувчи радиус-вектор ва ***k***(***p***) - уларга тиркалган импульс. Реакция матрица элементини ушбу ишда ҳисоблашда иккита яқинлашиш, П1 ва П2 қўлланилган. П1 яқинлашишда снаряд ^{6}Li Резерфорд траекторияси бўйича ҳаракатланади. Мос равишда матрица элементидаги ρ ($\rho_{\min} \le \rho < \infty$) бўйича радиал интеграллашда қуйи чегара ($\rho_{\min}$) классик мўлжал параметрига b ($b \le \rho < \infty$, $b = Z_{Li}Z_{Pb}e^2 ctg(\theta/2)/2E$) га тенг деб олинади, Z_A – А нуклид заряди, E – тўкнашаётган ядролар нисбий кинетик энергияси, θ - кулон сочилиш бурчаги. П2 яқинлашишда ^{6}Li ядронинг *d* ва α- заррачага парчаланиши (ρ_N) каттароқ масофаларда, яъни $\rho > \rho_N$ масофаларда юз беради деб қаралади. Бу яқинлашишда $\rho_{\min}$ қиймати бошка авторлар томонидан қўлланилган $\rho_{\min} = \rho_N + \pi Z_{Li}Z_{Pb}e^2/4E < b$ ифодадан аниқланади, бунда $\rho_N = r_0(6^{1/3} + 208^{1/3})$ ва $r_0 = 1.36$ Фм деб олинган. Иккала яқинлашишда матрица элементидаги УЗКТФ

$\Psi^{(-)*}_{k;p}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{\rho})$ ва қопланиш интеграли $I_{\alpha d}(\boldsymbol{r})$ ининг радиал қисмларини кўрилаётган кинематика учун ($r/\rho<<1$) асимтотик ифодалари билан алмаштириш мумкин бўлади. УЗКТФ асимптотикасининг қўлланиши кўп зарядли ^{208}Pb – ион кулон майдонининг парчаланишда ҳосил бўлган фрагментларнинг нисбий ҳаракатига таъсирини ифодалайдиган уч заррачали “post acceleration” кулон эффектини хисобга олишга йўл очиб беради. Шуни айтиб ўтиш жоизки, “post acceleration” эффекти - бу экспериментда реакция натижаларининг фрагментлар нисбий тезлигига боғлиқлик графигининг фрагментлар жойини алмашганда яққол кўзга ташланадиган ассиметрияси кўринишдаги физик ҳодисадир. Бунга сабаб, кўп заряди кулон майдонида зарядининг массасига нисбати турлича булган фрагментлар турлича тезланишади. Бу ҳодиса ушбу кулон майдони мўлжал ядронинг ядровий тортиш таъсиридан қанчалик ҳолис бўлса, шунчалик яққкол амалга ошади. П1 якинлашишда “post acceleration” эффекти эксперимент кинематикасининг қанчалик тоза кулон парчаланиш (ТКП) га жавоб беришлигининг асосий шарти қилиб олинган.

УЗКТФ нинг ишлатилиши реакция уч каррали дифференциал кесимини (УКДК) қуйидаги параметрланган кўринишда олишга имкон беради:

$$\frac{d^3\sigma}{d\Omega_{Li}d\Omega_{\alpha d}dE_{\alpha d}} = C^2_{d\alpha}\,\frac{d^3\tilde{\sigma}}{d\Omega_{Li}d\Omega_{\alpha d}dE_{\alpha d}}\ , \qquad (3)$$

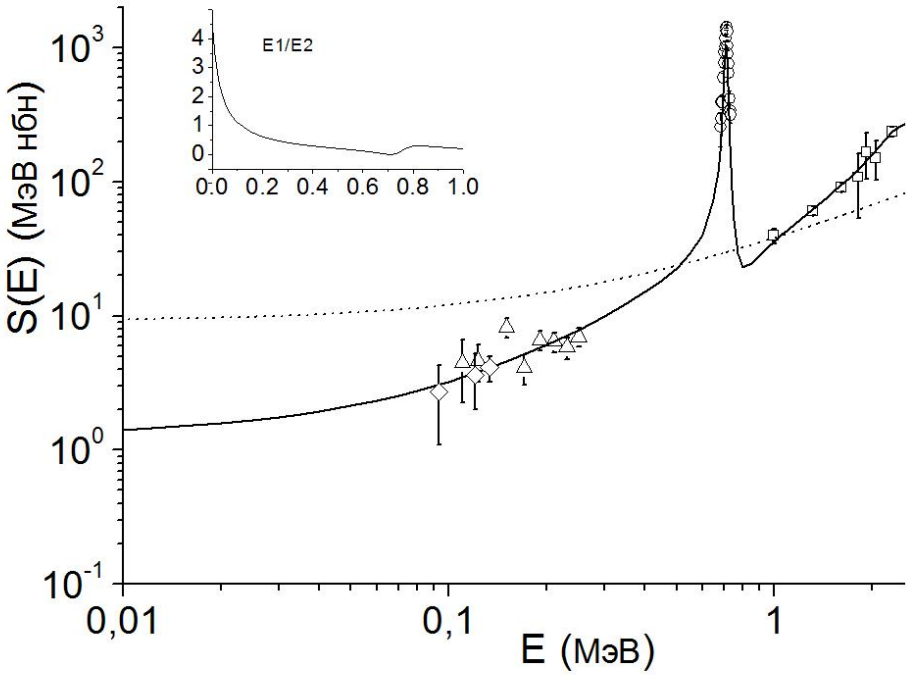
бу ерда $C_{\alpha d}$ - ^{6}Li ядросининг s - ҳолатдаги $d + \alpha \rightarrow {}^6$Li АНК си, $d^3\tilde{\sigma}/d\Omega_{Li}d\Omega_{\alpha d}dE_{\alpha d}$ - ҳиобланадиган келтирилган УКДК, қайсики фиксирланган сочилиш бурчагида фақат фрагментларнинг нисбий кинетик энергияси, $E_{\alpha d}$ га боғлиқ ўзгаради. Ифода (3) чап томонига УКДК нинг экспериментал қийматларини қўйиш орқали АНК нинг экспериментал қийматларини аниқлаш учун қўллаш имконини беради.

П1 яқинлашишдаги $E_{\rm Li}$ = 156 МэВ ва $\theta = 4^o$ кинетматика учун (b=33.4 Фм) ҳисобланган УКДК қийматлари ва ҳар бир эксперимент энергиялари учун олинган АНК нинг экспериментал қийматлари ва уларнинг экспериментал натижалар билан таққосланган келтирилган. Таҳлил натижалари ушбу реакция кинематикасининг ТКП шартига тўлиқ жавоб беришлигини кўрсатди. АНК нинг ўртача қиймати $(C^{\rm exp}_{\alpha d})^2 = 6.72\pm0.73$ Фм$^{-1}$ тенг деб аниқланган. Бу қиймат адабиётларда қуйи энергияларда $d\alpha$-сочилиш фазасини ўлчаш орқали топилган $(C^{\rm exp}_{\alpha d})^2 = 5.37\pm0.26$ Фм$^{-1}$ қийматдан фарқли бўлиб чиқди. П1 якинлашиш $\theta = 3^o$ учун олинган УКДК нинг экспериментал кийматларини таҳлили учун ҳам қўлланилди. Таҳлилий ҳисобларга кўра ушбу кинематика УКДК бўйича олинган экспериментал маълумотлар ТКП шарт – шароитида олинмаган бўлиб чиқди. Оқибатида олинган АНК экспериментал қиймати $\theta = 4^o$ кинематика учун олинган қийматдан анча фарқли бўлиб чиқди. Ушбу бобда П2 яқинлашиш доирасида $\theta = 3^o$ бурчак учун олинган натижалар ҳам келтирилган. Ҳисоблар шуни кўрсатдики, ушбу кинематика учун, қайсики, снаряд ядронинг парчаланиши

унинг мўлжал ядро билан ядровий ўзаро таъсир чегарасида ($\rho_{\min}$ = 12.4 Фм) юз берганда, етарлича тор энергия оралиғида (107 ≤ $E_{\alpha d}$ ≤ 250 кэВ) d ва α фрагментлар ўзаро нисбий ҳаракатига ушбу таъсирни ҳисобга олмаса бўлар экан. Бироқ $E_{\alpha d}$ ошиб борганда ушбу таъсирнинг ҳиссаси ҳам ошиб борар экан.

П2 яқинлашиш доирасида олинган таҳлил натижалари ҳам келтилган. 107 ≤ $E_{\alpha d}$ ≤ 250 кэВ оралиқдаги ҳар бир экспериментал энергиялар учун АНК нинг қийматлари аниқланди. Уларнинг ўртача қиймати $(C_{\alpha d}^{\exp})^2$ =5.24±0.51 Фм$^{-1}$ га тенг деб аниқланди. Бу қиймат юқорида келтирилган бошқа муаллифлар олган натижага жуда мос келди. Шундан келиб чиқиб, кулон парчаланиш реакцияси матрицавий элементига $\rho_{\min} \leq \rho \leq b$ интервалнинг ($\rho_{\min}$ = 12.4 Фм, b= 33.4 Фм) ҳиссасини ҳисобга олган ҳолда $E_{\alpha d}$ энергиянинг тор оралиғида АНК нинг ишончли қийматларни олиш мумкин экан.

Ушбу бобда П1 ва П2 якинлашларда олинган АНК қийматлардан фойдаланиб, ўта қуйи энергияларда $d(\alpha,\gamma)^6$Li реакцияси астрофизик S – факторининг ҳисоблаш натижалари ҳам келтирилган. Бу ҳисоблар иккинчи бобда ривожлантирилган модификацияланган R- матрицали усул доирасида E1- ва E2- мултиполларни инобатга олган ҳолда амалга оширилди. Ушбу бобда астрофизик S – факторни тўғридан – тўғри ўлчашлар орқали олинган тўрта энергияда: $E_{\alpha d}$ =80, 93, 120 ва 134 кэВ (D. Trezzi, M. Anders, M. Aliotta *et al.* Astroparticle Physics 89(2017), pp.57–65) олинган сўнги натижалар ҳам келтирилган. Ҳисоб натижалари экспериментал маълумотлар билан яхши мос келган.



5- расм. $d(\alpha,\gamma)^6$Li радиацион қамраш реакцияси астрофизик S-фактори.

Нуқталар:учбурчаклар – θ = 3º га сочилиш УКДК эксперимент натижаларидан топилган бизнинг натижамиз; ромбчалар – [D. Trezzi, M. Anders, M. Aliotta *et al.* Astroparticle Physics 89(2017), pp.57–65]; квадратчалар –[R. G.H. Robertson, *et al*. // Phys. Rev. Lett.- American Physical Society,1981.- Vol.47.-pp. 1867-1893];доирачалар – [P. Mohr, V. Kolle, S. Wilmes, *et al*., Phys. Rev. C 50, 1543 (1993)]. Эги чизиқлар: узлуксиз –АНК нинг $C_0^2(3^o) = 5.24 \pm 0.51$ Фм$^{-1}$ қиймати билан ҳисобланган; штрихланган – [J. Kiener, H. J. Gils, *et al*., Phys. Rev. C 44, 2195 (1991)] иш натижаси. Иловада радиацион қамраш жараёнидаги *E1*– ва *E2*–мултиполли ўтишлар ҳиссалари нисбатлари келтирилган.

^{6}Li ядроси биринчи (3/2$^-$, 0.71 МэВ) резонанс ҳолатига α-канал ва γ-радиацион резонанс кенгликларининг қийматлари аниқланган. Бу қийматлар бошқа авторлар адабиётларла келтирган натижалари билан мос келди. 5 – расмда $d(\alpha,\gamma)^6$Li тўғри қамраш реакцияси астрофизик S – факторининг топилган экспериментал қийматлари ва унинг ўта паст энергиялар соҳасига экстраполяцияси келтирилган.

“(^{12}B,^{12}N) акс ядролар (^{11}B + *n*) ва (^{11}C+ *p*) конфигурациялари учун тўлқин функцияларнинг қоплаш интегралларини ҳамда ^{11}B + *n*→^{12}B ва ^{11}C+ *p* →^{12}N АНК ларини микроскопик ҳисоблаш усули” номли бешинчи бобда “(^{12}B,^{12}N) акс ядролар (^{11}B + *n*) ва (^{11}C+ *p*) конфигурациялари учун қоплаш интегралларини ҳамда ^{11}B + *n*→^{12}B ва ^{11}C+ *p* →^{12}N АНК ларини ^{11}C ва ^{11}N ядроларининг қобиклар моделида олинган кўп заррачали тўлқин функциялари ёрдамида микроскопик ҳисоблаш усули ривожлантирилган.

Қоплаш интеграли радиал қисми $I_{lj}(r)$ нинг турли кўринишдаги самарали NN потенциаллар учун иккинчи тартибли бир жинсли бўлмаган дифференциал тенгламаси олинган, бунда l ва j – ^{11}B /^{12}N ядролардаги “валент” нейтрони/протонининг орбитал ва тўла бурчак моментлари (l =1, j=1/2 ва 3/2). A + N→B (^{12}B ёки ^{12}N) АНК си учун яққол ифодаси олинган. АНК ифодасини олишда ^{11}B ва ^{12}B ҳамда ^{11}C ва ^{12}N ядроларнинг трансляцион инвариант тўлқин функцияларининг ^{11}B ва ^{11}C ўзак нуклонларини орасидаги антисимметризацияни ҳисобга оладиган осциллятор қобиқ модели базис ҳолатлари $|AN_{min}[f](\lambda\mu)\beta LST>$ бўйича ёйилмаси қўлланилган. ^{11}B + n→ ^{12}B ва ^{11}C + p→ ^{12}N АНК (C_{lj}) лари, ^{12}B ва ^{12}N ядроларининг (^{11}B + n)- ва (^{11}C + p)-конфигурациялари учун ўртача квадратик радиус (у.к.р.) ($<r^2>^{1/2}$), спектроскопик фактори (СФ) (Z_{lj}) NN потенциалларнинг 6 та тури, - иккита Волков потенциали (V1 ва V2), тўрта M3Y (M3Y(R), M3Y(HJ), M3Y(P) ва M3Y(E)),- учун ҳисоблаб топилди. Олинган натижалар келтирилган. Шу нарса аниқландики, C_{lj}, $<r^2>^{1/2}$ ва Z_{lj} ларнинг ҳисобланган қийматлари NN – потенциалларнинг турига жиддий сезгир экан. Шунга карамай, акс (^{12}B,^{12}N) ядроларнинг АНК ларининг нисбатлари қўлланилаётган самарали NN потенциалларнинг турига деярли бефарк (10% чегарада) бўлиб чикди, ^{11}B + n→ ^{12}B ва ^{11}C + p→ ^{12}N АНК ларининг абсолют қийматларига келсак, бошка авторлар томондан аниқланган АНК нинг экспериментал қийматларига энг яқин натижани M3Y(E) потенциали берди. Шу сабаб, мазкур потенциал (^{12}B,^{12}N) ядроларнинг (^{11}B + n) - ва (^{11}C+ p) – конфигурациялари СФ ларини ҳисоблаш

учун ишлатилди. ^{12}B ядроси учун ҳисобланган СФ унинг экспериментал қийматидан 28 % га кам чикди. Бундай фарқ сабаблари ўрганилаяпди. Самарали МЗУ(Е) NN - потенциали учун олинган АНК нинг ёрдамида ^{11}C(p,γ)^{12}N тўғри радиацион қамраш реакцияси астрофизик S - факторининг E=0 энергиядаги S(0) қийматлари аниқланди. Бунда олинган натижалар бошқа авторлар томонидан ^{12}N ядросининг ^{11}C ва p фрагментларга кулон парчаланиш экспериментидан олган S(0) қийматларидан деярли уч марта катта булиб чикди. Бундай фарқнинг сабаблари ўрганилаяпди. Кулон парчаланиш реакциясини ифодалашда, 4 - бобда караб чиқилган "post acceleration" эффектларининг таъсирининг ҳисобга олинмаётгани шундай фарқга олиб келиши мумкин.

ХУЛОСА

"Ўта паст энергияларда ядровий – астрофизик радиацион қамраш реакцияларини ҳисоблашнинг модификацияланган икки ва уч заррачали усуллари" мавзусидаги докторлик диссертацияси бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижаси юзасидан қуйидаги хулосалар тақдим этилади:

1. Қуйи энергияларда A(a,γ)B тўғри радиацион қамраш ядровий - астрофизик реакциясини ифодалаш учун янги модификацияланган икки заррачали потенциал усули (МИЗПУ) ишлаб чиқилди. Ушбу усул a+A→B учун АНК нинг экспериментал қийматларини ва A(a,γ)B реакция астрофизик S–факторининг гамов пики энергияларидан то E=0 гача экстраполяцион қийматларини аниқлаш имконини беради.

2. МИЗПУ доирасида t(α,γ)^{7}Li ва ^{7}Be(p,γ)^{8}B тўғри радиацион қамраш реакциялари астрофизик S–факторларининг қуйи энергияларда прецизион аниқланган экспериментал қийматларининг таҳлили амалга оширилди. Таҳлил натижасида бу реакциялар перифериялы реакциялар эканлиги миқдорий жиҳатдан асослаб берилди.

3. α+t→^{7}Li(aсос), α+t→^{7}Li(0.478 МэВ) ва ^{7}Be + p → ^{8}B лар учун АНК нинг экспериментал қийматлари ҳамда t(α,γ)^{7}Li ва ^{7}Be(p,γ)^{8}B тўғри радиацион камраш реакциялари астрофизик S – факторларининг ўта қуйи энергиялардаги экстраполяцион қийматлари аниқланди.

4. Бошланғич, оралиқ ва сўнги ҳолатлардаги уч заррачали кулон эффектларини якинлаштирилган холда ҳисобга оладиган зарядли заррачани узатиш периферал барьер усти A(x, y)B (x= y + a, B= A + a, бунда a – узатма заррача) реакцияларининг ифодалашнинг модификацияланган бузилган тўлқинлар усули (МБТУ) ривожлантирилди.

5. ^{6}Li(^{3}He,d)^{7}Be, ^{13}C(^{3}He,d)^{14}N ва ^{14}N(^{3}He,d)^{15}O узатиш реакцияларининг ^{3}He- ионининг ҳар хил энергиялардаги экспериментал дифференциал кесимлари МБТУ доирасида таҳлил қилинди ва бурчак тақсимотининг бош максимуми атрофи бурчакларида мазкур реакцияларнинг перифериал эканлиги кўрсатиб берилди. Протон узатиш механизмидаги уч заррачали

кулон эффектларининг ^{6}Li + $p \rightarrow {}^{7}$Be, ^{13}C+ $p \rightarrow {}^{14}$N и ^{14}N + $p \rightarrow {}^{15}$O лар учун АНК нинг экспериментал қийматлари ва уларнинг хатоликларини аниқлашдаги таъсири баҳоланди.

6. A(a,γ)B резонанс радиацион қамраш ядровий–астрофизик реакциясини ифодалашнинг резонанс ва тўғри радиацион қамрашлар ҳиссаларини, амплитуданинг тўғри қисмига A + $a \rightarrow$ B АНК си хакидаги маълумот киритиш орқали аниқ ҳисобга олган ҳолда модификацияланган R – матрицали усули ривожлантирилди.

7. Ривожлантрилган модификацияланган R – матрицали усули доирасида ^{6}Li(p,γ)^{7}Be, ^{12}C(p, γ)^{13}N, ^{13}C(p,γ)^{14}N ва ^{14}N(p,γ)^{15}O реакцияларнинг қуйи энергиялардаги экспериментал астрофизик S- факторлари ^{6}Li + $p \rightarrow {}^{7}$Be, ^{12}C+ $p \rightarrow {}^{13}$N, ^{13}C+ $p \rightarrow {}^{14}$N ва ^{14}N+$p \rightarrow {}^{15}$O лар АНК ларининг ёрдамида таҳлил қилинди. Кўрсатилган реакциялар астрофизик S – факторларининг ўта қуйи энергияларда (то E=0 гача) экстраполяцион кийматлари аникланди.

8. ^{13}N ядросининг (E*=2.365 МэВ; J=1/2^{+}) резонанс ҳолати учун радиацион кенглиги янги қиймати аниқланди. Бу қиймат илмий адабиётларда келтирилган қийматдан 1.3 баробар катта бўлиб чиқди.

9. ^{12}C(p,γ)^{13}N ва ^{14}N(p,γ)^{15}O радиацион қамраш реакцияларининг юлдуз ҳароратларидаги ($0.01 \leq T_9 \leq 10$, $T_{9=}$ 10^9 K) тезлиги ҳисоблаб топилди. Маълум бўлдики, массив юлдузлардаги водород ёнишининг CNO циклининг энг суст кечадиган реакцияси бўлмиш ^{14}N(p,γ)^{15}O радиацион қамраш реакцияси, гамов пики атрофи энергияларида аслида 1.8 марта яна ҳам секин кечишлиги аниқланди.

10. ^{208}Pb(^{6}Li, $d\alpha$) ^{208}Pb кулон парчаланиш реакциясини ифодалашнинг уч заррачали усули ишлаб чиқилди. Таҳлил асосида $d+\alpha \rightarrow {}^{6}$Li АНК сининг экспериментал қийматлари ва $d(\alpha,\gamma)^{6}$Li радиацион қамраш реакцияси астрофизик S – факторининг $0.107 \leq E \leq 0.250$ МэВ энергия оралигидаги саккизта экспериментал қийматлари ҳамда $0 \leq E \leq 0.107$ МэВ оралиқ учун экстраполяцион қийматлари аниқланди.

11. (^{12}B,^{12}N) акс-тасвир ядроларнинг (^{11}B + n) - ва (^{11}C + p) – конфигурациялари учун қоплаш интеграллари ҳамда ^{11}B + $n \rightarrow {}^{12}$B ва ^{11}C + $p \rightarrow {}^{12}$N АНК қийматларини кўп заррачали қобиқлар трансляцион инвариант модели доирасида ҳисоблашнинг микроскопик усули ривожлантирилди.

12. ^{11}B + $n \rightarrow {}^{12}$B ва ^{11}C + $p \rightarrow {}^{12}$N АНК, (^{12}B,^{12}N) акс ядролар ички тўлқин функцияларининг қоплаш интеграллари, ўртача квадратик радиуслари ҳамда спектрсокопик факторларининг ҳисобланган қийматлари қўлланилган NN потенциалларнинг турларига (V1, V2, M3Y(E), M3Y(R), M3Y(P) ва M3Y(HJ)) таъсирчан эканлиги кўрсатилди.

13. ^{11}C + $p \rightarrow {}^{12}$N АНК си хамда ўта қуйи энергияларда ^{11}C(p,γ)^{12}N тўғри қамраш реакцияси астрофизик S – фактори қийматлари M3Y(E) локал NN - потенциали учун аниқланди.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ИОННО_ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ИГАМОВ САЙРАМБАЙ БАДАМБАЕВИЧ

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ДВУХ- И ТРЕХЧАСТИЧНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЯДЕРНО-АСТРОФИЗИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ РАДИАЦИОННОГО ЗАХВАТА ПРИ СВЕРХНИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ

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

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА (DSc) ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

Ташкент – 2019

Тема диссертации доктора наук (DSc) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2018.3.DSc/FM33

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.inp.uz) и на Информационно-образовательном портале “Ziyonet” (www.ziyonet.uz).

Научный консультант:	**Ярмухамедов Рахим** доктор физико-математических наук, профессор,
Официальные оппоненты:	**Каноков Зокиржон** доктор физико-математических наук, профессор
	Усманов Пазлитдин Нуритдинович доктор физико-математических наук, доцент
	Олимов Косимов доктор физико-математических наук, профессор
Ведущая организация:	**Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби**

Защита диссертации состоится «____»_____2019 г. в____часов на заседании разового научного совета на базе Научного совета DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий по адресу: (Адрес: 100125, г.Ташкент, ул. Дурмон йули - 33, ИИПиЛТ. Тел.: (+99871) 262-31-69; факс: (+99871) 262-32-54; e-mail: info@iplt.uz).

Диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Института ионно-плазменных и лазерных технологий (регистрационный номер _____), с диссертацией можно ознакомиться в ИРЦ (Адрес: 100125, г.Ташкент, ул. Дурмон йули - 33, ИИПиЛТ. Тел.: (+99871) 262-31-69).

Автореферат диссертации разослан «____» _____ 2019 г.
(протокол рассылки № _____ от _____ 2019 г.).

Х.Б.Ашуров
председатель Научного совета по присуждению учёных степеней, д.т.н., профессор

Д.Т.Усманов
учёный секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской диссертации (DSc))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире надежная оценка скоростей ядерно-астрофизических процессов образования легких элементов в *pp*-цепочки и CNO -цикле, происходящих соответственно в недрах Солнца и массивных звездах является одной из наиболее важных фундаментальных задач современной ядерной астрофизики, в том числе космологии. Решение этой проблемы, в свою очередь, невозможно без знания высокоточных значений сечений (эквивалентная величина - астрофизических *S*-факторов) ядерно-астрофизических процессов образования легких элементов, реакций радиационного захвата A(a,γ)B при сверхнизких энергиях ($E\leq$ 100 кэВ), в том числе в окрестности энергии гамовского пика. В указанной области энергии, в лабораторных условиях, с помощью ныне существующих экспериментальных методик, пока не представляется возможным осуществить экспериментальные измерения сечений реакций. Следовательно, весьма актуальным является разработка теоретических и экспериментальных методик определения сечений реакций радиационного захвата A(a,γ)B с высокой точностью при сверхнизких энергиях.

В настоящее время в мире большое внимание удаляется исследованиям в области ядерной физики низких и сверхнизких энергий. В этом плане удалось создать и развить асимптотическую теорию ядерных процессов при энергиях (10-15 МэВ/N) и сверхнизких энергиях ($E\leq$100 кэВ), а также усовершенствовать современные экспериментальные методики. Основная идея асимптотической теории ядерных реакций основывается на том факте, что сечения поверхностных реакций передачи A(x,y)B (здесь $x\rightarrow y+a$; a+A$\rightarrow$B), реакций радиационного захвата A(a,γ)B при сверхнизких энергиях прямым образом связаны с асимптотическим нормировочным коэффициентом (АНК) волновой функции связанного $A + a \rightarrow B$ состояния. Следовательно, проблема точного определения значений сечений указанных реакций опирается на проблему корректного извлечения из эксперимента экспериментальных значений АНК.

Сегодня в Узбекистане, благодаря разработке и развитию асимптотических методов определения сечений ядерных реакций в области низких и сверхнизких энергий а также применению прецизионных экспериментальных методик, основанных на современных технологиях были получены важные результаты мирового значения. В частности, запуск электронного статистического ускорителя с компьютерной системой управления, предназначенного для проведения научных исследований ядерных реакций на соударениях легких ядер, а также разработка и развитие асимптотических методов анализа экспериментальных данных, полученных учеными крупных научных центров мира, в том числе нашими учеными экспериментаторами послужили получению таких результатов. Дальнейшее улучшение точности полученных результатов, путем усовершенствования экспериментальных методик исследования ядерных реакций, посредсвом

внедрения современных технологий, а также разработки новых теоретических методов извлечения высокоточных экспериментальных значений фундаментальной величины АНК для A + $a \rightarrow$ B и применение их для решения проблем теории структуры легких ядер, современной ядерной астрофизики и космологии является актуальной задачей. В соответствии со «Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг.[1]», наиболее важным является проведение фундаментальных исследований в области физики ядра низких и сверхнизких энергий для определения скоростей различных ядерно-астрофизических процессов, протекающих в недрах Солнца и массивных звезд. Эти исследования непосредственно связаны с проблемами ядерной астрофизики и физики управляемых термоядерных процессов, в том числе ядерной энергетики.

Данная научно-исследовательская работа соответствует задачам, утвержденным в государственных нормативных документах, в Указах Президента Республики Узбекистан за № УП-4512 «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии» от 1-марта 2013 года. № УП-4947 «О Стратегии действии по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021-гг» от 2-февраля 2017-года, Постановлении Президента Республики Узбекистан № УП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию Академии Наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 18 февраля 2017 года.

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

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации. Исследования, по развитию теории структуры ядер и ядерных процессов при низких и сверхнизких энергиях проводятся ведущими мировыми научными центрами и высшими образовательными учреждениями, такими, как Циклотронный институт Университета Техаса (США), Университет Суррей (Великобритания), Ускорительная лаборатория Европейской Коллаборации, Исследовательские ядерные центры университетов Осака и Токио (Япония), Центр экспериментальной ядерной физики и астрофизики (США), ТРИУМФ – Канадский центр ускорителей частиц (Канада), Национальный институт ядерной физики (Катания, Италия), Университет Либре Брюсселя (Бельгия), Институт атомной энергии (Китай), Научно – исследовательский институт ядерной физики (НИИЯФ) Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Россия), Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (Россия), Институт ядерной физики (Казахстан), Институт ядерной физики (Узбекистан), Национальный университет им. Аль-

[1] 2017 йил 07 февральдаги ПФ-4947-сонли “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида” Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони

Фараби (Казахстан) и Астрофизический институт им.В.Г.Фесенкова (Казахстан).

По теоретическому исследованию структуры легких ядер, механизмов поверхностных ядерных процессов передачи и радиационного захвата заряженной частицы при низких и сверхнизких энергиях на мировом уровне получен ряд важных результатов, в том числе: фундаментальные характеристики структуры легких ядер (например, энергия связи, среднеквадратичный радиус и АНК) были исследованы в рамках различных микроскопических моделей и *ab initio* расчетах с использованием различных видов двухчастичных потенциалов; была обнаружена сильная зависимость рассчитанных их значений от используемых модельных приближений (Университет Либре Брюсселя, Университет Токио и др.); основные механизмы протекания поверхностных ядерных реакций передачи частицы *a* и возможность получения "экспериментальных" значений АНК для ряда ядер B (A + $a \rightarrow$ B) из анализа экспериментальных данных были изучены на основе модифицированного метода искаженных волн (ММИВ) в приближении нулевого и первого порядков теории возмущений в главной части оператора перехода (Циклотронный институт университета Техаса, Университет Суррей, Китайский институт атомной энергии, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Институт ядерной физики Казахстана и Институт ядерной физики Узбекистана); ряд важных ядерно-астрофизических реакций *pp*-цепочки и CNO цикла были исследованы в основе микроскопической, потенциальной двух- и трехчастичных моделей (Циклотронный институт университета Техаса, Университет Суррей, Китайский институт атомной энергии, Университет Либре Брюсселя, Ускорительная лаборатория Европейской коллаборация, Исследовательские ядерные центры университетов Осака и Токио, Казахский Национальный университет им. Аль-Фараби и Астрофизический институт им. В.Г.Фесенкова,Казахстан).

По теории структуры легких ядер, поверхностным реакциям передачи и радиационного захвата заряженной частицы при низких и сверхнизких энергиях, соответственно, в мире ведутся фундаментальные исследования по следующим приоритетнқм направлениям: микроскопические расчеты значений АНК для легких ядер, определение их чувствительности к используемым модельным параметрам и получение экспериментальных значений АНК, а также применение их для установления истинной формы двухчастичного ядерного потенциала и в расчетах астрофизических S факторов реакций *pp* цепочки и CNO цикла, определение экстраполяционных значений астрофизических S – факторов в области энергии гамовского пика ($\leq$ 25-50 кэВ) вплоть до нуля.

Степень изученности проблемы. В настоящее время ведущими учеными мира, в том числе, бельгийскими (D. Baye, P. Discouvement), американскими (A. M. Mukhamedzhanov, P.E. Tribble, K. M. Nollett, R. G. H. Robertson и др.), немецкими (D. Bemmerer, K. Langanke, P. Mohr, C. Rolfs, T.

Neff), японскими (T. Kajino, T. Motabayashi, K. Ogata, H. Hidetoshi), итальянскими (C. Spitareli, M. La Cognata), английскими (R. C. Johnson, N. K. Timofeyuk), французским (A. Coc), канадским (B. Davids), российскими (Л. Д Блохинцев, В. И. Кукулин,С. Б. Сакута), казахскими (Н Буртебоев, М. Жусупов, С. В. Дубовиченко), узбекскими (Р. Ярмухамедов, С. В. Артемов,Б.Ф. Иргазиев) и другими выполнен цикл исследований по поверхностным реакциям передачи и радиационного захвата протона при низких и сверхнизких энергиях Однако, в большинстве этих работ используются модельные приближения, которые привели к значительным неопределенностям как в определении значения АНК для легких ядер, так и в результатах его применения к расчетам в ядерно-астрофизических реакциях *pp*-цепочки и CNO цикла.

Большинством авторов для получения информации о значениях АНК и их использования для экстраполяции астрофизических S-факторов реакций *pp*-цепочки и CNO цикла в области сверхнизких энергий была применена приближенная теория поверхностных ядерных процессов. Однако, в этих работах авторы для описания экспериментальных данных, во-первых, в операторе перехода амплитуды поверхностной реакции передачи протона ограничиваются вкладами только нулевого и первого порядков теории возмущений по кулоновскому поляризационному потенциалу, а вкладами членов высших порядков пренебрегают. Во-вторых, в амплитуде реакции прямого захвата протона ядром-мишенью, рассматриваемой в рамках двухчастичной потенциальной модели, используют модельные приближения не адекватные физике процесса (С.В. Дубовиченко, D. Baye, P. Discouvement и др.).

Результаты анализов, полученные в рамках различных моделей и подходов, показывают наличие сильного расхождения как между собой, так и с экспериментальными данными, особенно в случае, когда передача протона или её захват происходит в слабосвязанные состояния конечного ядра. Например, значение АНК для ^{7}Be + $p \rightarrow {}^{8}$B, полученное в рамках ММИВ из анализа поверхностной передачи протона (A.M. Mukhamedzhanov, P.E. Tribble) или микроскопической модели (D. Baye, P. Discouvement), приводит к сильно заниженным или завышенным значениям рассчитанных астрофизических S - факторов для реакции прямого радиационного захвата ^{7}Be(p,γ)^{8}B при сверхнизких энергиях относительно современных прецизионно измеренных экспериментальных данных. В этом контексте, в амплитудах рассматриваемых поверхностных процессов требуется корректный учет высших (второго и др.) членов ряда теории возмущений и правильный выбор параметризации через АНК адекватно физике процессов.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках научных проектов Института ядерной физики: Ф-2.1.19 ”Разработка самосогласованного метода расчета структуры ядер и асимптотической

теории периферийных реакций передачи заряженной частицы в ядерной астрофизике сверхнизких энергий" (2003-2007); ФА-Ф2-Ф077 "Разработка и развитие теоретических методов расчета фундаментальных характеристик ядер и периферийных ядерных реакций при низких и сверхнизких энергиях для ядерной астрофизики" (2007-2011); Ф2-ФА-Ф117 "Исследования динамических свойств фундаментальных характеристик ядер для ядерной астрофизики" (2012-2016).

Целью исследования является разработка асимптотических методов расчета поверхностных ядерных процессов передачи и радиационного захвата заряженной частицы при низких и сверхнизких энергиях, определение экспериментальных значений АНК для A + $a \rightarrow$ B и их применение для расчета астрофизических S-факторов для реакций *pp*-цепочки и CNO цикла при сверхнизких энергиях.

Задачи исследования:

разработать модифицированный двухчастичный потенциальный метод (МДПМ) модельно-независимого описания ядерно-астрофизической реакции прямого радиационного захвата заряженной частицы A(a,γ)B путем введения информации о АНК для A + $a \rightarrow$ B в её амплитуду;

выполнить в рамках МДПМ анализ современных прецизионных экспериментальных астрофизических S - факторов ($S^{exp}(E)$) реакций прямого радиационного захвата $t(\alpha,\gamma)^7$Li и ^{7}Be(p,γ)^{8}B при низких энергиях E, получить экспериментальные значения АНК для $\alpha + t \rightarrow {}^7$Li и ^{7}Be + $p \rightarrow {}^8$B и применить их для определения значений астрофизического S - фактора ($S(E)$) и их погрешности в области сверхнизких энергий;

обобщить модифицированный метод искаженных волн (ММИВ) для периферийной ядерной реакции передачи заряженной частицы A(x,y)B ($x=y+a$, B= A+a и a – передаваемая частица) с приближенным учетом трехчастичной кулоновской динамики в механизме передачи;

применить ММИВ для анализа экспериментальных дифференциальных сечений реакций передачи протона ^{6}Li(^{3}He, d)^{7}Be, ^{13}C(^{3}He,d)^{14}N ^{14}N(^{3}He,d)^{15}O и получить "экспериментальные" значения АНК для ^{6}Li + $p \rightarrow {}^7$Be, ^{13}C+ $p \rightarrow {}^{14}$N и ^{14}N+ $p \rightarrow {}^{15}$O;

развить модифицированный R-матричный метод расчета ядерно-астрофизических реакций A(a,γ)B, протекающих через резонансные состояния, путем корректного учета вклада прямой части ампитуды в полной амплитуде процесса и выполнить анализ экспериментальных астрофизических S -факторов реакций резонансного радиационного захвата ^{6}Li(p, γ)^{7}Be, ^{12}C(p, γ)^{13}N, ^{13}C(p,γ)^{14}N и ^{14}N(p,γ)^{15}O при низких энергиях, используя значения АНК для ^{6}Li + $p \rightarrow {}^7$Be, ^{12}C+ $p \rightarrow {}^{13}$N, ^{13}C+ $p \rightarrow {}^{14}$N и ^{14}N+ $p \rightarrow {}^{15}$O определить значения астрофизических S -факторов и их погрешности в области сверхнизких энергий, также скорости реакций при звездных температурах ($0.01 \leq T_9 \leq 10$, $T_9 = 10^9$ K);

разработать асимптотический метод описания прямого развала ядра ^{6}Li $\rightarrow \alpha+d$ в кулоновском поле многозарядного ядра ^{208}Pb с учетом

трехчастичных кулоновских эффектов в конечном состоянии, определить значение АНК для $\alpha + d \rightarrow {}^{6}Li$ и использовать его для определения астрофизического S-фактора реакции $d(\alpha,\gamma)^6$ Li при сверхнизких энергиях;

развить в рамках многочастичной модели оболочек микроскопический метод расчета интегралов перекрытия внутренних волновых функций зеркальных (^{12}B,^{12}N) ядер, АНК и спектроскопических факторов (СФ) для ^{11}B + $n \rightarrow {}^{12}$B и ^{11}C + $p \rightarrow {}^{12}$N, используя эффективные NN потенциалы Волкова (V1и V2) и четыре формы M3Y, и изучить их чувствительность к видам используемых потенциалов;

определить значения астрофизического S-фактора реакции прямого радиационного захвата ^{11}C(p, γ)^{12}N при сверхнизких энергиях, используя рассчитанные значения АНК для ^{11}C + $p \rightarrow {}^{12}$N.

Объектом исследования являются структура легких ядер и ядерно-астрофизические реакции, протекающие в недрах Солнца и массивных звезд.

Предметом исследования являются поверхностные ядерные процессы при низких и сверхнизких энергиях с участием легких ядер.

Методы исследования. Для установления основных механизмов протекания поверхностных процессов при низких энергиях, используются Шредингеровский формализм в модели двух и трех тел, теории структуры легких ядер и ядерных реакций, а также аналитические методы и дисперсионная теория прямых ядерных реакций при низких энергиях, программирования на языке Фортран.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработан модифицированный двухчастичный потенциальный метод модельно-независимого извлечения экспериментальных значений АНК для A + $a \rightarrow$ B;

определены экспериментальные значения АНК для α + $t \rightarrow$ ^{7}Li($g.s.$), α + $t \rightarrow$ ^{7}Li(0.478 МэВ) и ^{7}Be + $p \rightarrow$ ^{8}B, а также астрофизических S-факторов для реакций t(α, γ) ^{7}Li и ^{7}Be (p, γ)^{8}B при энергиях $0 \leq E \leq 25$ кэВ;

развит обобщенный модифицированный метод искаженных волн с приближенным учетом трехчастичной кулоновской динамики в механизме передачи заряженной частицы a в периферийной ядерной реакции A(x,y)B (где $x = y + a$ и B=A+a) в модели трех (A, a и y) тел;

получены количественные оценки вклада трехчастичной кулоновской динамики в механизме передачи протона реакций ^{6}Li(^{3}He, d)^{7}Be, ^{13}C(^{3}He, d)^{14}N и ^{14}N(^{3}He, d)^{15}O и его влияние на “экспериментальные” значения АНК для ^{6}Li + $p \rightarrow {}^{7}$Be, ^{13}C+ $p \rightarrow {}^{14}$N и ^{14}N + $p \rightarrow {}^{15}$O;

развит модифицированный двухчастичный R-матричный метод описания ядерно-астрофизической реакции A(a,γ)B с учетом корректной информации об АНК для A + $a \rightarrow$ B в прямой части амплитуды;

определены значения полных астрофизических S - факторов и их погрешностей для реакций ^{6}Li(p, γ)^{7}Be, ^{12}C(p, γ)^{13}N, ^{13}C(p, γ)^{14}N и ^{14}N(p, γ)^{15}O в энергетическом интервале $0 \leq E \leq 25$ кэВ, а также скорости трех последних

реакций в интервале $0.01 \leq T_9 \leq 10$ и значение радиационной γ-ширины первого резонансного возбужденного состояния ядра ^{13}N (2. 365 МэВ; $1/2^-$);

показано, что горение водорода во внутренней части звезды посредством наиболее медленной реакции $^{14}N(p, \gamma)^{15}O$ CNO цикла происходит в 1.8 раз медленнее, чем оценивалось раньше;

разрабтан трехчастичный метод анализа тройного дифференциального сечения кулоновского развала ^{208}Pb (^{6}Li, α *d*) ^{208}Pb, учитывающий трехчастичный кулоновский "post" acceleration эффект в конечном состоянии;

определены экспериментальные значения АНК для $\alpha + d \rightarrow {}^6$Li и астрофизических *S*- факторов реакции $d(\alpha, \gamma)^6$Li в энергетическом интервале $0 \leq E \leq 100$ кэВ;

развит микроскопический метод расчета интегралов перекрытия для зеркальных (^{12}B, ^{12}N) ядер в (^{11}B + *n*)- и (^{11}C + *p*)-конфигурациях;

определены значения АНК и СФ для $^{11}B + n \rightarrow {}^{12}$B и $^{11}C + p \rightarrow {}^{12}$N, среднеквадратичных радиусов зеркальных (^{12}B, ^{12}N) ядер для эффективных NN потенциалов Волкова (V1 и V2) и M3Y (M3Y (E), M3Y (R), M3Y (P) и M3Y (HJ)) и установлена их чувствительность к видам этих потенциалов;

определены значения астрофизического *S*-фактора для реакции $^{11}C(p,\gamma)^{12}N$ при сверхнизких энергиях.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

получены экспериментальные значения АНК для $\alpha + d \rightarrow {}^6$Li, $\alpha + t \rightarrow {}^7$Li(*g.s.*), $\alpha + t \rightarrow {}^7$Li(0.478 МэВ), ^{7}Be $+ p \rightarrow {}^8$B, ^{6}Li $+ p \rightarrow {}^7$Be, $^{13}C + p \rightarrow {}^{14}$N и $^{14}N + p \rightarrow {}^{15}$O и соответствующих астрофизических *S* факторов и их погрешности при сверхнизких энергиях $0 \leq E \leq 25$ кэВ;

из микроскопических расчетов, выполненных с шестью видами эффективных NN потенциалов, установлено, что экспериментальное значение АНК для $^{11}C + p \rightarrow {}^{12}$N наиболее близко воспроизводит использование M3Y(E) потенциала.

Достоверность результатов исследования обосновывается использованием современных методов теоретической ядерной и математической физики, дисперсионной теории ядерных реакций при низких энергиях, а также современных эффективных численных методов и алгоритмов; тщательной проверкой согласованности полученных теоретических результатов с современными прецизионно измеренными экспериментальными данными и результатами исследований других авторов; согласованностью выводов с основными положениями теории структуры легких ядер и поверхностных ядерных процессов при низких и сверхнизких энергиях.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования определяется возможностью применения разработанных асимптотических методов для описания подбарьерных реакций передачи заряженной частицы и связанных с ними ядерно-астрофизических процессов солнечной *pp* – цепочки и

горячего CNO цикла, протекающих в массивных звездах; описания фундаментальных характеристик подпороговых и резонанасных состояний ядер, образующих в этих процессах.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что они могут быть успешно применены к решению квантово-механических проблем нескольких тел в атомной и ядерной физике, а также для предсказания потока солнечных нейтрино и количественного образования легких элементов во Вселенной в период после Большого Взрыва. Асимптотические методы и на его основе полученные новые результаты по АНК (например, для $\alpha + t \rightarrow {}^{7}\mathrm{Li}$, ${}^{7}\mathrm{Be} + p \rightarrow {}^{8}\mathrm{B}$ и ${}^{6}\mathrm{Li} + p \rightarrow {}^{7}\mathrm{Be}$) и сечениям поверхностных реакций передачи и радиационного захвата уже используются для постановки новых прецизионных экспериментов на ускорителях научных центров Италии, Венгрии, Польши, Казахстана, Узбекистана и Японии.

Внедрение результатов исследований. На основе полученных результатов по развитию модифицированных двух- и трехчастичных методов расчета ядерно – астрофизических реакций радиационного захвата при сверхнизких энергиях:

развитый обобщенный модифицированный метод искаженных волн для периферийной надбаръерной реакции передачи заряженной частицы A(x, y)B (x= y + a, B= A + a, где a – передаваемая частица) с приближенным учетом трехчастичных кулоновских эффектов в начальном, промежуточном и конечном состояниях был использован для анализа ядерных реакций на легких ядрах во взаимодействиях с дейтронами и альфа-частицей, выполненных в Институте ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан (Письмо Института ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан № 34-02-13/836 от 12 июня 2018г.). По результатам исследований было достигнуто корректное описание астрофизических S-факторов ряда ядерно-астрофизических реакций радиационного захвата CNO цикла и их высокоточной экстраполяции в энергетическую область вблизи гамовского пика;

разработанный модифицированный двухчасичный потенциальный метод (МДПМ) модельно-независимого извлечения экспериментальных значений асимптотического нормировочного коэффициента (АНК) для A + a $\rightarrow$ B и развитый модифицированный двухчастичный R-матричный метод описания ядерно-астрофизической реакции A(a,γ)B с учетом информации об АНК для A + a $\rightarrow$ B в прямой части амплитуды были использованы в создании экспериментальной методики научных исследований на электронном ускорителе ЭГ-2 Национального университета Узбекистана (Письмо Министерства Высшего и среднего специального образования Республики Узбекистана № 89-0303148 от 6 сентября 2018 г.). Использование результатов исследований позволило объяснить экспериментальные результаты радиационного захвата протона ядрами ${}^{12}\mathrm{C}$ и

^{16}O и определить скорости ядерно-астофизических реакций радиационных захватов протона ядрами ^{12}C и ^{14}N;

полученные результаты по астрофизическому S – фактору реакции радиационного захвата $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ были использованы международными исследователями (ссылки в зарубежных научных журналах Nuclear Physicis A 918, 61-169, 2013, IF =1.992; Nuclear Physicis A 834, 661-663, 2010, IF =1.992; Reviews of Modern Physics 83, 195-245, 2011, IF =36.917 и др.). Полученные результаты пополнили базу данных по установлению скорости реакции $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$, протекающей в недрах Солнца и массывных звездах и послужили проведению сравнительных анализов полученных результатов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 15 международных и республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 26 научных работ, 11 научных статей в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из них 10 в зарубежных научных журналах,

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 184 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** представлены 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, дана 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 **«Модифицированный двухчастичный потенциальный метод»** даны краткий обзор литературы и детальный критический анализ результатов по реакциям $t(\alpha,\gamma)^7$Li и ^{7}Be$(p,\gamma)^8$B, полученных другими авторами. Изложена также основная идея предлагаемого нового МДПМ для описания реакции прямого радиационного захвата A(α,γ)B.

В первом разделе главы получено явное выражение для $S(E)$ в общей спиновой кинематике, которое дается в виде факторизованного произведения квадрата АНК для $A+a\rightarrow B$ (C^2) и рассчитываемой функцией $R(E,b)$, содержащей радиальный интеграл свертки волновых функций связанного $(A+\alpha)$ состояния и Aα-рассеяния с оператором электромагнитного перехода в длинноволновом приближении. Здесь b - одночастичный АНК, который

определяет амплитуду “хвоста” одночастичной оболочечной волновой функции связанного (A+α) состояния и является свободным модельным параметром, сильно зависящим от геометрических параметров ядерного Вудса-Саксона потенциала (радиус r_0 и диффузность a). В МДПМ сформулированы два условия: 1) $R(E,b)$= const для каждого фиксированного значения E и при произвольной вариации свободного параметра b; 2) отношение $C_{Aa}= S(E)/R(E,b)$ не должно зависеть ни от модельного параметра b, ни от энергии E. Выполнение этих двух условий позволяет определить экспериментальные значения квадрата АНК посредством соотношения $(C_i^{exp})^2=S^{exp}(E_i)/R(E_i,b)$ для каждой экспериментальной энергии $E=E_i$ (i=1,2, … N) и использовать средне - взвешенное экспериментальное значение $(C^{exp})^2$ для определения значений астрофизического S-фактора и их погрешности при энергиях в окрестности гамовского пика вплоть до E=0 (область сверхнизких энергий) с помощью выражения $S(E)= (C^{exp})^2\ R(E, b)$.

Продемонстрировано, что выше сформулированные условия выполняются с высокой точностью для проанализированных реакций прямого радиационного захвата $t(\alpha,\gamma)^7$Li и ^{7}Be$(p,\gamma)^8$B в пределах абсолютных экспериментальных погрешностей $S^{exp}(E_i)$. Получены средневзвешенные “экспериментальные” значения квадратов АНК для t+α→^{7}Li(осн), t+α →^{7}Li(0.478 МэВ) и ^{7}Be + p→^{8}B, а также значения $S(E)$ и их погрешности в сверхнизких энергий. Полученные значения $(C^{exp})^2$ оказались равными $(C^{exp})^2$ = 12.74±1.10 и 9.00±0.90 Фм$^{-1}$ для АНК t+α→^{7}Li(осн) и t+α →^{7}Li(0.478 МэВ), соответственно, и $(C^{exp})^2$=0.626±0.017 Фм$^{-1}$ для АНК ^{7}Be + p→^{8}B. При этом, значения $S(E)$ при E= 0 и 20 кэВ (гамовский пик) были равны $S(0)$ = 0.0974±0.010 кэВ·бн и S(20 кэВ) = 0.0944±0.010 кэВ·бн для реакции $t(\alpha,\gamma)^7$Li и $S(0)$ = 23.35±0.65 эВ·бн и S(20 кэВ) = 22.65±0.63 эВ·бн для реакции ^{7}Be$(p,\gamma)^8$B.

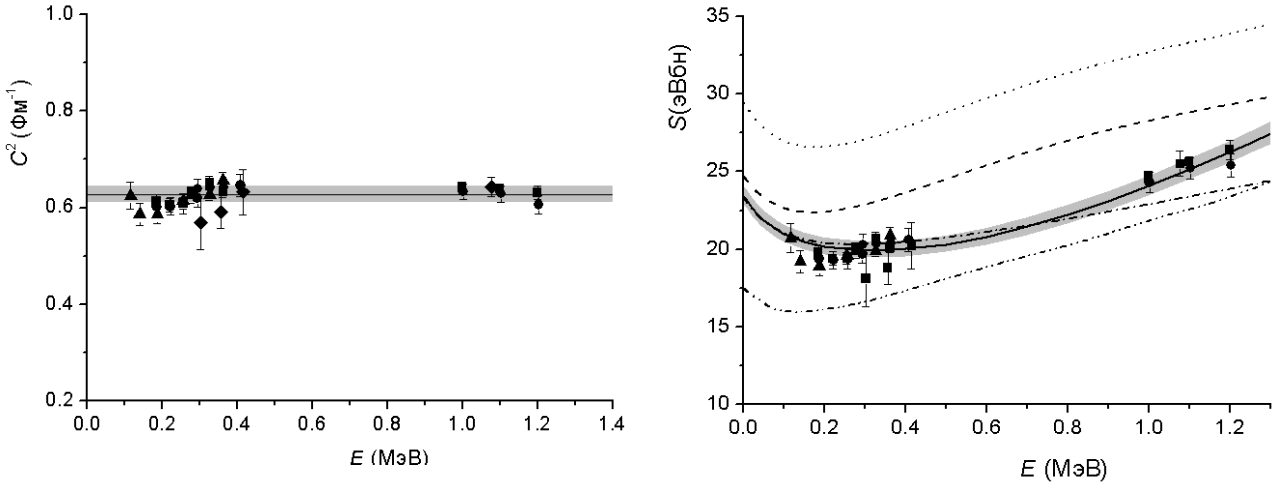


Рис. 1. Слева – извлеченные АНК $((C_i^{exp})^2)$ для ^{7}Be +p→^{8}B для каждой экспериментальной энергии $E=E_i$ (i=1,2, … N). Прямая линия и ширина полосы – среднее взвешенная АНК и его погрешность, соотвественно. Справа - рассчитанные значения $S(E)$ для реакции ^{7}Be$(p,\gamma)^8$B:сплошная кривая и ширина полосы – результаты расчета среднего значения

астрофизического $S(E)$- фактора и его погрешность, соответственно. Пунктирные и штрих-пунктирая линии – соответственно результаты микроскопического расчета работы P. Descouvemont [Phys. Rev. C 70, 065802 (2004)] для Волков(V2) и Минессота(MN) форм *NN* потенциалов; полоса – наши результаты; пунктиры с двумя точками (*г* и *з*)– результаты расчетов работ G. Tabacaru,et al.[Phys.Rev. C73 (2006)025808] и H. M. Xu, et al.[Phys. Rev. Lett. 73, 2027 (1994)]. Эксперимательные данные брались из работ A. R. Junghans, et al.[Phys. Rev. Lett. 88, 041101 (2002)] и L. T. Baby, et al [Phys. Rev. C67 (2003) 065805].

Полученные результаты сравниваются с результатами других авторов. В качестве иллюстрации на рис. 1 представлены результаты $(C_i^{\exp})^2$ для ^{7}Be $+p\rightarrow{}^8$B и рассчитанные значения $S(E)$ для реакции ^{7}Be(p, γ)^{8}B, полученные нами, и их сравнение с данными других авторов.

На основе критического сравнительного анализа с результатами других авторов как значений АНК для $t+\alpha\rightarrow{}^7$Li и ^{7}Be + $p\rightarrow{}^8$B, так и рассчитанных значений $S(E)$ для реакций $t(\alpha,\gamma)^7$Li и ^{7}Be$(p,\gamma)^8$B в окрестности гамовского пика и $E= 0$ делается вывод, что представленные нами результаты как для АНК, так и для $S(E)$ являются пока "лучшими" результатами, полученными модельно-независимым образом из анализа соответствующих современных прецизионных экспериментальных данных по $S^{\exp}(E_i)$.

Во второй главе **«Трехчастичная кулоновая динамика механизма передачи заряженной частицы и обобщенный модифицированный метод искаженных волн»** в рамках трехтельного шредингеровского формализма получено выражение для амплитуды (M^{TB}) периферийной реакции передачи заряженной частицы A(x, y)B (x= y + a, B= A + a, где a – передаваемая частица). В операторе перехода амплитуды M^{TB} вклад от главного механизма передачи, включающего в себя всевозможные трехчастичные (A, a и y) кулоновские перерассеяния в промежуточном состоянии, приближенно учитываются члены всех порядков (нулевого, первого и высших) теории возмущений по кулоновскому поляризационному потенциалу ($\Delta V^C_{i,f}$), а эффекты кулон-ядерных искажений в начальном и конечном состояниях рассматриваются в рамках оптической модели. Амплитуду M^{TB} можно рассматривать как амплитуду обобщенного модифицированного метода искаженных волн (ММИВ), которая параметризуется через произведения АНК (C_{Aa} и C_{ya}) для $y + a \rightarrow x$ и A + $a \rightarrow$B.

Основываясь на аналитические свойства амплитуды M^{TB} по переменной cosθ, получено явное выражение для дифференциального сечения (ДС) в области главного максимума углового распределения, которое имеет вид

$$\frac{d^{TB}\sigma}{d\Omega} = |R_a|^2 C^2_{Aa}\, C^2_{ya}\, R^{DWBA}_{post}(E_i, \theta; b_B, b_x). \qquad (1)$$

Здесь R_a - перенормировочный трехчастичный кулоновский фактор (ПТКФ) и $R^{DWBA}_{post}(E_i,\theta;b_B,,b_x)$ – приведенное ДС, рассчитываемые в "post"-приближении МИВ с $\Delta V^C_{i,f}$ =0, где E_i - относительная кинетическая энергия сталкивающихся

ядер, θ – угол рассеяния в с.ц.и., b_B, и b_x - одночастичные АНК для связанных ((y + a) и (A + a)) состояний ядер x и B, соответственно. ПТКФ R_a в правой части выражения для ДС возникает из-за приближенного учета трехчастичных кулоновских эффектов в начальном, промежуточном и конечном состояниях.

В данной главе представлены результаты анализа экспериментальных ДС для периферийных реакций передачи протона, вызванных ^{3}He-ионами на ядрах ^{6}Li, ^{12,13}C и ^{14}N при различных надбаръерных энергиях с образованием конечных ядер в основном и нижепороговом возбужденных состояниях. Обсуждается условие модельно-независимого способа определения квадрата АНК (C^2_{Ap}) путем вариации свободного параметра b_B в расчетах приведенного ДС выражении (1) и значения параметра b_x (x=^{3}He). Получены значения квадрата АНК (C^2_{Ap}) и оценка влияния трехчастичных кулоновских эффектов на них. Показано, что влияние трехчастичных кулоновских эффектов на значения АНК является существенным и меняется в пределах 26% - 50% ($|R_a|^2$=1.26 – 1.50) в зависимости образуемых конечных состояний ядер. Проведенный анализ показывает, что “post”-приближение МИВ без учета вышеупомянутых трехчастичных кулоновских эффектов не пригоден для использования рассмотренных периферийных реакций передачи протона как источника получения надежной информации о значениях АНК для A + $p\rightarrow$ B.

В третьей главе «**Модифицированный R – матричный метод для реакций резонансного радиационного захвата**» изложены идея и основные положения развитого модифицированного R-матричного метода описания реакции радиационного захвата A(a, γ)B при сверхнизких энергиях, идущего через образования резонанса B* в промежуточном состоянии. Используется одноуровневое R-матричное приближение, где вклад в амплитуду реакции от внутренней области ($0\leq r \leq r_C$, r_C – радиус канала) определяется полюсной амплитудой $M^{(R)}_{\alpha\beta}(E)$, отвечающей механизму A + $a \rightarrow$B*$\rightarrow$B + γ образования резонансного ядра B* в промежуточном состоянии. $M^{(R)}_{\alpha\beta}(E)$ характеризуется энергией $E^{(R)}_\lambda$, парциальными ширинами $\Gamma^a_\alpha(E)$ и $\Gamma^\gamma_{\lambda;\beta}(E)$ соответственно для распадов B*$\rightarrow$ A + a и B*$\rightarrow$ B + γ. Здесь α= (l_{B^*} $s_{B^*}$$J_{B^*}$) и β= ($I$ J_{B^*} J_B) – набор квантовых чисел, где l_{B^*} , s_{B^*} , I и J_{B^*} (J_B) - орбитальный момент частицы a в резонансном состоянии ядра B*, спин канала, мультипольность электромагнитного (EL и ML) перехода и спин резонансного (основного) состояния ядра B, соответственно. Радиационная резонансная ширина ($\Gamma^\gamma_{\lambda;\beta}(E)$) представляется в виде двух слагаемых: $[\Gamma^\gamma_{\lambda;\beta}(E)]^{1/2}$= $[\Gamma^\gamma_{\lambda;\beta}(E)]^{1/2}_{\rm int}$ +$[\Gamma^\gamma_{\lambda;\beta}(E)]^{1/2}_{ext}$, где $[\Gamma^\gamma_{\lambda;\beta}(E)]_{\rm int}$ и $[\Gamma^\gamma_{\lambda;\beta}(E)]_{ext}$ – радиационная внутренняя ($0\leq r \leq r_C$) и a-канальная внешняя ($r>r_C$) части радиационной ширины, которые пропорциональны соответствующим приведенным γ-ширинам ($\gamma^\gamma_{\lambda;\beta}$ (int) и $\gamma^\gamma_{\lambda;\beta}$ (ext)) и содержат множители томасовского энергетического

сдвига. Величина $\gamma^{\gamma}_{\lambda;\beta}$ (*int*) является действительным подгоночным параметром, а величина $\gamma^{\gamma}_{\lambda;\beta}$ (*ext*) определяется точным аналитическим выражением, параметризованным через АНК для A + *a* $\rightarrow$ B. Экспериментальные *a*-канальная и γ-радиационная ширины определяются соотношениями $\Gamma^{\exp}_{a;\alpha} = \Gamma^{a}_{\alpha}(E^{(R)}_{\lambda})$ и $\Gamma^{\exp}_{\gamma;\beta} = |\Gamma^{\gamma}_{\lambda;\beta}(E^{(R)}_{\lambda})|$, соответственно.

Прямая часть амплитуда реакции содержит радиальный интеграл

$$I_{l_B s_B lI} = C_{Aa;l_B s_B} \int_{r_{ch}}^{\infty} dr r^{I-L} W_{-\eta_B;l_B+1/2}(2\kappa r)[I_l(r) - e^{2i\delta_l^{(HS)}(E)} O_l(r)], \qquad (2)$$

где I_l(r) (O_l(r)) - асимптотика входящей (выходящей) волны A*a*-рассеяния при r>r_N, L = 0 (1) для EI (MI)-перехода, к - волновое число частицы *a* в ядре B и $C_{Aa;l_B s_B}$ - АНК для A + *a* $\rightarrow$ B, ($\delta_l^{(HS)}$) – сдвиг фазы рассеяния на непроницаемой сфере. В (2) величина $C_{Aa;l_B s_B}$ фиксирует вклад прямой части амплитуды в полную амплитуду реакции. Получено явное выражение для астрофизического *S* фактора в общей спиновой кинематике.

Представлены результаты анализа, выполненного в рамках развитого нами модифицированного *R*-матричного метода для экспериментальных данных по астрофизическим *S* - факторам реакций радиационного захвата протона ядрами ^{6}Li, ^{12,13}C и ^{14}N при сверхнизких энергиях. Анализ проводился с использованием соответствующих значений АНК A + *p*$\rightarrow$ B, полученных в Главе 2, а известные значения протонных ширин для резонансного распада B*$\rightarrow$A + *p* брались из других работ. Значения свободных параметров r_{ch} и $\gamma^{\gamma}_{\lambda;\beta}$ (*int*) (или $\Gamma^{\exp}_{\gamma;\beta}$) определялись путем подгонки рассчитанных *S*-факторов к экспериментальным данным и методом критерий χ^2. Получено хорошее согласие между рассчитанными и экспериментальными астрофизическими *S* факторами и новые оценки для ”экспериментальных” значений γ-радиационной ширины $\Gamma^{\exp}_{\gamma;\beta}$, и вклада прямого радиационного захвата. Показано, что вклад прямого радиационного захвата является доминирующим в энергетическом интервале 0 ≤*E*≤ 50 кэВ. В качестве иллюстрации, на рис. 2 – 4, представлены результаты анализа для реакции ^{14}N(*p*,γ)^{15}O при сверхнизких энергиях, а также её скорости в интервале 0.01≤T_9 ≤ 10. Полученные результаты критически сравниваются с результатами других авторов. На его основе рекомендованы новые значения радиационной ширины для распада ^{13}N (2. 365 МэВ) $\rightarrow$ ^{12}N(осн.) + γ ($\Gamma^{\exp}_{\gamma;\beta}$= 0.65±0.07 эВ), *S*(0)= 1.62±0.20 кэВ бн и *S*(25 кэВ)= 1.75±0.22 кэВ бн для реакции ^{12}C(*p*, γ)^{13}N, а также *S*(0)= 1.13 кэВ бн для полного прямого захвата для реакции ^{14}N(*p*, γ)^{15}O. Кроме того, обнаружено, что горение водорода во внутренней части звезды посредством наиболее медленной реакции ^{14}N(*p*, γ)^{15}O CNO цикла происходит на самом деле еще медленнее в 1.8 раза, чем общепринятое, для реакции ^{6}Li(*p*,γ)^{7}Be определено значение

астрофизического S –фактора, S(0)=70.2±12.0 эВбн и ширины парциального протонного резонанса Γ_p≈50 кэВ.

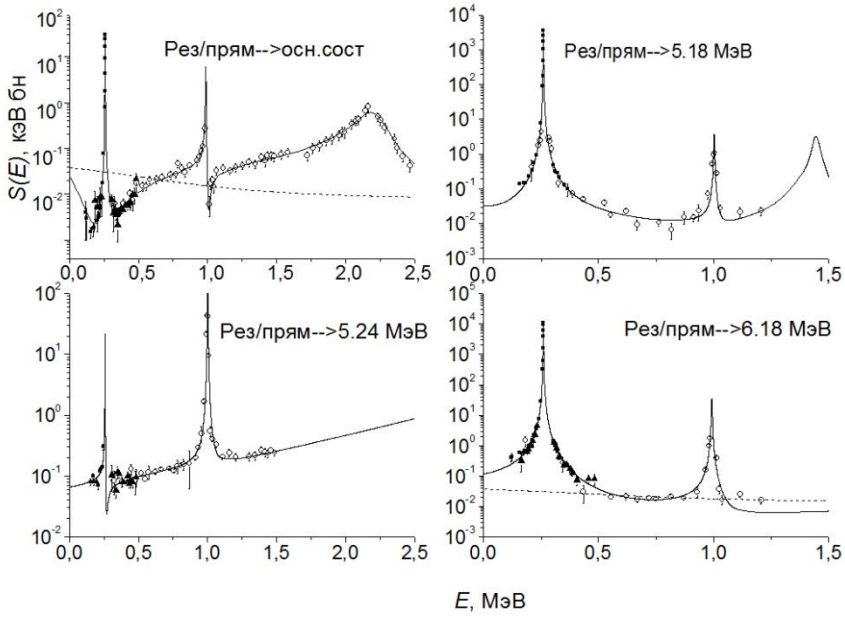


Рис.2. Астрофизические S-факторы для реакции ^{14}N(p,γ)^{15}O, отвечающие четырем нижным состояниям ядра ^{15}O. Экспериментальные данные (квадратики), (треугольники) и (кружочки) взяты соответственно из работ [G. Imbriani et al.,Eur.Phys.J.A25, 455 (2005)] [R. C. Runkle et al., Phys. Rev. Lett. 94, 082503(2005)] и [U. Schr¨ oder et al.,Nucl.Phys.A467, 240 (1987)]. Кривые – результаты наших расчетов: сплошная кривая– полный астрофизический S-фактор; штриховая кривая– астрофизический S-фактор прямого радиационного захвата.

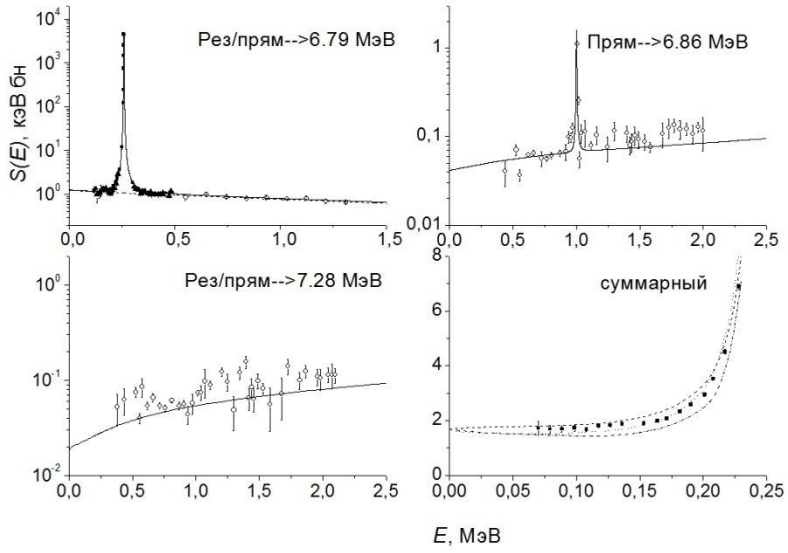


Рис. 3. То же самое, что на рис.2 для трех (E^*=6.79, 6.86 и 7.28 МэВ) возбужденных состояний ядра ^{15}O и суммарный астофизический S-фактор. Экспериментальные

значения суммарного астрофизического S-фактора (•) взяты из [A. Lemutet al., Phys. Lett. B634, 483 (2006)]; штриховая, точечная и штрих пунктирная кривые–результаты расчетов из работ [A. M. Mukhamedzhanov, P. Bem, B. A. Brown,et al.,Phys. Rev. C67, 065804 (2003)., A. Lemutet al., Phys. Lett. B634, 483 (2006); R. C. Runkle et al., Phys. Rev. Lett. 94, 082503(2005).] соответственно.

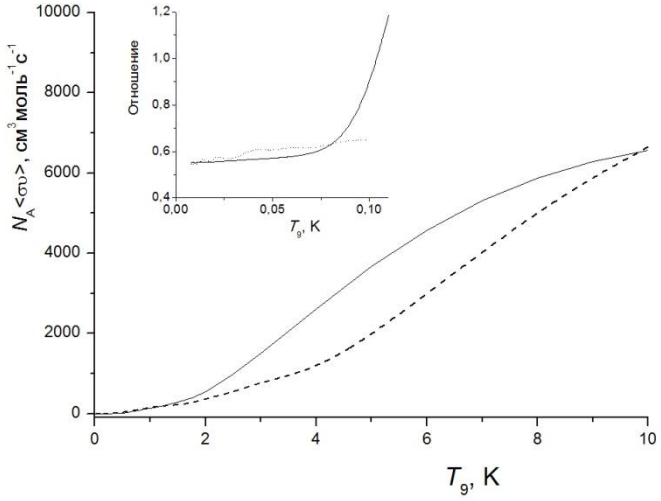


Рис.4. Скорость ^{14}N(p,γ)^{15}O реакции. Сплошная кривая – результат наших расчетов., штриховая - [C.Angulo, M.Arnould et all., Nucl.Phys**. A656**, 3 (1999)].В верхней панели приведены отношения рассчитанных скоростей, полученных нами (сплошная крывая) и авторами работы [A. M. Mukhamedzhanov, P. Bem, B. A. Brown,et al.,Phys. Rev. C67, 065804 (2003)] (пунктириная кривая) к данным в базе данных [C.Angulo, M.Arnould et all., Nucl.Phys**. A656**, 3 (1999)].

В четвертой главе **“Развал ^{6}Li → *d* + α в кулоновском поле тяжелого ядра ^{208}Pb, асимптотический нормировочный коэффициент для *d* + α→^{6}Li и ядерно-астрофизическая реакция *d*(α, γ)^{6}Li при сверхнизких энергиях”** предложен трехчастичный метод описания реакции кулоновского развала ^{208}Pb(^{6}Li, *d*α) ^{208}Pb для определения экспериментального значения АНК для *d* + α→^{6}Li.

В рамках модели трех (*d*, α и ^{208}Pb) тел получено выражение для матричного элемента реакции кулоновского развала ^{208}Pb(^{6}Li, *d*α) ^{208}Pb, в котором оператор перехода $\Delta V_f^C(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{\rho})$, соответствующего кулоновскому поляризационному потенциалу для трех (*d*, α и ^{208}Pb) тел, свертывается между трехчастичной кулоновской волновой функцией (ТКВФ, $\Psi_{k;p}^{(-)*}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{\rho})$) в конечном состоянии и интегралом перекрытия ($I_{ad}(\boldsymbol{r})$) для волновой функции ядра ^{6}Li в (*d* + α)- канале, где ***r* (*ρ*)** – радиус-вектор, соединяющий центры масс дейтрона и α-частицы (центрами масс (*d*, α)-пары и ядра ^{208}Pb) и ***k*(*p*)** - сопряженный ему импульс. При расчете матричного элемента используются два приближения: П1 и П2. В приближении П1 полагается, что снаряд ^{6}Li двигается по резерфордовской траектории. Поэтому радиус обрезания ($\rho_{\min}$)

на нижнем пределе в радиальном интеграле по переменной ρ ($\rho_{\min} \leq \rho < \infty$) в матричном элементе берется равным классическому прицельному параметру b ($b \leq \rho < \infty$, $b = Z_{Li}Z_{Pb}e^2 ctg(\theta/2)/2E$), Z_A – заряд ядра А нуклида, E-кинетическая энергия сталкивающихся ядер, θ - угол рассеяния. В приближении П2 предполагается, что развал ядра ^{6}Li на d и α-частицы происходит на относительном расстоянии (ρ), превышающим значения радиуса ядерного взаимодействия (ρ_N), то есть $\rho > \rho_N$. В этом приближении величина $\rho_{\min}$ фиксируется и определяется из выражения $\rho_{\min} = \rho_N + \pi z_{Li} z_{Pb} e^2/4E < b$, величина ρ_N дается выражением $\rho_N = r_0(6^{1/3} + 208^{1/3})$, где r_0= 1.36 Фм, которое рекомендовано другими авторами. В обеих приближениях в матричном элементе кулоновского развала ТКВФ $\Psi_k^{(-)*}(\mathbf{r},\boldsymbol{\rho})$ и радиальная часть интеграла перекрытия $I_{\alpha d}(\mathbf{r})$ в рассматриваемой кинематической области можно заменить на известные асимптотические выражения. Используемое явное асимптотическое выражение для ТКВФ учитывает, так называемый, трехчастичный кулоновский “post acceleration” эффект, связанный с влиянием кулоновского поля многозарядного ^{208}Pb-иона на относительный импульс фрагментов развала. Заметим, что “post acceleration” эффект – это физическое явление, явно наблюдаемое в эксперименте в виде асимметрии зависимости выхода реакции от относительной скорости фрагментов, когда фрагменты развала меняются местами и по-разному ускоряются в кулоновском поле многозарядного иона – ядра мишени. Это явление проявляется настолько четко, насколько кулоновское поле, в котором происходит развал ядра снаряда чисто от поля ядерного притяжения этой же мишени. В П1 приближении “post acceleration” эффект выбран главным критерием определения кинематики эксперимента на чистоту кулоновского развала (ЧКР).

Использование ТКВФ позволяет параметризовать тройное дифференциальное сечение (ТДС) рассматриваемой реакции кулоновского развала в виде

$$\frac{d^3\sigma}{d\Omega_{Li} d\Omega_{\alpha d} dE_{\alpha d}} = C_{d\alpha}^2 \frac{d^3\tilde{\sigma}}{d\Omega_{Li} d\Omega_{\alpha d} dE_{\alpha d}} , \qquad (3)$$

где $C_{\alpha d}$ - АНК для $d + \alpha \rightarrow {}^6$Li, отвечающий s-состоянию дейтрона и α-частицы в ^{6}Li, и $d^3\tilde{\sigma}/d\Omega_{Li} d\Omega_{\alpha d} dE$ - рассчитываемое приведенное ТДС, корректным учетом Е1 – и Е2 – мультипольностей, а также их интерференций, которое является функцией переменной относительной кинетической энергии, $E_{\alpha d}$ - фрагменты развала при фиксированных значениях углов. Выражение (3) позволяет определить экспериментальные значения АНК путем замены, в правой части выражения величины $\frac{d^3\sigma}{d\Omega_{Li} d\Omega_{\alpha d} dE_{\alpha d}}$ на экспериментальные значения ТДС.

Приведены результаты расчетов ТДС и экспериментальные значения квадрата $(C_{\alpha d}^{\exp})^2$ для каждой экспериментальной точки энергии для

кинематики E_{Li} = 156 МэВ и θ = 4° (b=33.4 Фм), полученные в приближении П1, и их сравнение с экспериментальными данными. Результаты анализа показали, что данная кинематика вполне отвечает критерию ЧКР. Получено средне- взвешенное значение и его погрешность, равная $(C_{\alpha d}^{exp})^2$ = 6.72±0.73 Фм$^{-1}$, которое отличается от значения $(C_{\alpha d}^{exp})^2$ = 5.37±0.26 Фм$^{-1}$, полученного другими авторами. П1 приближение аналогичным образом было применено и для анализа экспериментальных данных по ТДС с θ = 3°. Расчеты показали, что экспериментальные данные по ТДС не были получены в условиях ЧКР. Следовательно, значение $(C_{\alpha d}^{exp})^2$, полученное в результате данного анализа, довольно сильно различается от вышеприведенного значения для кинематики с θ =4°. В этой главе также представлены результаты анализа экспериментальных данных ТДС при θ = 3°, полученных в приближении П2. Расчеты показали, что для данной кинематики, когда развал ядра снаряда происходит на краю ядерного взаимодействия ядер мишени и снаряда (ρ_{min} = 12.4 Фм) в достаточно узком интервале энергии (107 ≤ $E_{\alpha d}$ ≤ 250 кэВ) вкладом ядерной части этого взаимодействия на относительное движение фрагментов развала d и α можно пренебречь. Однако, обнаружено, что с ростом энергии $E_{\alpha d}$ ($E_{\alpha d}$>250 кэВ) его вклад растет и становится важным.

Приведены также результаты анализа в рамках приближения П2. Определены значения АНК для каждой из восьми точек экспериментальных энергий в интервале 107 ≤ $E_{\alpha d}$ ≤ 250 кэВ. Средне-взвешенное значение АНК получено равным $(C_{\alpha d}^{exp})^2$ =5.24±0.51 Фм$^{-1}$, которое прекрасно согласуется с вышеприведенными литературными данными. Делается вывод о возможности получения достоверных экспериментальных значений АНК в узком вышеприведенном интервале энергии $E_{\alpha d}$ с учетом вклада интервала $\rho_{min} \leq \rho \leq b$ (ρ_{min} = 12.4 Фм, b=33.4 Фм).

В данной главе также представлены извлеченные экспериментальные значения, а также результаты расчетов астрофизического S -фактора реакции $d(\alpha,\gamma)^6$Li при сверхнизких энергиях с использованинм АНК, полученных в П1 и П2 приближенниях. Там же приведены последние экспериментальные данные по прямому измерению астрофизического S – фактора в четырех точках энергии: $E_{\alpha d}$ =80, 93, 120 и 134 кэВ (D. Trezzi, M. Anders, M. Aliotta *et al.* Astroparticle Physics 89(2017), pp.57–65). Расчеты были выполнены в рамках развитого нами во второй главе модифицированного R-метода с учетом вклада $E1$- и $E2$- мультипольностей. Получено хорошее согласие между рассчитанными и экспериментальными данными. Определены значения α-канальной и γ-радиационной резонансных ширин для первого резонансного уровня ($3/2^-$, 0.71 МэВ) ядра ^{6}Li, которые превосходно согласуются с литературными данными, полученными другими авторами. На рис.5 приведены извлеченные нами экспериментальные значения астрофизического S - фактора реакции радиационного захвата $d(\alpha,\gamma)^6$Li и результат его экстраполяции в область сверхнизких энергий.

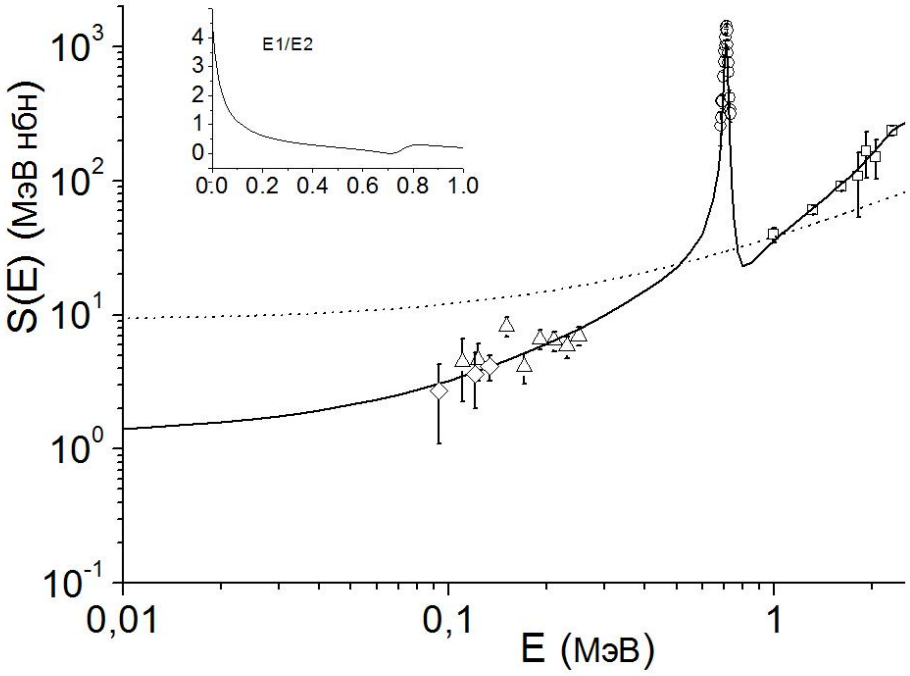


Рис. 5. Астрофизический *S*-фактор реакции радиационного захвата $d(\alpha,\gamma)^6$Li. Точки: треугольники – наши данные, полученные из анализа данных по ТДС для угла рассеяния θ = 3º; ромбики – [D. Trezzi, M. Anders, M. Aliotta *et al.* Astroparticle Physics 89(2017), pp.57–65]; квадратики –[R. G.H. Robertson, *et al*. // Phys. Rev. Lett.- American Physical Society,1981.- Vol.47.-pp. 1867-1893.]; кружки – [P. Mohr, V. Kolle, S. Wilmes, *et al*., Phys. Rev. C 50, 1543 (1993)]. Кривые: сплошная – результат расчета с АНК $C_0^2(3^o) = 5.24 \pm 0.51$ Фм$^{-1}$, штрихованная – результат экстраполяции авторов работы [J. Kiener, H. J. Gils, *et al*., Phys. Rev. C 44, 2195 (1991)]. На вставке приведено отношение вкладов *E1* – и *E2* – мультипольных переходов в процесс радиационного захвата.

В пятой главе **«Микроскопический метод расчета интегралов перекрытия волновых функций для зеркальных ядер (^{12}B,^{12}N) в (^{11}B + *n*)- и (^{11}C+ *p*) - конфигурации и АНК для ^{11}B + *n*$\rightarrow^{12}$B и ^{11}C+ *p* $\rightarrow^{12}$N»** изложен развитый микроскопический метод расчета интеграла перекрытия для зеркальных ядер (^{12}B,^{12}N) в (^{11}B + *n*)- и (^{11}C + *p*)-конфигурации АНК для ^{11}B + *n*$\rightarrow$ ^{12}B и ^{11}C + *p*$\rightarrow$ ^{12}N, использующий многочастичные волновые функции модели оболочек для ядер ^{11}C и ^{12}N. Получено неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка для радиальной части интеграла перекрытия $I_{lj}(r)$, использующее различные виды эффективного NN потенциала, где l и j – орбитальный и полный угловые моменты «валентного» нейтрона/ протона в ядре ^{11}B /^{12}N (l =1 и j=1/2 и 3/2). Получено явное выражение для АНК для A + *N*$\rightarrow$B (^{11}B или ^{12}N). Чтобы рассчитать АНК нами использовались трансляционные инвариантные

волновые функции ядер ^{11}B и ^{12}B или ^{11}C и ^{12}N, разложенные по базисным состояниям $|AN_{min}[f](\lambda\mu)\beta LST>$ осцилляторной модели оболочки, с учетом эффекта антисимметризации между нуклонами путем включения всех возможных возбуждений остовов ^{11}B и ^{11}C.

Численные расчеты АНК (C_{lj}) для ^{11}B + $n\rightarrow$ ^{12}B и ^{11}C + $p\rightarrow$ ^{12}N, среднеквадратичных радиусов (с.к.р.) ($<r^2>^{1/2}$) и спектроскопических факторов (СФ) (Z_{lj}) для зеркальных (^{12}B,^{12}N) ядер в (^{11}B + n)- и (^{11}C + p)-конфигурации проводились для шести видов эффективных NN потенциалов: два вида потенциала Волкова (V1и V2) и четыре вида потенциала M3Y(M3Y(R), M3Y(HJ), M3Y(P) и M3Y(E)). Обнаружено, что рассчитанные значения C_{lj}, $<r^2>^{1/2}$ и Z_{lj} заметно чувствительны к форме используемых эффективных NN потенциалов. Тем не менее, при этом отношение АНК для зеркальных (^{12}B,^{12}N) ядер практически не зависит от вида использованых эффективных NN потенциалов (в пределах до 10%), а рассчитанные значения АНК для ^{11}B + $n\rightarrow$ ^{12}B и ^{11}C + $p\rightarrow$ ^{12}N, отвечающие M3Y(E) потенциалу, являются наиболее близкими к их “экспериментальным” значениям, рекомендованным другими авторами. Поэтому эффективный потенциал M3Y(E) был использован для расчета СФ для ядра ^{12}B в (^{11}B + n)-конфигурации. Получено его значение, которое приблизительно на 28% меньше верхней границы экспериментального значения. Обсуждается основная причина этого расхождения.

Получено значение астрофизического S фактора при энергии E=0 (S(0)) для реакции прямого радиационного захвата ^{11}C(p,γ)^{12}N, рассчитанное с использованием АНК для M3Y(E) формы эффективного NN потенциала, которое примерно в три раза превосходит значение S(0), рекомендованное другими авторами из экспериментальных данных по кулоновскому развалу ^{12}N на два фрагментов ^{11}C и p. Обсуждается причина такого расхождения, которая может быть связана с влиянием “post acceleration” эффекта в расчетах кулоновского развала, рассмотренного в Главе 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований, проведенных по теме докторской диссертации «Модифицированные двух- и трехчастичные методы расчета ядерно-астрофизических реакций радиационного захвата при сверхнизких энергиях»», представлены следующие выводы.

1. Разарботан модифицированный двухчастичный потенциальный метод (МДПМ) для описания ядерно-астрофизической реакции прямого радиационного захвата A(a,γ)B при низких энергиях, позволяющий определить экспериментальные значения АНК для a+A$\rightarrow$B и экстраполяционные значения астрофизического S-фактора в энергетической области окрестности гамовского пика вплоть до E= 0(сверхнизкие энергии).

2. Проанализированы по МДПМ современные прецизионно измеренные экспериментальные астрофизические *S*–факторы реакций прямых радиационных захватов $t(\alpha,\gamma)^7\mathrm{Li}$ и $^7\mathrm{Be}(p,\gamma)^8\mathrm{B}$ при низких энергиях. Количественно установлено, что эти реакции в исследуемой области энергии являются периферийными.

3. Получены экспериментальные значения АНК для $\alpha+t\rightarrow{}^7\mathrm{Li}$(осн.), $\alpha+t\rightarrow{}^7\mathrm{Li}$(0.478 МэВ) и $^7\mathrm{Be} + p \rightarrow {}^8\mathrm{B}$, а также экстраполяционные значения астрофизического *S*-фактора реакций $t(\alpha,\gamma)^7\mathrm{Li}$ и $^7\mathrm{Be}(p,\gamma)^8\mathrm{B}$ при сверхнизких энергиях.

4. Развит ММИВ для периферийной надбаръерной реакции передачи заряженной частицы A(x, y)B (x= y + *a*, B= A + *a*, где *a* – передаваемая частица) с приближенным учетом трехчастичных кулоновских эффектов в начальном, промежуточном и конечном состояниях.

5. Выполнен в рамках обобщенного ММИВ анализ экспериментальных дифференциальных сечений $^6\mathrm{Li}(^3\mathrm{He},d)^7\mathrm{Be}$, $^{13}\mathrm{C}(^3\mathrm{He},d)^{14}\mathrm{N}$ и $^{14}\mathrm{N}(^3\mathrm{He},d)^{15}\mathrm{O}$ при различных надбаръерных энергиях падающих ^{3}He-ионов и показано, что эти реакции являются периферийными, по крайне мере в области главного максимума углового распределения. Получена оценка вклада трехчастичной кулоновской динамики механизма передачи протона на извлекаемые значения АНК и их погрешности для $^6\mathrm{Li} + p \rightarrow {}^7\mathrm{Be}$, $^{13}\mathrm{C}+ p \rightarrow{}^{14}\mathrm{N}$ и $^{14}\mathrm{N} + p\rightarrow{}^{15}\mathrm{O}$.

6. Развит модифицированный двухчастичный *R*-матричный метод описания ядерно-астрофизической реакции $\mathrm{A}(a,\gamma)\mathrm{B}$ с корректным учетом вкладов прямого и резонансного радиационных захватов путем введения информации об АНК для $\mathrm{A} + a \rightarrow \mathrm{B}$ в прямой части амплитуды.

7. Выполнен в рамках развитого модифицированного *R*-матричного метода анализ экспериментальных астрофизических *S*-факторов реакций радиационных захватов $^6\mathrm{Li}(p,\gamma)^7\mathrm{Be}$, $^{12}\mathrm{C}(p,\gamma)^{13}\mathrm{N}$, $^{13}\mathrm{C}(p,\gamma)^{14}\mathrm{N}$ и $^{14}\mathrm{N}(p,\gamma)^{15}\mathrm{O}$ при низких энергиях, используя значения АНК для $^6\mathrm{Li} + p \rightarrow {}^7\mathrm{Be}$, $^{12}\mathrm{C}+ p \rightarrow {}^{13}\mathrm{N}$, $^{13}\mathrm{C}+ p \rightarrow {}^{14}\mathrm{N}$ и $^{14}\mathrm{N}+ p \rightarrow {}^{15}\mathrm{O}$. Определены новые экстраполяционные значения $S(E)$ и их погрешности для этих реакций при сверхнизких энергиях, вплоть до E=0

8. Получено новое значение и погрешности радиационной ширины первого резонансного (E^*=2.365 МэВ; J=1/2$^+$) состояния ядра ^{13}N, которое в 1.3 больше, чем общепринятое.

9. Рассчитаны скорости реакций $^{12}\mathrm{C}(p,\gamma)^{13}\mathrm{N}$ и $^{14}\mathrm{N}(p,\gamma)^{15}\mathrm{O}$ при звездных температурах ($0.01\leq T_9 \leq 10$, $T_9= 10^9$ K). Обнаружено, что скорость реакции $^{14}\mathrm{N}(p, \gamma)^{15}\mathrm{O}$ в окрестности гамовского пика (E_G= 30 кэВ или $T_9\approx$ 0.019 K) меньше в 1.8 раз, чем рекомендованная другими авторами. Сделан вывод, что горение водорода во внутренней части звезды посредством наиболее медленной реакции $^{14}\mathrm{N}(p, \gamma)^{15}\mathrm{O}$ CNO цикла происходит на самом деле еще медленнее в 1.8 раз.

10. Разработан трехчастичный метод описания реакции кулоновского развала ^{208}Pb(^{6}Li, $d\alpha$) ^{208}Pb. Определены экспериментальные значения АНК для $d + \alpha \rightarrow {}^{6}$Li, а также астрофизического S- фактора для реакции прямого радиационного захвата $d(\alpha,\gamma)^{6}$Li в восьми точках энергии для интервала $0.107 \leq E \leq 0.250$ МэВ и его экстраполяционные значения $0 \leq E \leq 0.107$ МэВ.

11. Развит микроскопический метод расчета интеграла перекрытия для зеркальных (^{12}B,^{12}N) ядер в (^{11}B + n) и (^{11}C + p) конфигурациях и асимптотических нормировочных коэффициентов для ^{11}B + $n \rightarrow {}^{12}$B и ^{11}C + $p \rightarrow {}^{12}$N в рамках трансяционно инвариантной многочастичной модели оболочки.

12. Показана чувствительность рассчитанных значений интегралов перекрытия внутренних волновых функций для зеркальных (^{12}B,^{12}N) ядер, АНК для отделения нейтрона/протона от ядра ^{12}B/^{12}N, среднеквадратичных радиусов и спектроскопических факторов для зеркальных (^{12}B, ^{12}N) ядер к видам использованных (V1, V2, M3Y(E), M3Y(R), M3Y(P) и M3Y(HJ)) NN потенциалов.

13. Определены значения АНК для ^{11}C + $p \rightarrow {}^{12}$N и астрофизического S фактора реакции прямого радиационного захвата ^{11}C(p,γ)^{12}N при сверхнизких энергиях для локального M3Y(E) NN-потенциала.

SCIENTIFIC COUNCIL DSc.30.05.2018.FM./T.65.01 ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF ION-PLASM AND LASER TECHNOLOGIES

INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS

IGAMOV SAYRAMBAY BADAMBAYEVICH

MODIFICATED TWO AND THREE PARTICLE METHODS OF THE CALCULATION OF RADIATIVE CAPTURE REACTIONS AT EXTREMELY LOW ENERGIES

01.04.08 –Physics of atomic nuclei and elementary particles. Accelaration technics

ABSTRACT OF DOCTORAL (DSc) DISSERTATION ON THE PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Tashkent – 2019

The subject of the doctoral dissertation (DSc) was registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan, reference number: B.2018.3.DSc.FM.125

The dissertation has been carried out at the Institute of Nuclear Physics Academy Sciences of Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.iplt.uz and on the website of "Ziyonet" informational and educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific consultant:	**Yarmukhamedov Rakhim** doctor of sciences in physics and mathematics, professor
Official opponents:	**Kanokov Zokirjon** doctor of sciences in physics and mathematics, dotsent
	Usmanov Pazlitdin Nuritdinovich doctor of sciences in physics and mathematics, dotsent
	Olimov Kosim doctor of sciences in physics and mathematics, professor
Leading organization:	**Al-Farabi Kazakh National University**

The defense of the dissertation will be held on "___" _____ 2019, at ___ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.30.05.2018.FM./T.65.01 at the Institute of Ion-Plasm and Laser Technologies (Address: 100125 Tashkent, Durmon yuli str. 33, tel. (+99871) 262-31-69, fax (+99871) 262-32-54; e-mail: info@iplt.uz).

The doctoral (DSc) dissertation can be looked through in the Information Resource Centre of the Institute of Ion-Plasm and Laser Technologies (registered under No.____) Address: 100125 Tashkent , Durmon yuli str. 33, tel. (+99871) 262-31-69.

The abstract of dissertation was distributed on "_____"_____2019.
(Registry record No. ____ dated "__" _____ 2019.)

Kh.B.Ashurov
Chairman of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
doctor of technical sciences, professor

D.T.Usmanov
Scientific Secretary of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
doctor of technical sciences, senior researcher

I.Nuritdinov
Chairman of the Scientific Seminar of the Scientific
Council on Award of Scientific Degrees,
doctor of physical and mathematical sciences, professor

INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

Topicality and necessity of the thesis. The development of modern branches of science and technology such as opto- and microelectronics, atomic and space technology, precision instrumentation is largely due to the latest achievements in the technology of obtaining high-purity substances. The production of such materials requires the continuous improvement of methods for studying their elemental composition. Therefore, the analytical methods used to control the purity of these materials should provide simultaneous determination of a large number of elements at a level of 10^{-7}-10^{-11} % and lower.

Neutron-activation analysis (NAA) holds a special place among methods for determining the micro-trace composition of high-purity substances. Low detection limits, the ability to simultaneously determination of large number of impurity elements from one sample, absence of blank correction, provides wide use of NAA in the analysis of pure substances. These NAA advantages make it possible to use it in the determination of low contents of rare, disseminated and noble metals in various technological materials.

Relevance of the research to the priority areas of science and technology development of the Republic of Uzbekistan. The dissertation research was carried out in accordance with the priority directions of science and technology development in the Republic of Uzbekistan II. "Energy, energy-saving and resource-management.

Review of international researches on the topic of dissertation. Studies on neutron-activation analysis, and particulary on radiochemical neutron-activation analysis of high-purity substances are conducted in several scientific centers of USA, France, Netherlands, Czech Republic, Hungary, China, Korea Republic, Russia, Ukraine, Kazakhstan and other.

In many of the scientific centers, the NAA method is used to study the composition of natural objects (soils, water, ore, geological samples), high purity Si, As, Ga, Ge, Sn, Cd, Te, Pb, and other substances.

Problem development status. The NAA method is used mainly in for analyzing of environmental objects. Mass spectrometric methods, especially mass spectrometry with inductively coupled plasma, are often used for the analysis of high-purity substances. However, for determining a number of elements in high-purity substances, NAA has advantages over all existing methods. In this regard, the development of NAA techniques for determining the microimpurity composition of high purity substances is an urgent problem.

Connection of the theme of dissertation with the scientific researches of the higher educational institution, where the dissertation was conducted. The work was carried out within the frames of scientific projects of the Institute of Nuclear Physics of the Republic of Uzbekistan and international grants of STCU.

The aim of the research is the creation of a set of techniques for instrument and radiochemical NAA of high purity Si, Ga, Zr, Pd, In, Te, Pt, U, the detection

and extraction of rare and noble metals from technological materials.

Tasks of the research are to developing of methods for radiochemical separation of macro and micro components, optimization of separation conditions and measurement of gamma activity.

The subject of the research is the separation of Ga, Zr, Pd, In, Te, Pt and U from impurity elements using highly effective concentration methods and highly sensitive neutron-activation determination of 20-42 impurity elements, extraction of palladium and osmium from technological materials.

The scientific novelty of the research is outlined as follows:

the techniques of extraction and extraction-chromatographic separation of macro-components (Ga, Zr, In, Te and U) and micro-quantities of a number of elements in the systems as TBP-HCl, TBP-HBr, TBP-HNO_3, D2EHPA-HCl, and D2EHPA-HNO_3 have been developed;

the methods of NAA of uranium in a combination of two types - radiochemical and preliminary concentration, were developed for the first time;

the techniques of radiochemical NAA of Pd and Pt for the first time which make it possible to determine 34 elements with DL of $n\cdot 10^{-4}$–$n\cdot 10^{-9}$% wt.;

optimal conditions for precipitation of palladium with the hydrazine hydrate from acidic solutions, allowing to extract palladium up to 98.2% with purity of 99.92% were selected;

the conditions for extraction of osmium from sulfuric waste solutions up to 95% by the distillation method and up to 72% by extraction chromatography method had been chosen.

The reliability of the research results is justified by the use of standard materials, modern methods and approaches on the γ and XRF spectrometry.

Scientific and practical significance of the research results. The scientific value of the results consists in developing a complex of NAA techniques for a number of high-purity substances using radiochemical separation.

The practical value of the work is in using the results for obtaining high-purity substances, radionuclides ^{68}Ge and ^{68}Ga

Application of the research results. The developed methods have been embedded in LLC Tezlatgich when manufacturing of cyclotron targets for the production of ^{68}Ge and ^{68}Ge/^{68}Ga radionuclide generator (Letter of the LLC Tezlatgich, 11.05.2018,) and for producing of high-purity Te (99.999%) in the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (Letter of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan 02.08.2018);

Approbation of the research results. Results of the dissertation were reported and discussed at 10 international and republican scientific conferences.

Publication of the research results. On the theme of the dissertation 33 scientific papers including 11 scientific articles, 8 of them in foreign scientific journals.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, six chapters, conclusion and reference list and has a total amount of 143 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (Part I; I часть)

1.Igamov S.B., R. Yarmukhamedov. Triple-differential cross -section of the $^{208}Pb(^{6}Li.\alpha d)^{208}Pb$ Coulomb breakup and astrophysical S-factor of the $d(\alpha,\gamma)^{6}Li$ reaction at extremely low energies // Nuclear Physics A.-Elsevier, 2000. –Vol. 673.- pp.509-525 (№2. Journal impact factor; IF =1.992)

2.Timofeyuk N.K., Igamov S.B. Direct capture contribution to the $^{11}C(p,\gamma)^{12}N$ reaction at astrophysical energies // Nuclear Physics A. - Elsevier, 2003. – Vol.713. - pp.217-228 (№2. Journal impact factor; IF =1.992)

3.Igamov S.B., Nadirbekov M.S., Yarmukhamedov R. Influence of the three – body coulomb effects on the values of asymptotic normalization coefficients (nuclear vertex constants) of astrophysical interest extracted from the modified dwba approach for the peripheral proton – transfer reactions // Physics of Atomic Nuclei. - Pleiades Publishing, 2007, -Vol. 70, №10.- pp.1694 – 1705 (№11. Springer; IF =0.524).

4.Igamov S.B., Yarmukhamedov R. Modified two –body potential approach to the peripheral direct capture astrophysical *a*+A→B+gamma reaction and asymptotic normalization coefficients // Nuclear Physics A.-Elsevier, 2007. – Vol.781.- pp. 247 - 276 (№2. Journal impact factor; IF =1.992)

5.Artemov S.V., Bajajin A.G., Igamov S.B., Nie G.K., Yarmukhamedov R.. Nuclear asymptotic normalization coefficients for 14N→13C+p configurations and astrophysical S factor for radiative proton capture // Physics of Atomic Nuclei.- Pleiades Publishing, 2008.- Vol.71, No 6.- pp. 998 – 1011 (№11. Springer; IF =0.524).

6.Igamov S.B., Yarmukhamedov R. Asymptotic normalization coefficients (nuclear vertex constants) for p+7Be→8B and the direct 7Be(p,gamma)8B astrophysical S factors at solar energies// Physics of Atomic Nuclei.- Pleiades Publishing, 2008.- Vol. 71, No.10.- pp.1740-1755(№11. Springer; IF =0.524).

7.Burtebaev N., Igamov S.B., Peterson R.J., Yarmukhamedov R., Zazulin D.M.. New measurements of the astrophysical S factor for 12C(p,gamma)13N reaction at low energies and the asymptotical normalization coefficient (nuclear vertex constant) for the p+12C→13N reaction.// Physics Review C.- The American Physical Society, 2008.- Vol.78, pp. 035802:1 -11 . (№40. Research Gate; IF =2.41).

8.Igamov S.B., Yarmukhamedov R. Erratum to “Modified two-body potential approach to the peripheral direct capture astyrophysical a+A→B +gamma reaction and asymptotic normalization coefficients.[Nucl.Phys.A781(2007) 247] //Nuclear Physics A – Elsevier, 2010.-Vol.832. – pp. 346-347 (№2. Journal impact factor; IF =1.992)

9. Yarmukhamedov R., Artemov S.V., Burtebaev N., Igamov S.B. Methods of determination of asymptotic normalization coefficients (nuclear vertex constants) A+a→B and their application to the A(α,γ)B asrtophysical S factors at solar energies// Uzbek Journal of Physics.- Tashkent (Uzbekistan), 2010.- Vol. 12(№4-6) .- pp. 233-247 (01.00.00. №5).

10. Artemov S.V., Igamov S.B., Tursunmakhatov Q.I., Yarmukhamedov R. Extrapolation of astrophysical S factors for the reaction 14N(p,gamma)15O to near-zero energies//Physics of Atomic Nuclei.- Pleiades Publishing, 2012.- Vol. 75, No 3.- pp. 291-309 (№11. Springer; IF =0.524).

11. Igamov S.B. Asymptotic Three-Particle Approach to the Coulomb Breakup Process 6Li +208 Pb →208 Pb + α + d// Physics of Atomic Nuclei.- Pleiades Publishing, 2017.- Vol. 80, No.2.- pp. 251–259. (№11. Springer; IF =0.524).

II бўлим (Part II; II часть)

12. Igamov S.B., Artemov S.V., Yarmukhamedov R., Burtebatev N., Sakuta S.B. Astrophysical S – factors for the reaction 6Li(p,g)7Be at ultralow energies (доклады 10-й международной конференции «Ядерная и радиационная физика» (8 – 11 сентября 2015 г., Курчатов, Казахстан), стр. 5-141.)//Вестник НЯЦ РК.- Алматы (Казахстан),2016 .- Том 65, №1.- С. 82-86

13. Igamov S.B., Yarmukhamedov R. Astrophysical S- factor for the T(alpha,gamma)7Li and 3He(alpha,gamma)7Be reactions// 2th Inter. Conf. "Nuclear and Radiation Physics", 7-10 June 2001.- Almaty (Kazakhistan),2001 - p. 69

14. Igamov S.B., Tursunmuratov T.M., Yarmukhamedov R. Nuclear vertex constant for the virtual decay $^{13}N \rightarrow p+^{12}C$ and astrophysical S - factor of the $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ reaction at extremely low energies // 3th Inter. Conf. "Nuclear and Radiation Physics, 7-10 June 2001. - Almaty (Kazakhistan), 2001. - p.5

15. Igamov S.B., Tursunmuratov T.M., Yarmukhamedov R. Model independent spectroscopic information from an analysis of peripherical direct radiative capture reaction and its application for an extrapolation of an astrophysical S- factor to stellar energies.// The 5th Inter. Conf. “Modern problems of the Nuclear Physics”. Book of abstracts.- Samarkand (Uzbekistan), 12-15 August 2003.- pp.101-102.

16. Artemov S.V., Igamov S.B., Nadirbekov M., Yarmukhamedov R., Yuldashev B.S., Zaparov E.A.. Calculation of the ^{14}N(p,γ)^{15}O astrophysical S-factor in frame of the R-matrix approach // Proc. 4th Inter. Conf. “Nuclear and Radiation Physics” September, 15-17, 2003. part I.- Almaty (Kazakhstan), 2003.- pp.106-120

17. Igamov S.B., Yarmukhamedov R. Model – independent spectroscopic information and the peropheral direct capture A(a,gamma)B reaction at stellar energies// 3th Inter. Conf. “Nuclear Science and Its Application”, October 5-8, 2004.- Tashkent (Uzbekistan).- p.35

18. Sanetullaev A., Igamov S.B., Yarmukhamedov R. Analysis of the 7Be(p,gamma)8B Reaction at Extremely Low Energies Within the Modified Two – Body Potential Approach// 3th Inter. Conf. "Nuclear Science and Its Application", October 5-8, 2004.- Tashkent (Uzbekistan).- pp.123-124

19. Igamov S.B., Yarmukhamedov R. Modified two – body potential approach to peripheral direct radiative capture T(alpha,gamma)^{7}Li and ^{3}He(alpha,gamma)^{7}Be reactions at stellar energies.// Book of abstracts, 18th International IOPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, August 21-26, 2006.- Santos-SP (Brazil), 2006. - pp.60-61.

20. Yarmukhamedov R., Artemov S.V., Burtebaev N.T., Igamov S.B. Asymptotic Normalization Coefficient (Nucler Vertex Constant) and Nuclear Astrophysical Problem// The 6th Inter. Conf. "Modern problems of the Nuclear Physics". Book of abstracts, September 19-22, 2006.- Tashkent (Uzbekistan), 2006.- pp.12

21. Burtebaev N., Igamov S.B., Peterson R.J., Yarmukhamedov R., Zazulin D. Asymptotic Normalization Coefficient for 12C+p→13N and the astrophysical S - factor of the 12C(p,gamma)13N reaction at stellar energies // 6th Inter. Conf. "Nuclear Science and Its Application" September 19-22 2006. - Tashkent, 2006. - pp.55-56

22. Artemov S.V., Bajajin A.G., Igamov S.B., Karakhodzaev A.A., Nie G.K., Zaparov E.A. Asymptotic Normalization Coefficients for the States of Nucleus ^{14}N and Astrophysical S –Factors for the ^{13}C(p,gamma)^{14}N Reaction // The 6th Inter. Conf. "Modern problems of the Nuclear Physics", September 19-22 2006: Book of abstracts. - Tashkent (Uzbekistan), 2006. - pp.94-95

23. Yarmukhamedov R., Artemov S.B., Burtebaev N., Igamov S.B. Asymptotic Normalization Coefficient (Nuclear Vertex Constant) and Nuclear Astrophysical Problem// The 4th Eurasian conference on Nuclear Science and its application. October 31 – November 3, 2006. - Baku (Azerbaijan), 2006. – pp.??

24. Burtebaev N., Igamov S.B., Peterson R.J., Yarmukhamedov R., Zazulin D. Asymptotic Normalization Coefficient for 12C+p→13N and the astrophysical S - factor of the 12C(p,gamma)13N reaction at stellar energies // The 4th Eurasian conference on Nuclear Science and its application. October 31 – November 3, 2006. - Baku (Azerbaijan), 2006. - pp.53

25. Артемов С.В., Игамов С.Б., Турсунмахатов К.И., Ярмухамедов Р.// Экстраполяция S-факторов реакции 14N(p,gamma)15O в область нулевых энергий//8-я международная конф. «Ядерная и радиационная физика» 20-23 сентября 2011, - Алматы (Казахстан), 2011. - С. 14

26. Igamov S.B., Artemov S. V., Yarmukhamedov R., Burtebayev N., Sakuta S.B.//The S(E) - factors for proton capture by ^{6}Li at the energies of astrophysical interest// «Ядро 2015. Новые горизонты ядерной физики, ядерной энергетики, фемто- и нанотехнологий»: LXV Международная конференция по ядерной физике, 29 июня — 3 июля 2015.- Санкт-Петербург (Россия), 2015. –С.14