

**ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ**  
**ХУЗУРИДАГИ 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 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 ..... 25

**Igamov Sayrambay**

Modified two- and three - particle methods of the calculation of the  
nuclear - astrophysical radiative capture reactions at extremely low  
energies ..... 47

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ  
List of published works..... 54

**ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ**  
**ХУЗУРИДАГИ 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 В2018.3.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](http://www.inp.uz)) ва «Ziynet» Ахборот таълим порталида ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) жойлаштирилган.

<b>Илмий маслаҳатчи:</b>	<b>Ярмухамедов Рахим</b> физика-математика доктори, профессор
<b>Расмий оппонентлар:</b>	<b>Каноков Зокиржон</b> физика-математика фанлари доктори, доцент <b>Усманов Пазлитдин Нуриддинович</b> физика-математика фанлари доктори, доцент <b>Олимов Косим</b> физика-математика фанлари доктори, профессор
<b>Етакчи ташкилот:</b>	<b>Ал-Форобий номидаги Қозоқ Миллий университети</b>

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](mailto: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. Нуриддинов**

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 Куёш 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,  $A(a,\gamma)B$  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 бўлмапти. Шу сабабли, ўта қуйи энергияларда кечаётган  $A(a,\gamma)B$  радиацион қамраш ядровий-астрофизик реакциялар кесимларининг юқори 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/Н) 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 периферияли сиртли узатиш  $A(x,y)B$  реакциялари (бунда  $x \rightarrow y+a$ ;  $a+A \rightarrow B$ ), ўта қуйи энергияда радиацион қамраш  $A(a,\gamma)B$  реакциялари кесимлари  $A + a \rightarrow B$  боғланган ҳолат тўлқин функциясининг асимптотик нормировка коэффициенти (АНК)ига тўғридан-тўғри боғлиқ эканлигидан иборат. Шундан келиб чиқиб, ушбу реакциялар кесимларини юқори аниқликда аниқлаш муаммолари АНКнинг 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 компьютерлашган 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 татбиқ этиш орқали ядровий реакциялар экспериментал услубиятларини такомиллаштириш, фундаментал катталиқ ҳисобланган АНКнинг юқори

аниқликдаги экспериментал қийматларини аниқлашнинг назарий усулларини ривожлантириш ва уларни енгил ядролар тузилиши масалаларига ҳамда замонавий ядровий-астрофизика ва космологиянинг муаммоларини ҳал этишга татбиқ 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<sup>1</sup> 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 Токио 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-Форобий номидаги Қозоқ Миллий университети (Қозоғистон), В.Г.Фесенков номидаги Астрофизика институтида (Қозоғистон) илмий ишлар олиб борилмоқда.

Енгил ядролар тузилиши, зарядланган заррачани сиртли узатиш ядровий жараёнлари механизмлари ҳамда қуйи ва ўта қуйи энергияларда радиацион

---

<sup>1</sup> 2017 йил, 7 февральдаги ПФ – 4947-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида» Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони

қамраш реакцияларининг 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 боғлиқлиги 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 АНКнинг 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 потенциал 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 Ал-Форобий 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 тадқиқотлар олиб борилмоқда: енгил ядролар учун АНК қийматлари учун микроскопик ҳисоблашлар, олинаётган натижаларнинг қўлланилаётган модел параметрларига сезгирлигини аниқлаш, АНКнинг 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. Discouvment), 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 бошқалар томонидан протоннинг сиртли узатиш реакциялари қуйи ва ўта қуйи энергияларда радиацион қамраш реакциялари бўйича бутун бир тадқиқот ишлари цикллари амалга оширилган. Аммо бу

ишларнинг аксарияти модели ёндашишларга бағишланган бўлиб, бундай ёндашишлар енгил ядролар учун АНКнинг 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 АНКнинг 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 модели яқинлашишлар ишлатилган (С.В. Дубовиченко, D. Baye, P. Discouvement ва бошқалар). Ҳар хил моделлар ва ёндашишлар доирасида амалга оширилган таҳлил натижалари ўзаро катта ички четлашишлар 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 (А.М. Mukhamedzhanov, P.E. Tribble) ёки микроскопик моделдаги (D. Baye, P. Discouvement) таҳлилидан олинган АНК қийматлари билан ўта қуйи энергияларда ҳисобланган  ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$  тўғри радиацион қамраш реакцияси астрофизик  $S$ -фактор қийматлари бу катталиқнинг замонавий прецизион экспериментал қийматларидан ё ошиб кетган, ё пастлаб кетган. Шундан келиб чиқиб, кўрилаётган сиртли жараёнларда уйғониш назариясига биноан поляризация потенциаллар қатори ёйилмасида юқори (иккинчи ва ундан кейинги) ҳадлар ҳиссаларини инобатга олиш ҳамда ядровий реакцияларни АНК билан параметризациялашни физик жараёнларга тўғри мослаш билиш мақсадга мувофиқ 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 периферияли реакцияларининг асимптотик назариясини ва ядро тузилишини ҳисоблашнинг мувофиқлаштирилган методини яратиш» (2003-2007); ФА-Ф2-Ф077 «Ядровий астрофизикада қуйи ва ўта қуйи энергияларида ядролар ва периферияли 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 АНКнинг 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  $t(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$  ва  $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$  тўғри радиацион қамраш реакциялари астрофизик  $S$ -факторлари бўйича олинган замонавий прецизион экспериментал маълумотларни ( $S^{\text{exp}}(E)$ ) МИЗПУ доирасида таҳлилни амалга ошириш,  $\alpha + t \rightarrow ^7\text{Li}$  ва  $^7\text{Be} + p \rightarrow ^8\text{B}$  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;

МБТУни  $^6\text{Li}(^3\text{He}, d)^7\text{Be}$ ,  $^{13}\text{C}(^3\text{He}, d)^{14}\text{N}$ ,  $^{14}\text{N}(^3\text{He}, d)^{15}\text{O}$  реакцияларининг дифференциал кесимларининг эксперимент натижалари таҳлиliga қўллаш орқали  $^6\text{Li} + p \rightarrow ^7\text{Be}$ ,  $^{13}\text{C} + p \rightarrow ^{14}\text{N}$  ва  $^{14}\text{N} + p \rightarrow ^{15}\text{O}$  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 амплитудадаги ҳиссасини аниқ ҳисобга олиш орқали ривожлантириш ва резонанс ҳолат орқали кечадиган  $^6\text{Li}(p,\gamma)^7\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$ ,  $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$  ва  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$  реакцияларнинг астрофизик  $S$ -факторларининг қуйи энергиялардаги экспериментал қийматларни таҳлилларини амалга ошириш. АНКнинг  $^6\text{Li} + p \rightarrow ^7\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C} + p \rightarrow ^{13}\text{N}$ ,  $^{13}\text{C} + p \rightarrow ^{14}\text{N}$  ва  $^{14}\text{N} + p \rightarrow ^{15}\text{O}$  лар учун қийматларидан фойдаланиб, ўта қуйи энергияларда астрофизик  $S$ -фактор қийматлар ва уларнинг хатоликларини ҳамда юлдуз муҳити ҳароратлари учун ( $0.01 \leq T_9 \leq 10$ ,  $T_9 = 10^9$  К) кўрсатилган реакциялар тезлигини аниқлаш;

кўп зарядли  $^{208}\text{Pb}$  ядросининг Кулон майдонида тўғри  $^6\text{Li} \rightarrow \alpha + d$  парчаланиш реакциясини сўнги ҳолатдаги уч заррали кулон эффектларини инобатга олган ҳолда ҳисоблашнинг асимптотик усулини ишлаб чиқиш,  $\alpha + d \rightarrow ^6\text{Li}$  учун АНК қийматларини аниқлаш, олинган АНК қийматларини

$d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$  реакция астрофизик  $S$ -факторининг ўта қуйи энергияларда ҳисоблаш учун қўллаш;

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

$^{11}\text{C} + p \rightarrow ^{12}\text{N}$  учун АНКнинг ҳисоблаб топилган қийматлари билан ўта қуйи энергияларда  $^{11}\text{C}(p, \gamma)^{12}\text{N}$  тўғри радиацион 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:

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

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

моделга тааллуқсизликка асосланган аниқлашнинг модификацияланган икки заррачали потенциал усули доирасида АНКнинг экспериментал қийматларини аниқлаш ишлаб чиқилган;

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

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

$^6\text{Li}(p, \gamma)^7\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$ ,  $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$ ,  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  реакцияларининг  $0 \leq E \leq 25$  кэВ энергиялар учун астрофизик  $S$ - факторлари, охиридаги учта реакция

учун  $0.01 \leq T_9 \leq 10$  харорат оралиғи реакция тезликлари ҳамда  $^{13}\text{N}$  ядросининг (2.365 МэВ;  $1/2^-$ ) резонанс ҳолати учун радиацион  $\gamma$ -кенглиги аниқланган;

юлдузлар бағрида водород ёнишининг CNO-цикли энг султ  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  реакцияси орқали ёниши қабул қилингандан яна 1.8 марта секин бўлиши аниқланган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

$\alpha + d \rightarrow ^6\text{Li}$  учун АНКнинг экспериментал қийматлари ва  $0 \leq E \leq 100$  кэВ энергияларда  $d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$  реакцияси астрофизик  $S$ -факторининг қийматлари аниқлаш мақсадида  $^{208}\text{Pb}(^6\text{Li}, \alpha d)^{208}\text{Pb}$  кулон парчаланишининг уч карра дифференциал кесимини уч заррачали таҳлил усули ишлаб чиқилган;

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

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

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

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

ўта қуйи энергияларда  $^{11}\text{C}(p, \gamma)^{12}\text{N}$  реакцияси астрофизик  $S$ - факторининг қийматлари аниқланган.

**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 аҳамияти.** 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 татбиқ 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 Куёш нейтрино оқимини 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,  $\alpha + t \rightarrow {}^7\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B}$  ва  ${}^6\text{Li} + p \rightarrow {}^7\text{Be}$  АНКлари) ва сиртли узатиш ҳамда радиацион қамраш реакциялари кесимларининг янги қийматлари Италия, Венгрия, Польша, Япония, Қозоғистон ва Ўзбекистон илмий марказлари тезлатгичларида янги прецизион экспериментлар қўйилишларига сабаб бўлди ва бўлиб келмоқда.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Ўта куйи 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, оралик ва сўнги ҳолатларда перифериал 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 куйи энергияларда  $A(a,\gamma)B$  тўғри радиацион қамраш ядровий-астрофизик реакциясини ифодалаш учун янги модификацияланган икки заррачали потенциал усули (МИЗПУ) ҳамда  $A(a,\gamma)B$  резонанс радиацион қамраш ядровий-астрофизик реакциясини ифодалашнинг резонанс ва тўғри радиацион қамрашларини,  $A + a \rightarrow B$  АНКи ҳақидаги маълумотдан фойдаланган ҳолдаги ривожлантирилган модификацияланган  $R$ -матрицали усули Ўзбекистон Миллий университети ЭГ-2 электрон тезлатгичида 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  ${}^{12}\text{C}$  ва  ${}^{16}\text{O}$  ядролари билан қамраши бўйича янги эксперимент натижалари

олишга ҳамда протоннинг  $^{12}\text{C}$  ва  $^{14}\text{N}$  ядролари томонидан радиацион қамраш ядровий-астрофизик реакциялари тезлигини аниқлашга имкон берган;

$^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$  радиацион қамраш реакцияси астрофизик  $S$ -фактор бўйича олинган натижалар халқаро олимлар томонидан қиёслаш таҳлилларини олиб боришда ишлатилган (ҳавола этилган хорижий илмий журналлар: 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) Олинган натижалар Куёш қаърида ва массив юлдузларда юз берадиган  $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$  реакция тезлигини аниқлаш бўйича маълумотлар базасини бойитишга хизмат қилган.

**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 комиссиясининг 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 очиқ берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Модификацияланган икки заррачали потенциал услуги**» номли биринчи бобида  $t(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$  ва  $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$  реакциялар ҳақида адабиётларнинг қисқа обзори ҳамда бошқа авторлар томонидан олинган натижаларнинг батафсил критик таҳлили келтирилган. Шунингдек,  $A(\alpha,\gamma)\text{B}$  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  $A+\alpha\rightarrow\text{B}$  учун АНК квадрати ( $S^2$ )нинг 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  $(A+\alpha)$ -боғланган ҳолат бир заррачали қобик тўлқин функцияси

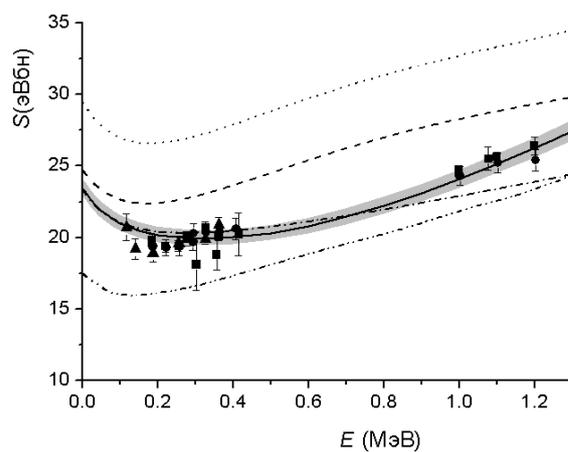
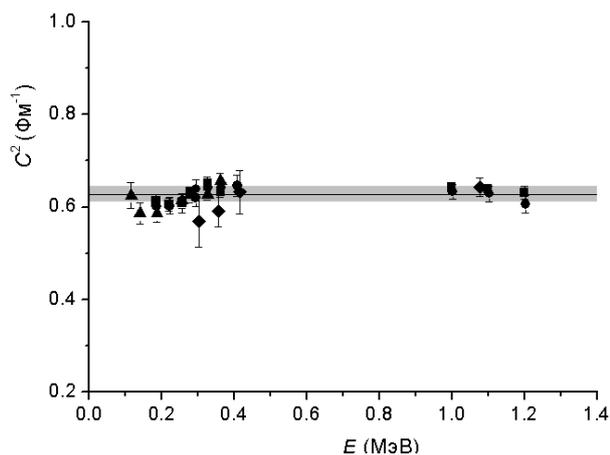
«думи»нинг амплитудасини белгилайди. У Вудс-Саксон потенциали геометрик параметрлари (радиус  $r_0$  ва диффузиялангани  $a$ ) га ўта тобе бўлиб, модели параметр ҳисобланади. МИЗПУ да иккита шарт шаклланган бўлиб: 1)  $R(E,b) = \text{const}$  ҳолати  $E$  нинг бирор-бир қотирилган қийматида  $b$  нинг ҳар қандай вариацияси учун сақланиши керак; 2)  $C = S(E)/R(E,b)$  нисбат  $b$  нинг ҳамда  $E$  нинг ўзгаришига тааллуқсиз бўлиши керак.

Шу икки шартнинг бажарилиши  $E=E_i$  ( $i=1,2, \dots N$ ) экспериментал энергиялар учун  $(C_i^{\text{exp}})^2 = S^{\text{exp}}(E_i)/R(E_i,b)$  ифода ёрдамида АНКнинг моделга тааллуқсиз экспериментал қийматларини аниқлашга, уларнинг ўртача қийматидан фойдаланиб,  $S(E) = (C^{\text{exp}})^2 R(E,b)$  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  $t(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$  ва  ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$  реакциялар учун ўта юқори аниқликда бажарилиши аниқланган.  $t+\alpha \rightarrow {}^7\text{Li}$  (асосий),  $t+\alpha \rightarrow {}^7\text{Li}$  (0.478 МэВ) ва  ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B}$  лар учун АНКнинг экспериментал қийматлари ҳамда астрофизик  $S$ -факторнинг ўта қуйи энергияларда қийматлари хатоликлари билан биргаликда аниқланди. Бу қийматлар  $t+\alpha \rightarrow {}^7\text{Li}$  (асосий) ва  $t+\alpha \rightarrow {}^7\text{Li}$  (0.478 МэВ) лар учун мос равишда  $(C^{\text{exp}})^2 = 12.74 \pm 1.10$  ва  $9.00 \pm 0.90$  Фм<sup>-1</sup> ҳамда  ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B}$  учун  $(C^{\text{exp}})^2 = 0.626 \pm 0.017$  Фм<sup>-1</sup> тенг бўлиб чиқди. Астрофизик  $S$ -факторнинг  $E=0$  ва 20 кэВ (гамов пики)лардаги қийматлари  $t(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$  реакция учун  $S(0) = 0.0974 \pm 0.010$  кэВ·бн и  $S(20 \text{ кэВ}) = 0.0944 \pm 0.010$  кэВ·бн,  ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$  реакция учун  $S(0) = 23.35 \pm 0.65$  эВ·бн и  $S(20 \text{ кэВ}) = 22.65 \pm 0.63$  эВ·бн тенг бўлди. Олинган натижалар илмий адабиётларда берилган бошқа натижалар билан солиштирилган.

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

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



1-расм. Чапда –  ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B}$  учун  $E=E_i$  ( $i=1,2, \dots, N$ )да топилган АНК экспериментал қийматлари келтирилган. Тўғри чизик ва тасма кенглиги орқали АНКнинг ўртача қиймати ва уни топиш хатолиги берилган. Ўнгда –  ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$  реакция учун ҳисобланган астрофизик  $S$ -фактори  $S(E)$ нинг қийматлари келтирилган. Узлуксиз эгри чизик ва тасма кенглиги астрофизик  $S$ -факторнинг ўртача қиймати ва уни топиш хатолигини билдиради, пунктир чизиклар ва штрих чизиклар [Phys. Rev. C 70, 065802 (2004)] ишда Белгия олими Р. Descouvemont томонидан микроскопик ҳисоблаш доирасида NN потенциалларнинг Волков(V2) ва Миннесота(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 Н. М. Xu, ва бошқ.[Phys. Rev. Lett. 73, 2027 (1994)] томонидан ҳисобланган натижалар. Эксперимент натижалар А. R. Junghans, ва бошқ.[ Phys. Rev. Lett. 88, 041101 (2002)] ҳамда L. T. Baby, ва бошқ [Phys. Rev. C67 (2003) 065805] ишларидан келтирилган.

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  $a$  – узатилаётган заррача) зарядланган заррачани узатиш перифериал 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  $\cos\theta$  ўзгарувчи бўйича аналитик хоссаларидан келиб чиқиб, бурчак тақсимот бўйича бош максимум учун дифференциал кесим (ДК) ифодаси қуйидаги кўринишда олинди:

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

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

Мазкур бобда  ${}^3\text{He}$  ионларининг  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{12,13}\text{C}$  ва  ${}^{14}\text{N}$  ядролари билан барьер усти энергияларда бомбардимон қилганда сўнги ядронинг боғланган ва бўсаға ости ҳолатларига протон узатиш периферал реакциялари ДК экспериментал қийматларининг таҳлили натижалари келтирилган. (1) ифодадаги эркин параметрлар бўлмиш  $b_B$  ва  $b_x$  ( $x = {}^3\text{He}$ )ларини вариация қилиш орқали АНК ( $C_{Ap}^2$ )ни аниқлашнинг моделга тааллуқсиз йўлини топиш шарт-шароитлари муҳокама қилинган. АНК ( $C_{Ap}^2$ )нинг янги қийматлари аниқланган, уч заррачали кулон эффектларининг таъсири микдорий баҳоланган. Кўрсатилдики, уч заррачали кулон эффектларининг олинаётган АНК қийматига таъсири сезиларли бўлиб, 26% - 50% ( $|R_a|^2 = 1.26 - 1.50$ ) оралиқда ҳосил бўлаётган ядро турига қараб ўзгариши мумкин. Таҳлиллар БТУ «post»-яқинлашишни, уч заррачали кулон эффектларини ҳисобга олмасдан, протон узатиш периферал реакцияларини таҳлил қилиб,  $A + p \rightarrow B$  АНКнинг 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  $A(a, \gamma)B$  радиацион қамраш реакциясини ифодалашнинг модификацияланган  $R$ -матрица усулининг асосий ғояси ва бандлари баён этилган. Оралиқ ҳолатда  $B^*$  резонанс орқали борадиган  $A + a \rightarrow B^* \rightarrow B + \gamma$  реакция механизмига жавоб берадиган  $M_{\alpha\beta}^{(R)}(E)$  кутбий амплитуданинг ички ( $0 \leq r \leq r_C$ ,  $r_C$  – канал радиуси) ички соҳадаги ҳиссасини аниқлаш учун бир сатхли  $R$  – матрицали яқинланиш ишлатилган.

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

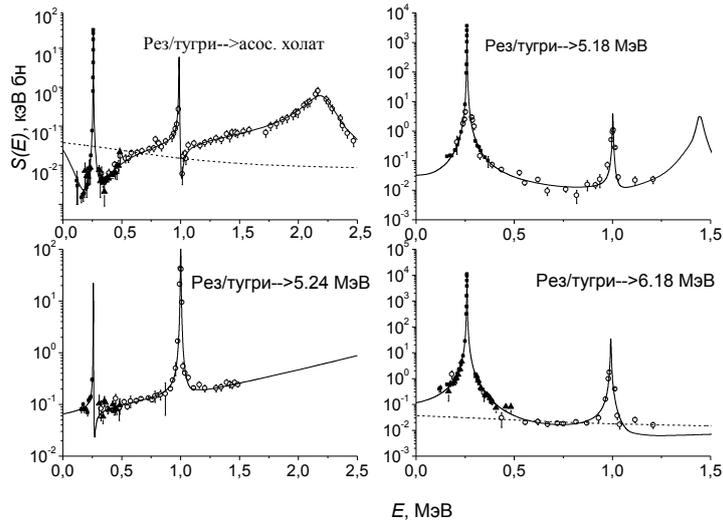
боғланган бўлиб, қўшимча Томас энергетик силжишини ҳам ўз ичига олади. Ҳисобларда  $\gamma_{\lambda;\beta}^{\gamma}$  (int) мослаштирувчи параметр деб олинади,  $\gamma_{\lambda;\beta}^{\gamma}$  (ext) эса  $A + a \rightarrow B$  АНК билан параметрланган аниқ аналитик ифода орқали ҳисобланади.  $a$  заррача ва  $\gamma$ -радиацион кенгликлар экспериментал қийматлари мос равишда  $\Gamma_{a;\alpha}^{\text{exp}} = |\Gamma_{\alpha}^a(E_{\lambda}^{(R)})|$  и  $\Gamma_{\gamma;\beta}^{\text{exp}} = |\Gamma_{\lambda;\beta}^{\gamma}(E_{\lambda}^{(R)})|$  каби аниқланади.

Амплитуданинг тўғри радиацион қамраш қисми қуйида берилган:

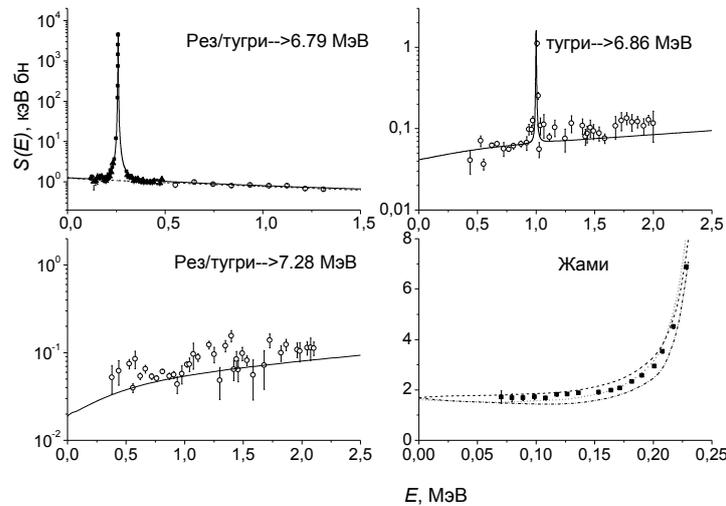
$$I_{l_f L l_i} = C_{Aa;l_f l} \int_{r_{ch}}^{\infty} dr r^{L-\nu} W_{-\eta_f; l_f+1/2}(2\kappa r) [I_{l_i}(r) - e^{2i\delta_l^{(HS)}} O_{l_i}(r)], \quad (2)$$

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

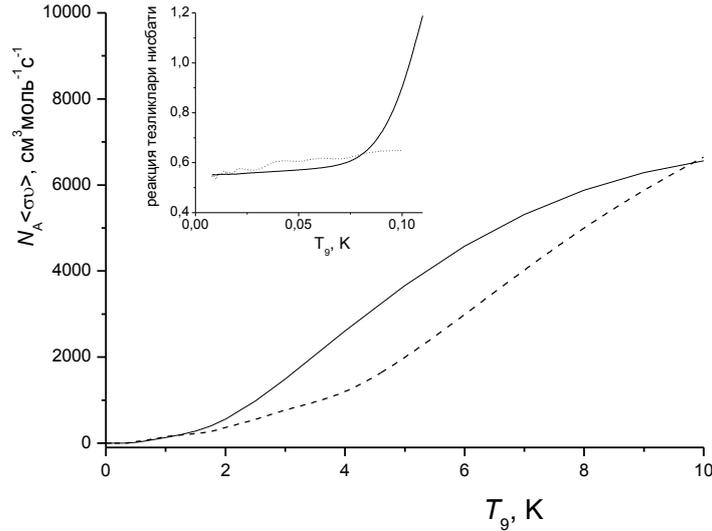
Қуйи энергияларда протоннинг  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{12,13}\text{C}$  ва  ${}^{14}\text{N}$  ядролари томонидан қамралиш реакцияси астрофизик  $S$ -факторлари экспериментал қийматларни модификацияланган  $R$ -матрицали усул доирасида таҳлили натижалари келтирилган. Таҳлил диссертациянинг иккинчи бобида олинган  $A + p \rightarrow B$  АНКнинг қийматларини фойдаланиб амалга оширилди, протон парциал кенгликлар қийматлари бошқа ишлардан олинди.  $r_C$  ва  $\gamma_{\lambda;\beta}^{\gamma}$  (int) (ёки  $\Gamma_{\gamma;\beta}^{\text{exp}}$ ) мустақил параметрлар бўлиб, уларнинг қийматлари ҳисобланаётган астрофизик  $S$ -факторларининг эксперимент натижаларига  $\chi^2$  усул ёрдамида мослаштириш орқали аниқланади. Шу йўсинда  $\gamma$ -радиацион кенглик  $\Gamma_{\gamma;\beta}^{\text{exp}}$  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  ${}^{14}\text{N}(p,\gamma){}^{15}\text{O}$  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:  ${}^{12}\text{C}(p,\gamma){}^{13}\text{N}$  реакция учун –  $S(0) = 1.62 \pm 0.20$  кэВ бн ва  $S(25 \text{ кэВ}) = 1.75 \pm 0.22$  кэВ бн,  ${}^{13}\text{N}$  (2.365 МэВ)  $\rightarrow$   ${}^{12}\text{N}$ (осн.) +  $\gamma$  радиацион кенглиги  $\Gamma_{\gamma;\beta}^{\text{exp}} = 0.65 \pm 0.07$  эВ;  ${}^{14}\text{N}(p,\gamma){}^{15}\text{O}$  реакция учун –  $S(0) = 1.13$  кэВ бн ва юлдузлар бағрида водороднинг ушбу реакция орқали ёниши, аслида умумқабул қилинганидан яна 1.8 марта секин кечади;  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  реакция учун –  $S(0) = 70.2 \pm 12.0$  эВбн, парциал протон резонанс кенглиги  $\Gamma_p \approx 50$  кэВ.



2 - расм.  $^{15}\text{O}$  ядросининг қуйи тўрта боғланган ҳолатларга ўтиш  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$  реакцияси 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. Schröder 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.



3 - расм.  $^{15}\text{O}$  ядросининг қуйи тўрта боғланган ҳолатларга ўтиш  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$  реакцияси 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. Schröder 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 келтирилган; штрих, пунктир ва штрих пунктир чизиқлар мос равишда [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.  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$  реакция тезлиги. Узлуксиз чизик – бизнинг натижамиз, штрих чизик – [C.Angulo, M.Arnould et al., Nucl.Phys. A656, 3 (1999)] натижаси. Қўшимча расмда ушбу ишда олинган (узлуксиз чизик) ва [А. М. Mukhamedzhanov, P. Bem, В. А. Brown, et al., Phys. Rev. C67, 065804 (2003)] да олинган натижаларнинг (пунктири чизик) [C.Angulo, M.Arnould et al., Nucl.Phys. A656, 3 (1999)] маълумотлар базасидан келтирилган натижаларга нисбати келтирилган.

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

$\Psi_{k;p}^{(-)*}(\mathbf{r}, \rho)$  ва қопланиш интегралли  $I_{ad}(\mathbf{r})$ нинг радиал қисмларини кўрилайтган кинематика учун ( $r/\rho \ll 1$ ) асимптотик ифодалари билан алмаштириш мумкин бўлади. УЗКТФ асимптотикасининг қўлланиши кўп зарядли  $^{208}\text{Pb}$  ион кулон майдонининг парчаланишда ҳосил бўлган фрагментларнинг нисбий ҳаракатига таъсирини ифодалайдиган уч заррачали «post acceleration» кулон эффектини ҳисобга олишга йўл очиб беради. Шунини айтиб ўтиш жоизки, «post acceleration» эффекти – бу экспериментда реакция натижаларининг фрагментлар нисбий тезлигига боғлиқлик графигининг фрагментлар жойини алмашганда яққол кўзга ташланадиган асимметрияси кўринишдаги физик ҳодисадир. Бунга сабаб, кўп заряди кулон майдонида зарядининг массасига нисбати турлича бўлган фрагментлар турлича тезланишади. Бу ҳодиса ушбу кулон майдони мўлжал ядронинг ядровий тортиш таъсиридан қанчалик холис бўлса, шунчалик яққол амалга ошади. П1 яқинлашишда «post acceleration» эффекти эксперимент кинематикасининг қанчалик тоза кулон парчаланиш (ТКП)га жавоб беришлигининг асосий шартини қилиб олинган.

УЗКТФнинг ишлатилиши реакция уч қаррали дифференциал кесимини (УКДК) қуйидаги параметрланган кўринишда олишга имкон беради:

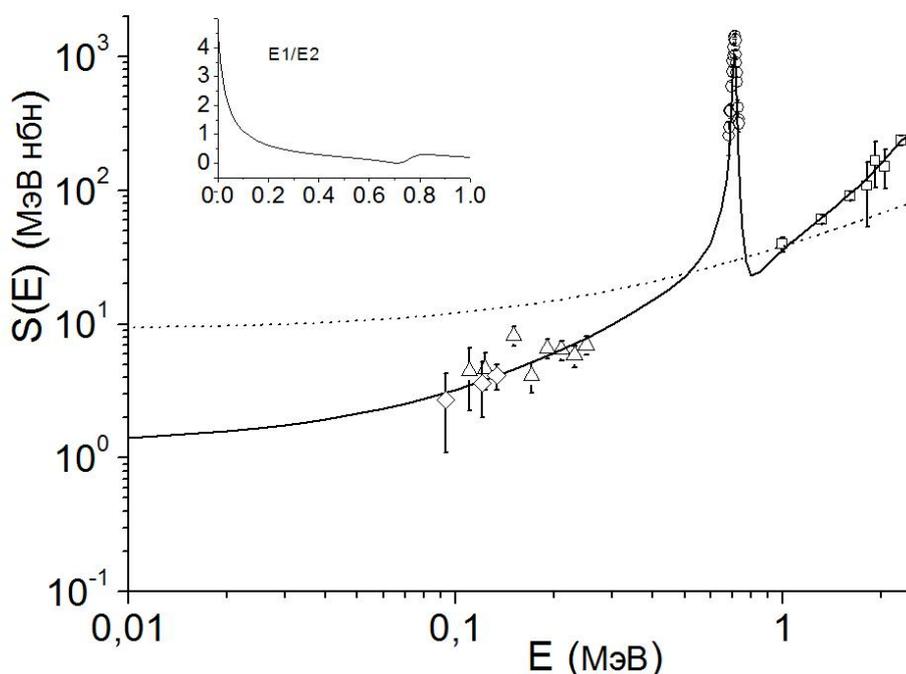
$$\frac{d^3\sigma}{d\Omega_{Li}d\Omega_{ad}dE_{ad}} = C_{ad}^2 \frac{d^3\tilde{\sigma}}{d\Omega_{Li}d\Omega_{ad}dE_{ad}}, \quad (3)$$

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

П1 яқинлашишдаги  $E_{Li} = 156$  МэВ ва  $\theta = 4^\circ$  кинематика учун ( $b=33.4$  Фм) ҳисобланган УКДК қийматлари ва ҳар бир эксперимент энергиялари учун олинган АНКнинг экспериментал қийматлари ва уларнинг экспериментал натижалар билан таққослангани келтирилган. Таҳлил натижалари ушбу реакция кинематикасининг ТКП шартига тўлиқ жавоб беришлигини кўрсатди. АНКнинг ўртача қиймати  $(C_{ad}^{\text{exp}})^2 = 6.72 \pm 0.73$  Фм<sup>-1</sup> тенг деб аниқланган. Бу қиймат адабиётларда қуйи энергияларда  $da$ -сочилиш фазасини ўлчаш орқали топилган  $(C_{ad}^{\text{exp}})^2 = 5.37 \pm 0.26$  Фм<sup>-1</sup> қийматдан фарқли бўлиб чиқди. П1 яқинлашиш  $\theta = 3^\circ$  учун олинган УКДК нинг экспериментал қийматларини 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  $\theta = 4^\circ$  кинематика учун олинган қийматдан анча фарқли бўлиб чиқди. Ушбу бобда П2 яқинлашиш доирасида  $\theta = 3^\circ$  бурчак учун олинган натижалар ҳам келтирилган. Ҳисоблар шунини кўрсатдики, ушбу кинематика учун, қайсики, снаряд ядронинг парчаланиши унинг мўлжал ядро билан ядровий ўзаро таъсир чегарасида ( $\rho_{\text{min}} = 12.4$  Фм) юз берганда, етарлича тор энергия оралиғида ( $107 \leq E_{ad} \leq 250$  кэВ)  $d$  ва  $\alpha$

фрагментлар ўзаро нисбий ҳаракатига ушбу таъсирни ҳисобга олмаса бўлар экан. Бироқ  $E_{\text{ad}}$  ошиб борганда ушбу таъсирнинг ҳиссаси ҳам ошиб борар экан.

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



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

Нукталар: учбурчаклар –  $\theta = 3^\circ$  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)]. Эгри чизиклар: узлуксиз – АНКнинг  $C_0^2(3^\circ) = 5.2 \pm 0.5$   $\text{Фм}^{-1}$  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.

Ушбу бобда П1 ва П2 яқинлашларда олинган АНК қийматлардан фойдаланиб, ўта қуйи энергияларда  $d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$  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:  $E_{ad} = 80, 93, 120$  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.  ${}^6\text{Li}$  ядроси биринчи ( $3/2^-$ ,  $0.71$  МэВ) резонанс ҳолатига  $\alpha$ -канал ва  $\gamma$ -радиацион резонанс кенгликларининг қийматлари аниқланган. Бу қийматлар бошқа авторлар адабиётларда келтирган натижалари билан мос келди. 5-расмда  $d(\alpha, \gamma){}^6\text{Li}$  тўғри қамраш реакцияси астрофизик  $S$ -факторининг топилган экспериментал қийматлари ва унинг ўта паст энергиялар соҳасига экстраполяцияси келтирилган.

« $({}^{12}\text{B}, {}^{12}\text{N})$  акс-тасвир ядролар  $({}^{11}\text{B} + n)$ - ва  $({}^{11}\text{C} + p)$ -конфигурациялари учун тўлқин функцияларнинг қоплаш интегралларини ҳамда  ${}^{11}\text{B} + n \rightarrow {}^{12}\text{B}$  ва  ${}^{11}\text{C} + p \rightarrow {}^{12}\text{N}$  АНКларини микроскопик ҳисоблаш усули» номли бешинчи бобда « $({}^{12}\text{B}, {}^{12}\text{N})$  акс-тасвир ядролар  $({}^{11}\text{B} + n)$ - ва  $({}^{11}\text{C} + p)$ -конфигурациялари учун қоплаш интегралларини ҳамда  ${}^{11}\text{B} + n \rightarrow {}^{12}\text{B}$  ва  ${}^{11}\text{C} + p \rightarrow {}^{12}\text{N}$  АНКларини  ${}^{11}\text{C}$  ва  ${}^{11}\text{N}$  ядроларининг қобиклар моделида олинган кўп заррачали тўлқин функциялари ёрдамида микроскопик ҳисоблаш усули ривожлантирилган.

Қоплаш интеграллари радиал қисми  $I_{lj}(r)$ нинг турли кўринишдаги самарали NN потенциаллар учун иккинчи тартибли бир жинсли бўлмаган дифференциал тенгламаси олинган, бунда  $l$  ва  $j$  –  ${}^{11}\text{B}$  /  ${}^{12}\text{N}$  ядролардаги «валент» нейтрони/протонининг орбитал ва тўла бурчак моментлари ( $l = 1, j = 1/2$  ва  $3/2$ ).  $A + N \rightarrow B$  ( ${}^{12}\text{B}$  ёки  ${}^{12}\text{N}$ ) АНКи учун яққол ифодаси олинган. АНК ифодасини олишда  ${}^{11}\text{B}$  ва  ${}^{12}\text{B}$  ҳамда  ${}^{11}\text{C}$  ва  ${}^{12}\text{N}$  ядроларнинг трансляцион инвариант тўлқин функцияларининг  ${}^{11}\text{B}$  ва  ${}^{11}\text{C}$  ўзак нуклонларини орасидаги антисимметризацияни ҳисобга оладиган осциллятор қобик модели базис ҳолатлари  $|\text{AN}_{\min}[f](\lambda\mu)\beta\text{LST}\rangle$  бўйича ёйилмаси қўлланилган.  ${}^{11}\text{B} + n \rightarrow {}^{12}\text{B}$  ва  ${}^{11}\text{C} + p \rightarrow {}^{12}\text{N}$  АНК ( $C_{ij}$ )лари,  ${}^{12}\text{B}$  ва  ${}^{12}\text{N}$  ядроларининг  $({}^{11}\text{B} + n)$ - ва  $({}^{11}\text{C} + p)$ -конфигурациялари учун ўртача квадратик радиус (ў.к.р.) ( $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ ), спектроскопик фактори (СФ) ( $Z_{ij}$ ) NN потенциалларнинг 6 та тури, иккита Волков потенциаллари (V1 ва V2), тўрта МЗҮ (МЗҮ(R), МЗҮ(HJ), МЗҮ(P) ва МЗҮ(E)) учун ҳисоблаб топилди. Олинган натижалар келтирилган. Шу нарса аниқландики,  $C_{ij}$ ,  $\langle r^2 \rangle^{1/2}$  ва  $Z_{ij}$  ларнинг ҳисобланган қийматлари NN потенциалларнинг турига ўта таъсирчан экан. Шунга карамай,  $({}^{12}\text{B}, {}^{12}\text{N})$  акс-тасвир ядроларнинг АНКларининг нисбатлари қўлланилаётган самарали NN потенциалларнинг турига деярли бефарқ (10% чегарада) бўлиб чиқди,  ${}^{11}\text{B} + n \rightarrow {}^{12}\text{B}$  ва  ${}^{11}\text{C} + p \rightarrow {}^{12}\text{N}$  АНКларининг абсолют қийматларига келсак, бошқа авторлар томонидан аниқланган АНКнинг экспериментал қийматларига энг яқин натижани МЗҮ(E) потенциаллари берди. Шу сабаб, мазкур потенциал ( ${}^{12}\text{B}, {}^{12}\text{N}$ ) ядроларнинг  $({}^{11}\text{B} + n)$ - ва  $({}^{11}\text{C} + p)$ -конфигурациялари СФ ларини ҳисоблаш учун ишлатилди.  ${}^{12}\text{B}$  ядроси учун ҳисобланган СФ унинг экспериментал қийматида 28 % га кам чиқди. Бундай фарқ сабаблари ўрганилаёпти. Самарали МЗҮ(E) NN потенциаллари учун олинган АНКнинг ёрдамида

$^{11}\text{C}(p,\gamma)^{12}\text{N}$  тўғри радиацион қамраш реакцияси астрофизик  $S$ -факторининг  $E=0$  энергиядаги  $S(0)$  қийматлари аниқланди. Бунда олинган натижалар бошқа авторлар томонидан  $^{12}\text{N}$  ядросининг  $^{11}\text{C}$  ва  $p$  фрагментларга кулон парчаланиш экспериментидан олган  $S(0)$  қийматларидан деярли уч марта катта булиб чиқди. Бундай фарқнинг сабаблари ўрганилаёпти. Кулон парчаланиш реакциясини ифодалашда, 4-бобда қараб 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  $A(a,\gamma)B$  тўғри радиацион қамраш ядровий-астрофизик реакциясини ифодалаш учун янги модификацияланган икки заррачали потенциал усули (МИЗПУ) ишлаб чиқилди. Ушбу усул  $a+A\rightarrow B$  учун АНКнинг экспериментал қийматларини ва  $A(a,\gamma)B$  реакция астрофизик  $S$ -факторининг гамов пики энергияларидан то  $E=0$  гача экстраполяцион қийматларини аниқлаш имконини беради.

2. МИЗПУ доирасида  $t(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$  ва  $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$  тўғри радиацион қамраш реакциялари астрофизик  $S$ -факторларининг қуйи энергияларда прецизион аниқланган экспериментал қийматларининг таҳлили амалга оширилди. Таҳлил натижасида бу реакциялар периферияли реакциялар эканлиги миқдорий жиҳатдан асослаб берилди.

3.  $\alpha+t\rightarrow^7\text{Li}(a\text{сoс})$ ,  $\alpha+t\rightarrow^7\text{Li}(0.478 \text{ МэВ})$  ва  $^7\text{Be} + p \rightarrow ^8\text{B}$  лар учун АНКнинг экспериментал қийматлари ҳамда  $t(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$  ва  $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$  тўғри радиацион қамраш реакциялари астрофизик  $S$ -факторларининг ўта қуйи энергиялардаги экстраполяцион қийматлари аниқланди.

4. Бошланғич, оралик ва сўнги ҳолатлардаги уч заррачали кулон эффектларини яқинлаштирилган ҳолда ҳисобга оладиган зарядли заррачани узатиш перифериал 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.  $^6\text{Li}(^3\text{He},d)^7\text{Be}$ ,  $^{13}\text{C}(^3\text{He},d)^{14}\text{N}$  ва  $^{14}\text{N}(^3\text{He},d)^{15}\text{O}$  узатиш реакцияларининг  $^3\text{He}$  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  $^6\text{Li} + p \rightarrow ^7\text{Be}$ ,  $^{13}\text{C} + p \rightarrow ^{14}\text{N}$  и  $^{14}\text{N} + p \rightarrow ^{15}\text{O}$  лар учун АНКнинг экспериментал қийматлари ва уларнинг хатоликларини аниқлашдаги таъсири баҳоланди.

6.  $A(a,\gamma)B$  резонанс радиацион қамраш ядровий-астрофизик реакциясини ифодалашнинг резонанс ва тўғри радиацион қамрашлар

ҳиссаларини, амплитуданинг тўғри қисмига  $A + a \rightarrow B$  АНКи ҳақидаги маълумот киритиш орқали аниқ ҳисобга олган ҳолда модификацияланган  $R$ -матрицали усули ривожлантирилди.

7. Ривожлантирилган модификацияланган  $R$ -матрицали усули доирасида  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{C}(p,\gamma){}^{13}\text{N}$ ,  ${}^{13}\text{C}(p,\gamma){}^{14}\text{N}$  ва  ${}^{14}\text{N}(p,\gamma){}^{15}\text{O}$  реакцияларнинг куйи энергиялардаги экспериментал астрофизик  $S$ -факторлари  ${}^6\text{Li} + p \rightarrow {}^7\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{C} + p \rightarrow {}^{13}\text{N}$ ,  ${}^{13}\text{C} + p \rightarrow {}^{14}\text{N}$  ва  ${}^{14}\text{N} + p \rightarrow {}^{15}\text{O}$  лар АНКларининг ёрдамида таҳлил қилинди. Кўрсатилган реакциялар астрофизик  $S$ -факторларининг ўта куйи энергияларда (то  $E=0$  гача) экстраполяцион қийматлари аниқланди.

8.  ${}^{13}\text{N}$  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.  ${}^{12}\text{C}(p,\gamma){}^{13}\text{N}$  ва  ${}^{14}\text{N}(p,\gamma){}^{15}\text{O}$  радиацион қамраш реакцияларининг юлдуз ҳароратларидаги ( $0.01 \leq T_9 \leq 10$ ,  $T_9 = T \times 10^9$  К) тезлиги ҳисоблаб топилди. Массив юлдузлардаги водород ёнишининг CNO-циклининг энг султ кечадиган реакцияси бўлмиш  ${}^{14}\text{N}(p,\gamma){}^{15}\text{O}$  радиацион қамраш реакцияси, гамов пики атрофи энергияларида аслида 1.8 марта яна ҳам секин кечишлиги аниқланди.

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

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

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

13.  ${}^{11}\text{C} + p \rightarrow {}^{12}\text{N}$  АНКи ҳамда ўта куйи энергияларда  ${}^{11}\text{C}(p,\gamma){}^{12}\text{N}$  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 № В2018.3.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](http://www.inp.uz)) и на Информационно-образовательном портале «Ziyonet» ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Научный консультант:** **Ярмухамедов Рахим**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Каноков Зокиржон**  
доктор физико-математических наук, доцент

**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/Т.65.01 при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий по адресу: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33, ИИПиЛТ. Тел.: (+99871) 262-31-69; факс: (+99871) 262-32-54; e-mail: [info@iplt.uz](mailto: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.

(Реестр протокола 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 (эквивалентной величины астрофизических  $S$ -факторов) ядерно-астрофизических процессов образования легких элементов, реакций радиационного захвата  $A(a,\gamma)B$  при сверхнизких энергиях ( $E \leq 100$  кэВ), в том числе в окрестности энергии гаммовского 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 актуальна разработка теоретических и экспериментальных методик определения сечений реакций радиационного захвата  $A(a,\gamma)B$  с высокой точностью при сверхнизких энергиях.

В настоящее время в мире большое внимание уделяется 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/Н) 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  $A(a,\gamma)B$  при сверхнизких энергиях напрямую связаны с асимптотическим нормировочным коэффициентом (АНК) волновой функции связанного  $A + a \rightarrow B$  состояния. Следовательно, проблема точного определения значений сечений указанных реакций обуславливает решение проблемы 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, посредством

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»<sup>2</sup>. 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 звездах. 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 от 1 марта 2013 года «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии», № УП-4947 от 2 февраля 2017 года «О Стратегии действия по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг.», Постановлении Президента Республики Узбекистан № УП-2789 от 18 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности».

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и 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-

---

<sup>2</sup> 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, средне-квадратичный радиус и АНК) были исследованы в рамках различных микроскопических моделей и *ab initio* расчетах с использованием различных видов двухчастичных потенциалов; была обнаружена сильная зависимость их рассчитанных 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 на основе микроскопической, потенциальной двух- и трехчастичных моделей (Циклотронный институт университета Техаса, Университет Суррей, Китайский институт атомной энергии, Университет Либре Брюсселя, Ускорительная лаборатория Европейской коллаборации, 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 соответственно при низких и сверхнизких энергиях в мире ведутся фундаментальные исследования по следующим приоритетным 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. Discouvment), 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 (С. Spitareli, М. La Cognata), английскими (R. C. Johnson, N. K. Timofeyuk), французским (А. Coc), канадским (В. Davids), российскими (Л.Д. Блохинцев, В.И. Кукулин, С.Б. Сакута), казахскими (Н. Буртебаев, 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 результатов 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  ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B}$ , полученное в рамках ММИВ из анализа поверхностной передачи протона (А.М. Mukhamedzhanov, Р.Е. Tribble) или микроскопической модели (D. Baye, P. Discouvement), приводит к сильно заниженным или завышенным значениям рассчитанных астрофизических S-факторов для реакции прямого радиационного захвата  ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$  при сверхнизких энергиях относительно современных прецизионно измеренных экспериментальных данных. В этом контексте в амплитудах рассматриваемых поверхностных процессов требуются 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  $A(a,\gamma)B$  путем введения информации об АНК для  $A + a \rightarrow B$  в её амплитуду;

выполнить в рамках МДПМ анализ современных прецизионных экспериментальных астрофизических  $S$ -факторов ( $S^{\text{exp}}(E)$ ) реакций прямого радиационного захвата  $t(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$  и  $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$  при низких энергиях  $E$ , получить экспериментальные значения АНК для  $\alpha + t \rightarrow ^7\text{Li}$  и  $^7\text{Be} + p \rightarrow ^8\text{B}$  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  $^6\text{Li}(^3\text{He}, d)^7\text{Be}$ ,  $^{13}\text{C}(^3\text{He}, d)^{14}\text{N}$ ,  $^{14}\text{N}(^3\text{He}, d)^{15}\text{O}$  и получить «экспериментальные» значения АНК для  $^6\text{Li} + p \rightarrow ^7\text{Be}$ ,  $^{13}\text{C} + p \rightarrow ^{14}\text{N}$  и  $^{14}\text{N} + p \rightarrow ^{15}\text{O}$ ;

развить модифицированный  $R$ -матричный метод расчета ядерно-астрофизических реакций  $A(a,\gamma)B$ , протекающих через резонансные состояния, путем корректного учета вклада прямой части амплитуды в полной амплитуде процесса и выполнить анализ экспериментальных астрофизических  $S$ -факторов реакций резонансного радиационного захвата  $^6\text{Li}(p, \gamma)^7\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$ ,  $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$  и  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$  при низких энергиях, используя значения АНК для  $^6\text{Li} + p \rightarrow ^7\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C} + p \rightarrow ^{13}\text{N}$ ,  $^{13}\text{C} + p \rightarrow ^{14}\text{N}$  и  $^{14}\text{N} + p \rightarrow ^{15}\text{O}$ , определить значения астрофизических  $S$ -факторов и их погрешности в области сверхнизких энергий, а 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  $^6\text{Li} \rightarrow \alpha + d$  в кулоновском поле многозарядного ядра  $^{208}\text{Pb}$  с учетом трехчастичных кулоновских эффектов в конечном состоянии, определить

значение АНК для  $\alpha + d \rightarrow {}^6\text{Li}$  и использовать его для определения астрофизического  $S$ -фактора реакции  $d(\alpha, \gamma){}^6\text{Li}$  при сверхнизких энергиях;

развить в рамках многочастичной модели оболочек микроскопический метод расчета интегралов перекрытия внутренних волновых функций зеркальных ( ${}^{12}\text{B}$ ,  ${}^{12}\text{N}$ ) ядер, АНК и спектроскопических факторов (СФ) для  ${}^{11}\text{B} + n \rightarrow {}^{12}\text{B}$  и  ${}^{11}\text{C} + p \rightarrow {}^{12}\text{N}$ , используя эффективные NN потенциалы Волкова (V1 и V2) и четыре формы M3Y, и изучить их чувствительность к видам используемых потенциалов;

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

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

**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:

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  ${}^6\text{Li}({}^3\text{He}, d){}^7\text{Be}$ ,  ${}^{13}\text{C}({}^3\text{He}, d){}^{14}\text{N}$  и  ${}^{14}\text{N}({}^3\text{He}, d){}^{15}\text{O}$  и его влияние на «экспериментальные» значения АНК для  ${}^6\text{Li} + p \rightarrow {}^7\text{Be}$ ,  ${}^{13}\text{C} + p \rightarrow {}^{14}\text{N}$  и  ${}^{14}\text{N} + p \rightarrow {}^{15}\text{O}$ ;

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

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

развит модифицированный двухчастичный  $R$ -матричный метод описания ядерно-астрофизической реакции  $A(a, \gamma)B$  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  ${}^6\text{Li}(p, \gamma){}^7\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{C}(p, \gamma){}^{13}\text{N}$ ,  ${}^{13}\text{C}(p, \gamma){}^{14}\text{N}$  и  ${}^{14}\text{N}(p, \gamma){}^{15}\text{O}$  в энергетическом интервале  $0 \leq E \leq 25 \text{ кэВ}$ , а также скорости трех последних

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

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

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

разработан трехчастичный метод анализа тройного дифференциального сечения кулоновского развала  $^{208}\text{Pb}(^6\text{Li}, ad)^{208}\text{Pb}$  в целях определения экспериментальных значений АНК для  $\alpha + d \rightarrow ^6\text{Li}$  и астрофизических  $S$ -факторов реакции  $d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$  в энергетическом интервале  $0 \leq E \leq 100$  кэВ;

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

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

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

по микроскопическим расчетам, выполненным с шестью видами эффективных NN потенциалов, установлено, что экспериментальное значение АНК для  $^{11}\text{C} + p \rightarrow ^{12}\text{N}$  наиболее близко воспроизводит использование МЗУ(E) потенциала;

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

**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 резонансных состояний ядер, образующихся в этих процессах.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что они могут быть успешно применены при решении 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  $\alpha + t \rightarrow {}^7\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B}$  и  ${}^6\text{Li} + p \rightarrow {}^7\text{Be}$ ) 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 надбарьерной 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 2018 г.). 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 гаммовского пика;

разработанный модифицированный двухчастичный 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  $A(a,\gamma)B$  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  ${}^{12}\text{C}$  и  ${}^{16}\text{O}$  и определить скорости ядерно-астрофизических реакций радиационных захватов протона ядрами  ${}^{12}\text{C}$  и  ${}^{14}\text{N}$ ;

полученные результаты по астрофизическому  $S$ -фактору реакции радиационного захвата  ${}^{12}\text{C}(p,\gamma){}^{13}\text{N}$  были использованы для проведения сравнительных анализов 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 позволили пополнить базу данных по установлению скорости реакции  $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$ , протекающей в недрах Солнца и массивных звездах.

**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 страницы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

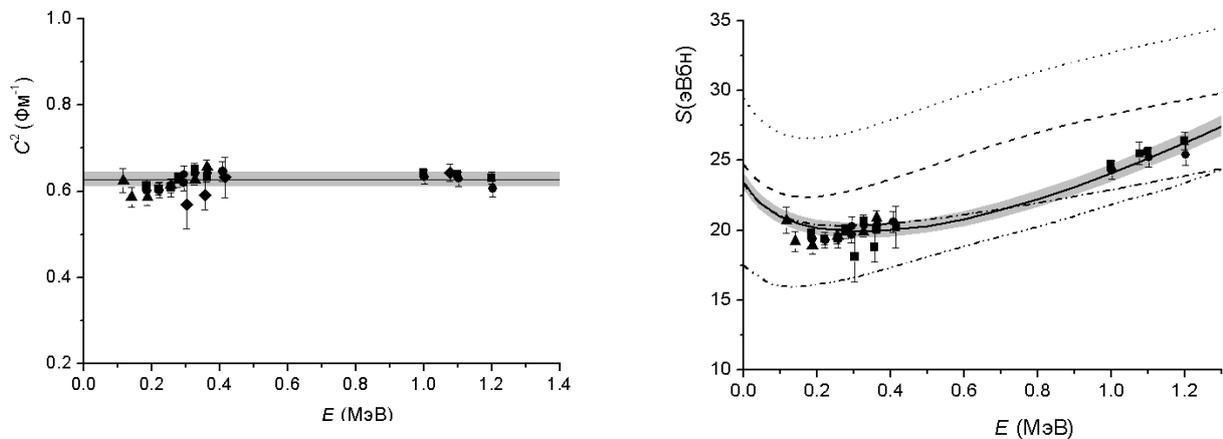
**Во введении** представлены актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан, дана научная новизна исследования, 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  $t(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$  и  $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$ , полученных другими авторами. Изложена также основная идея предлагаемого нового МДПМ для описания реакции прямого радиационного захвата  $A(\alpha,\gamma)B$ .

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 функции  $R(E,b)$ , содержащей радиальный интеграл свертки волновых функций связанного  $(A+\alpha)$  состояния и  $A\alpha$ -рассеяния с оператором электромагнитного перехода в длинноволновом приближении. Здесь  $b$  – одночастичный АНК, который определяет амплитуду «хвоста» одночастичной оболочечной волновой функции связанного  $(A+\alpha)$  состояния и является свободным модельным параметром, сильно зависящим от геометрических параметров ядерного потенциала Вудса–Саксона (радиус  $r_0$  и диффузность  $a$ ). В МДПМ сформулированы два условия: 1)  $R(E,b)=\text{const}$  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  $(C_i^{\text{exp}})^2 = S^{\text{exp}}(E_i)/R(E_i, b)$  для каждой экспериментальной энергии  $E = E_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) и использовать средневзвешенное экспериментальное значение  $(C^{\text{exp}})^2$  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  $S(E) = (C^{\text{exp}})^2 R(E, b)$ .

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



**Рис.1.** Слева – извлеченные АНК  $((C_i^{\text{exp}})^2)$  для  ${}^7\text{Be}+p \rightarrow {}^8\text{B}$  для каждой экспериментальной энергии  $E = E_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ). Прямая линия и ширина полосы – соответственно средневзвешенный АНК и его погрешность. Справа – рассчитанные значения  $S(E)$  для реакции  ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$ : сплошная кривая и ширина полосы – соответственно результаты расчета среднего значения астрофизического  $S(E)$ -фактора и его погрешность. Пунктирные и штрих-пунктирная линии – результаты микроскопического расчета работы Р. Desouvement [Phys. Rev. C 70, 065802 (2004)] для Волков (V2) и Миннесота (MN) форм  $NN$  потенциалов; полоса – наши результаты; пунктиры с двумя точками ( $\zeta$  и  $\varepsilon$ ) – результаты расчетов работ G. Tabacaru, et al. [Phys.Rev. C73 (2006)025808] и Н. М. Xu, et al. [Phys. Rev. Lett. 73, 2027 (1994)]. Экспериментальные данные брались из работ А.Р. 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  $(C_i^{\text{exp}})^2$  для  ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B}$  и рассчитанные значения  $S(E)$  для реакции  ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$ , полученные нами, и их сравнение с данными других авторов.

На основе критического сравнительного анализа с результатами других авторов как значений АНК для  $t + \alpha \rightarrow {}^7\text{Li}$  и  ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B}$ , так и рассчитанных значений  $S(E)$  для реакций  $t(\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$  и  ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$  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  $S^{\text{exp}}(E_i)$ .

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 ( $\Delta V_{i,f}^C$ ), 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 аналитических свойствах амплитуды  $M^{TB}$  по переменной  $\cos\theta$ , получено явное выражение для дифференциального сечения (ДС) в области главного максимума углового распределения, которое имеет вид

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

Здесь  $R_a$  – перенормировочный трехчастичный кулоновский фактор (ПТКФ) и  $R_{post}^{DWBA}(E_i, \theta; b_B, b_x)$  – приведенное ДС, рассчитываемые в «post»-приближении МИВ с  $\Delta V_{i,f}^C = 0$ , где  $E_i$  – относительная кинетическая энергия сталкивающихся ядер,  $\theta$  – угол рассеяния в с.ц.и.,  $b_B$  и  $b_x$  – одночастичные АНК для связанных  $((y + a)$  и  $(A + a))$  состояний ядер соответственно  $x$  и  $B$ . 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  ${}^3\text{He}$ -ионами на ядрах  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{12,13}\text{C}$  и  ${}^{14}\text{N}$  при различных надбарьерных энергиях с образованием

конечных ядер в основном и нижепороговом возбужденных состояниях. Обсуждается условие модельно-независимого способа определения квадрата АНК ( $C_{Ap}^2$ ) путем вариации свободного параметра  $b_B$  в расчетах приведенного ДС выражении (1) и значения параметра  $b_x$  ( $x=^3\text{He}$ ). Получены значения квадрата АНК ( $C_{Ap}^2$ ) 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 от образуемых конечных состояний ядер. Проведенный анализ показывает, что «post»-приближение МИВ без учета упомянутых выше трехчастичных кулоновских эффектов не пригодно 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  $A(a, \gamma)B$  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  $M_{\alpha\beta}^{(R)}(E)$ , отвечающей механизму  $A + a \rightarrow B^* \rightarrow B + \gamma$  образования резонансного ядра  $B^*$  в промежуточном состоянии.  $M_{\alpha\beta}^{(R)}(E)$  характеризуется энергией  $E_\lambda^{(R)}$ , парциальными ширинами  $\Gamma_\alpha^a(E)$  и  $\Gamma_{\lambda;\beta}^\gamma(E)$  соответственно для распадов  $B^* \rightarrow A + a$  и  $B^* \rightarrow B + \gamma$ . Здесь  $\alpha = (l_{B^*}, s_{B^*}, J_{B^*})$  и  $\beta = (l, J_{B^*}, J_B)$  – набор квантовых чисел, где  $l_{B^*}$ ,  $s_{B^*}$ ,  $l$  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 ( $\Gamma_{\lambda;\beta}^\gamma(E)$ ) представляется в виде двух слагаемых:  $[\Gamma_{\lambda;\beta}^\gamma(E)]^{1/2} = [\Gamma_{\lambda;\beta}^\gamma(E)]_{\text{int}}^{1/2} + [\Gamma_{\lambda;\beta}^\gamma(E)]_{\text{ext}}^{1/2}$ , где  $[\Gamma_{\lambda;\beta}^\gamma(E)]_{\text{int}}$  и  $[\Gamma_{\lambda;\beta}^\gamma(E)]_{\text{ext}}$  – радиационная внутренняя ( $0 \leq r \leq r_C$ ) и  $a$ -канальная внешняя ( $r > r_C$ ) части радиационной ширины, которые пропорциональны соответствующим приведенным  $\gamma$ -ширинам ( $\gamma_{\lambda;\beta}^\gamma(\text{int})$  и  $\gamma_{\lambda;\beta}^\gamma(\text{ext})$ ) и содержат множители томасовского энергетического сдвига. Величина  $\gamma_{\lambda;\beta}^\gamma(\text{int})$  является действительным подгоночным параметром, а величина  $\gamma_{\lambda;\beta}^\gamma(\text{ext})$  определяется точным аналитическим выражением, параметризованным через АНК для  $A + a \rightarrow B$ . Экспериментальные  $a$ -канальная и  $\gamma$ -радиационная ширины определяются соответственно соотношениями  $\Gamma_{\alpha;a}^{\text{exp}} = \Gamma_\alpha^a(E_\lambda^{(R)})$  и  $\Gamma_{\gamma;\beta}^{\text{exp}} = |\Gamma_{\lambda;\beta}^\gamma(E_\lambda^{(R)})|$ .

Прямая часть амплитуда реакции содержит радиальный интеграл

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

где  $I_l(r)$  ( $O_l(r)$ ) – асимптотика входящей (выходящей) волны  $Aa$ -рассеяния при  $r > r_N$ ,  $L = 0$  (1) для EI (MI)-перехода,  $\kappa$  – 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  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{12,13}\text{C}$  и  ${}^{14}\text{N}$  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  $\gamma_{\lambda;\beta}^{\gamma}$  (*int*) (или  $\Gamma_{\gamma;\beta}^{\text{exp}}$ ) определялись путем подгонки рассчитанных  $S$ -факторов к экспериментальным данным и методом критерия  $\chi^2$ . Получены хорошее согласие между рассчитанными и экспериментальными астрофизическими  $S$ -факторами и новые оценки для «экспериментальных» значений  $\gamma$ -радиационной ширины  $\Gamma_{\gamma;\beta}^{\text{exp}}$  и вклада прямого радиационного захвата. Показано, что вклад прямого радиационного захвата является доминирующим в энергетическом интервале  $0 \leq E \leq 50$  кэВ. В качестве иллюстрации на рис. 2–4 представлены результаты анализа для реакции  ${}^{14}\text{N}(p, \gamma){}^{15}\text{O}$  при сверхнизких энергиях, а также её скорости в интервале  $0.01 \leq T_9 \leq 10$ . Полученные результаты критически сравниваются с результатами других авторов. На его основе рекомендованы новые значения радиационной ширины для распада  ${}^{13}\text{N}$  ( $2.365$  МэВ)  $\rightarrow$   ${}^{12}\text{N}(\text{осн.}) + \gamma$  ( $\Gamma_{\gamma;\beta}^{\text{exp}} = 0.65 \pm 0.07$  эВ),  $S(0) = 1.62 \pm 0.20$  кэВ бн и  $S(25 \text{ кэВ}) = 1.75 \pm 0.22$  кэВ бн для реакции  ${}^{12}\text{C}(p, \gamma){}^{13}\text{N}$ , а также  $S(0) = 1.13$  кэВ бн для полного прямого захвата для реакции  ${}^{14}\text{N}(p, \gamma){}^{15}\text{O}$ . Кроме того, обнаружено, что горение водорода во внутренней части звезды посредством наиболее медленной реакции  ${}^{14}\text{N}(p, \gamma){}^{15}\text{O}$  CNO-цикла происходит на самом деле еще медленнее в 1.8 раза, чем общепринятое, для реакции  ${}^6\text{Li}(p, \gamma){}^7\text{Be}$  определено значение астрофизического  $S$ -фактора,  $S(0) = 70.2 \pm 12.0$  эВ бн и ширины парциального протонного резонанса  $\Gamma_p \approx 50$  кэВ.

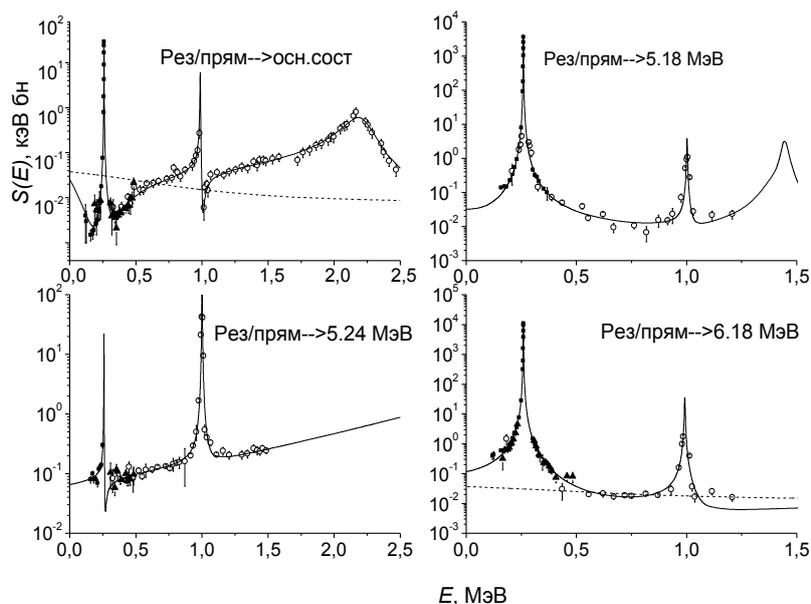


Рис.2. Астрофизические S-факторы для реакции  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ , отвечающие четырем нижним состояниям ядра  $^{15}\text{O}$ . Экспериментальные данные (квадратики), (треугольники) и (кружочки) взяты соответственно из работ [G. Imbriani, et al., Eur. Phys. J.A25, 455 (2005)] [R. C. Runkle, et al., Phys. Rev. Lett. 94, 082503(2005)] и [U. Schroder, 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

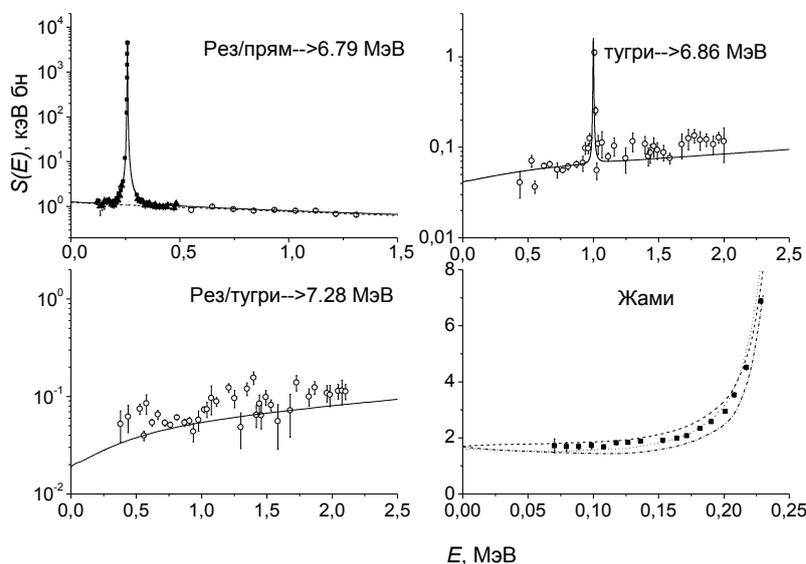
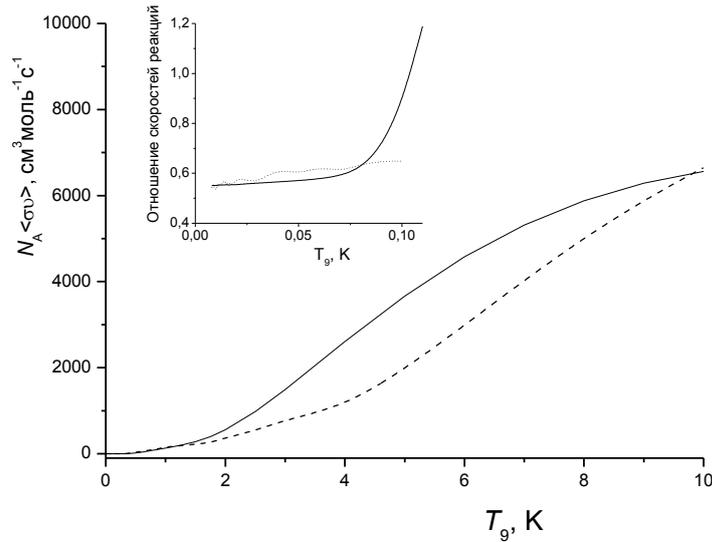


Рис. 3. То же самое, что на рис. 2 для трех ( $E^*=6.79, 6.86$  и  $7.28$  МэВ) возбужденных состояний ядра  $^{15}\text{O}$  и суммарный астрофизический S-фактор. Экспериментальные значения суммарного астрофизического S-фактора ( $\bullet$ ) взяты из [A. Lemutet, et al., Phys. Lett. B634, 483 (2006)]; штриховая, точечная и штрих-пунктирная кривые – результаты расчетов из работ [А.М. Mukhamedzhanov, P. Bem, B.A. Brown, et al., Phys. Rev. C67, 065804 (2003), A. Lemut, et al., Phys. Lett. B634, 483 (2006); R.C. Runkle, et al., Phys. Rev. Lett. 94, 082503(2005)] соответственно



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

В четвертой главе «Развал  $^6\text{Li} \rightarrow d + \alpha$  в кулоновском поле тяжелого ядра  $^{208}\text{Pb}$ , асимптотический нормировочный коэффициент для  $d + \alpha \rightarrow ^6\text{Li}$  и ядерно-астрофизическая реакция  $d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$  при сверхнизких энергиях» предложен трехчастичный метод описания реакции кулоновского развала  $^{208}\text{Pb}(^6\text{Li}, d\alpha)^{208}\text{Pb}$  для определения экспериментального значения АНК для  $d + \alpha \rightarrow ^6\text{Li}$ .

В рамках модели трех ( $d$ ,  $\alpha$  и  $^{208}\text{Pb}$ ) тел получено выражение для матричного элемента реакции кулоновского развала  $^{208}\text{Pb}(^6\text{Li}, d\alpha)^{208}\text{Pb}$ , в котором оператор перехода  $\Delta V_f^c(\mathbf{r}, \boldsymbol{\rho})$ , соответствующего кулоновскому поляризованному потенциалу для трех ( $d$ ,  $\alpha$  и  $^{208}\text{Pb}$ ) тел, свертывается между трехчастичной кулоновской волновой функцией (ТКВФ,  $\Psi_{k;p}^{(-)*}(\mathbf{r}, \boldsymbol{\rho})$ ) в конечном состоянии и интегралом перекрытия ( $I_{ad}(\mathbf{r})$ ) для волновой функции ядра  $^6\text{Li}$  в ( $d + \alpha$ )-канале, где  $\mathbf{r}(\boldsymbol{\rho})$  – радиус-вектор, соединяющий центры масс дейтрона и  $\alpha$ -частицы (центрами масс ( $d$ ,  $\alpha$ )-пары и ядра  $^{208}\text{Pb}$ ) и  $\mathbf{k}(\mathbf{p})$  – сопряженный ему импульс. При расчете матричного элемента используются два приближения: П1 и П2. В приближении П1 полагается, что снаряд  $^6\text{Li}$  движется по резерфордской траектории. Поэтому радиус обрезания ( $\rho_{\min}$ ) на нижнем пределе в радиальном интеграле по переменной  $\rho$  ( $\rho_{\min} \leq \rho < \infty$ ) в матричном элементе берется равным классическому прицельному параметру  $b$  ( $b \leq \rho < \infty$ ,  $b = Z_{\text{Li}} Z_{\text{Pb}} e^2 \text{ctg}(\theta/2)/2E$ ),  $Z_A$  – заряд ядра  $A$  нуклида,  $E$  – кинетическая энергия сталкивающихся ядер,  $\theta$  – угол рассеяния. В приближении П2 предполагается, что развал ядра  $^6\text{Li}$  на  $d$  и  $\alpha$ -частицы происходит на относительном расстоянии ( $\rho$ ), превышающем значения

радиуса ядерного взаимодействия ( $\rho_N$ ), то есть  $\rho > \rho_N$ . В этом приближении величина  $\rho_{\min}$  фиксируется и определяется из выражения  $\rho_{\min} = \rho_N + \pi Z_{\text{Li}} Z_{\text{Pb}} e^2 / 4E < b$ , величина  $\rho_N$  дается выражением  $\rho_N = r_0 (6^{1/3} + 208^{1/3})$ , где  $r_0 = 1.36$  Фм, которое рекомендовано другими авторами. В обоих приближениях в матричном элементе кулоновского развала ТКВФ  $\Psi_k^{(-)*}(\mathbf{r}, \rho)$  и радиальную часть интеграла перекрытия  $I_{ad}(\mathbf{r})$  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  $^{208}\text{Pb}$ -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

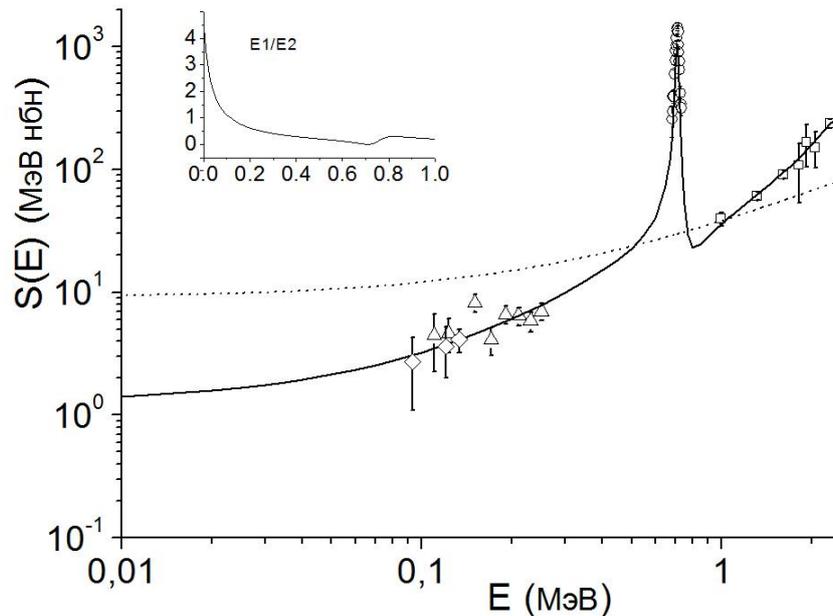
$$\frac{d^3 \sigma}{d\Omega_{\text{Li}} d\Omega_{ad} dE_{ad}} = C_{ad}^2 \frac{d^3 \tilde{\sigma}}{d\Omega_{\text{Li}} d\Omega_{ad} dE_{ad}}, \quad (3)$$

где  $C_{ad}$  – АНК для  $d + \alpha \rightarrow {}^6\text{Li}$ , отвечающий  $s$ -состоянию дейтрона и  $\alpha$ -частицы в  ${}^6\text{Li}$ , и  $d^3 \tilde{\sigma} / d\Omega_{\text{Li}} d\Omega_{ad} dE_{ad}$  – рассчитываемое приведенное ТДС, корректно учитывающее E1- и E2-мультипольности, а также их интерференции, которое является функцией переменной относительной кинетической энергии,  $E_{ad}$  – фрагменты развала при фиксированных значениях углов. Выражение (3) позволяет определить экспериментальные значения АНК путем замены в правой части выражения величины  $\frac{d^3 \sigma}{d\Omega_{\text{Li}} d\Omega_{ad} dE_{ad}}$  на экспериментальные значения ТДС.

Приведены результаты расчетов ТДС и экспериментальные значения квадрата  $(C_{ad}^{\text{exp}})^2$  для каждой экспериментальной точки энергии для кинематики  $E_{\text{Li}} = 156$  МэВ и  $\theta = 4^\circ$  ( $b = 33.4$  Фм), полученные в приближении П1, и их сравнение с экспериментальными данными. Результаты анализа показали, что данная кинематика вполне отвечает критерию ЧКР. Получены средневзвешенное значение и его погрешность, равная  $(C_{ad}^{\text{exp}})^2 = 6.72 \pm 0.73$  Фм $^{-1}$ , которая отличается от значения  $(C_{ad}^{\text{exp}})^2 = 5.37 \pm 0.26$  Фм $^{-1}$ , полученного другими авторами. П1 приближение аналогичным образом было применено и для анализа экспериментальных данных по ТДС с  $\theta = 3^\circ$ . Расчеты показали, что

экспериментальные данные по ТДС не были получены в условиях ЧКР. Следовательно, значение  $(C_{ad}^{exp})^2$ , полученное в результате данного анализа, довольно сильно отличается от приведенного выше значения для кинематики с  $\theta = 4^\circ$ . В этой главе также представлены результаты анализа экспериментальных данных ТДС при  $\theta = 3^\circ$ , полученных в приближении П2. Расчеты показали, что для данной кинематики, когда развал ядра снаряда происходит на краю ядерного взаимодействия ядер мишени и снаряда ( $\rho_{min} = 12.4$  Фм) в достаточно узком интервале энергии ( $107 \leq E_{ad} \leq 250$  кэВ), вкладом ядерной части этого взаимодействия на относительное движение фрагментов развала  $d$  и  $\alpha$  можно пренебречь. Однако обнаружено, что с ростом энергии  $E_{ad}$  ( $E_{ad} > 250$  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  $107 \leq E_{ad} \leq 250$  кэВ. Средневзвешенное значение АНК получено равным  $(C_{ad}^{exp})^2 = 5.24 \pm 0.51$  Фм<sup>-1</sup>, которое прекрасно согласуется с приведенными выше литературными данными. Делается вывод о возможности получения достоверных экспериментальных значений АНК в узком вышеприведенном интервале энергии  $E_{ad}$  с учетом вклада интервала  $\rho_{min} \leq \rho \leq b$  ( $\rho_{min} = 12.4$  Фм,  $b = 33.4$  Фм).



**Рис. 5.** Астрофизический  $S$ -фактор реакции радиационного захвата  $d(\alpha,\gamma)^6\text{Li}$ . Точки: треугольники – наши данные, полученные из анализа данных по ТДС для угла рассеяния  $\theta = 3^\circ$ ; 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  $C_0^2(3^\circ) = 5.24 \pm 0.51$  Фм<sup>-1</sup>, штрихованная – результат экстраполяции авторов работы [J. Kiener, H. J. Gils, et al. *Phys. Rev.*, p. 44, 2195 (1991)]. На вставке приведено отношение вкладов  $E1$ - и  $E2$ -мультипольных переходов в процесс радиационного захвата

В данной главе также представлены извлеченные экспериментальные значения и результаты расчетов астрофизического  $S$ -фактора реакции  $d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$  при сверхнизких энергиях с использованием АНК, полученных в П1 и П2 приближениях. Там же приведены последние экспериментальные данные по прямому измерению астрофизического  $S$ -фактора в четырех точках энергии:  $E_{\text{ад}}=80, 93, 120$  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  $\alpha$ -канальной и  $\gamma$ -радиационной резонансных ширин для первого резонансного уровня ( $3/2^-$ ,  $0.71$  МэВ) ядра  $^6\text{Li}$ , которые превосходно согласуются с литературными данными, полученными другими авторами. На рис. 5 приведены извлеченные нами экспериментальные значения астрофизического  $S$ -фактора реакции радиационного захвата  $d(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$  и результат его экстраполяции в область сверхнизких энергий.

В пятой главе «**Микроскопический метод расчета интегралов перекрытия волновых функций для зеркальных ядер ( $^{12}\text{B}, ^{12}\text{N}$ ) в ( $^{11}\text{B} + n$ )- и ( $^{11}\text{C} + p$ ) конфигурации и АНК для  $^{11}\text{B} + n \rightarrow ^{12}\text{B}$  и  $^{11}\text{C} + p \rightarrow ^{12}\text{N}$** » изложен развитый микроскопический метод расчета интеграла перекрытия для зеркальных ядер ( $^{12}\text{B}, ^{12}\text{N}$ ) в ( $^{11}\text{B} + n$ )- и ( $^{11}\text{C} + p$ )-конфигурации АНК для  $^{11}\text{B} + n \rightarrow ^{12}\text{B}$  и  $^{11}\text{C} + p \rightarrow ^{12}\text{N}$ , использующий многочастичные волновые функции модели оболочек для ядер  $^{11}\text{C}$  и  $^{12}\text{N}$ . 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  $^{11}\text{B} / ^{12}\text{N}$  ( $l=1$  и  $j=1/2$  и  $3/2$ ). Получено явное выражение АНК для  $A + N \rightarrow B$  ( $^{11}\text{B}$  или  $^{12}\text{N}$ ). Чтобы рассчитать АНК нами использовались трансляционные инвариантные волновые функции ядер  $^{11}\text{B}$  и  $^{12}\text{B}$  или  $^{11}\text{C}$  и  $^{12}\text{N}$ , разложенные по базисным состояниям  $|\text{AN}_{\text{min}}[f](\lambda\mu)\beta\text{LST}\rangle$  осцилляторной модели оболочки, с учетом эффекта антисимметризации между нуклонами путем включения всех возможных возбуждений остовов  $^{11}\text{B}$  и  $^{11}\text{C}$ .

Численные расчеты АНК ( $C_{lj}$ ) для  $^{11}\text{B} + n \rightarrow ^{12}\text{B}$  и  $^{11}\text{C} + p \rightarrow ^{12}\text{N}$ , средне-квадратичных радиусов (с.к.р.) ( $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ ) и спектроскопических факторов (СФ) ( $Z_{lj}$ ) для зеркальных ( $^{12}\text{B}, ^{12}\text{N}$ ) ядер в ( $^{11}\text{B} + n$ )- и ( $^{11}\text{C} + p$ )-конфигурации проводились для шести видов эффективных NN потенциалов: двух видов потенциала Волкова (V1 и V2) и четырех видов потенциала МЗУ (МЗУ(R), МЗУ(HJ), МЗУ(P) и МЗУ(E)). Обнаружено, что рассчитанные значения  $C_{lj}$ ,  $\langle r^2 \rangle^{1/2}$  и  $Z_{lj}$  заметно чувствительны к форме используемых эффективных NN потенциалов. Тем не менее при этом отношение АНК для зеркальных ( $^{12}\text{B}, ^{12}\text{N}$ ) ядер практически не зависит от вида использованных эффективных NN потенциалов (в пределах до 10%), а рассчитанные значения АНК для  $^{11}\text{B} + n \rightarrow ^{12}\text{B}$  и  $^{11}\text{C} + p \rightarrow ^{12}\text{N}$ , отвечающие МЗУ(E) потенциалу, являются

наиболее близкими к их «экспериментальным» значениям, рекомендованным другими авторами. Поэтому эффективный потенциал  $MZY(E)$  был использован для расчета  $SF$  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  $^{11}C(p,\gamma)^{12}N$ , рассчитанное с использованием АНК для  $MZY(E)$  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 фрагмента  $^{11}C$  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. Разработан модифицированный двухчастичный потенциальный метод (МДПМ) для описания ядерно-астрофизической реакции прямого радиационного захвата  $A(a,\gamma)B$  при низких энергиях, позволяющий определить экспериментальные значения АНК для  $a+A \rightarrow B$  и экстраполяционные значения астрофизического  $S$ -фактора в энергетической области в окрестности гамовского пика вплоть до  $E=0$  (сверхнизкие энергии).

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

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

4. Развита ММИВ для периферийной надбарьерной 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  $^6Li(^3He,d)^7Be$ ,  $^{13}C(^3He,d)^{14}N$  и  $^{14}N(^3He,d)^{15}O$  при различных надбарьерных энергиях падающих  $^3He$ -ионов и показано, что эти реакции являются периферийными по крайней мере в области главного

максимума углового распределения. Получена оценка вклада трехчастичной кулоновской динамики механизма передачи протона в извлекаемые значения АНК и их погрешности для  ${}^6\text{Li} + p \rightarrow {}^7\text{Be}$ ,  ${}^{13}\text{C} + p \rightarrow {}^{14}\text{N}$  и  ${}^{14}\text{N} + p \rightarrow {}^{15}\text{O}$ .

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

7. Выполнен в рамках развитого модифицированного  $R$ -матричного метода анализ экспериментальных астрофизических  $S$ -факторов реакций радиационных захватов  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{C}(p,\gamma){}^{13}\text{N}$ ,  ${}^{13}\text{C}(p,\gamma){}^{14}\text{N}$  и  ${}^{14}\text{N}(p,\gamma){}^{15}\text{O}$  при низких энергиях, используя значения АНК для  ${}^6\text{Li} + p \rightarrow {}^7\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{C} + p \rightarrow {}^{13}\text{N}$ ,  ${}^{13}\text{C} + p \rightarrow {}^{14}\text{N}$  и  ${}^{14}\text{N} + p \rightarrow {}^{15}\text{O}$ . 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  ${}^{13}\text{N}$ , которое в 1.3 раза больше общепринятого.

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

10. Разработан трехчастичный метод описания реакции кулоновского развала  ${}^{208}\text{Pb}({}^6\text{Li}, d\alpha){}^{208}\text{Pb}$ . Определены экспериментальные значения АНК для  $d + \alpha \rightarrow {}^6\text{Li}$ , а также астрофизического  $S$ -фактора для реакции прямого радиационного захвата  $d(\alpha,\gamma){}^6\text{Li}$  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. Развита микроскопический метод расчета интеграла перекрытия для зеркальных ( ${}^{12}\text{B}$ ,  ${}^{12}\text{N}$ ) ядер в ( ${}^{11}\text{B} + n$ ) и ( ${}^{11}\text{C} + p$ ) конфигурациях и асимптотических нормировочных коэффициентов для  ${}^{11}\text{B} + n \rightarrow {}^{12}\text{B}$  и  ${}^{11}\text{C} + p \rightarrow {}^{12}\text{N}$  в рамках трансляционно инвариантной многочастичной модели оболочки.

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

13. Определены значения АНК для  ${}^{11}\text{C} + p \rightarrow {}^{12}\text{N}$  и астрофизического  $S$ -фактора реакции прямого радиационного захвата  ${}^{11}\text{C}(p,\gamma){}^{12}\text{N}$  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: B2018.3.DSc/FM33.**

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](http://www.iplt.uz) and on the website of «Ziyonet» informational and educational portal at [www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz).

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

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](mailto: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.** A reliable estimate of the rate of the nuclear-astrophysical processes of the formation of light elements in the pp chains and the CNO cycle occurring respectively in the Sun and massive stars is one of the most important fundamental tasks of modern nuclear astrophysics, including cosmology. The solution of this problem, in turn, is impossible without knowledge of the high-precision values of the cross sections (the equivalent value is astrophysical S-factors) of the nuclear-astrophysical processes of the formation of light elements, the radiation capture reactions  $A(a,\gamma)B$  at ultralow energies ( $E \leq 100$  keV). In this area of energy it is not yet possible to carry out experimental measurements of reaction cross sections with the help of the currently existing experimental techniques. Therefore, the development of theoretical and experimental methods for determining the cross sections of the radiative capture  $A(a,\gamma)B$  with high accuracy at ultralow energies is very important.

Currently, much attention in the world is being removed to research in the field of low- and ultralow energy nuclear physics. In this regard, it was created and developed an asymptotic theory of nuclear processes at energies (10-15 MeV / N) and ultra-low energies ( $E \leq 100$  keV). The basic idea of the asymptotic theory of nuclear reactions is based on the fact that the cross sections for surface transfer reactions  $A(x,y) B$  (here  $x \rightarrow y + a$ ;  $a + A \rightarrow B$ ), radiation capture reactions  $A(a,\gamma)B$  at ultralow energies are directly related to the asymptotic normalization coefficient (ANC) of the wave function of the bound  $A + a \rightarrow B$  state. Consequently, the problem of accurately determining the cross sections for these reactions relies on the problem of correctly extracting the experimental ANC values from the experiment.

Today in Uzbekistan, thanks to the development of asymptotic methods for determining nuclear reaction cross sections in the field of low and ultra-low energies as well as the use of precision experimental techniques based on modern technologies, important results of global importance have been obtained. Further improvement of the accuracy of the results obtained through the improvement of experimental techniques for studying nuclear reactions through the introduction of modern technologies, as well as the development of new theoretical methods for extracting high precision experimental values of the ANC fundamental value for  $A + a \rightarrow B$  and using them to solve the problems of the theory of light nuclei, modern nuclear astrophysics and cosmology is an urgent task.

**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 development of nuclear structure theory and theory of the nuclear reactions as well as experimental arrangements carry out by scientific centers of USA, UK, Japan, Korea, China, Russia, Kazakhstan and other. Different theoretical methods of the

determination of the astrophysical S factor at very low energies are used. The microscopic method with using different NN potentials for the calculations of the amplitude of the radiative capture reactions and two body potential method are the main theoretical approaches. DWBA is main method of the study of the peripheral transfer reaction for the extract an structural spectroscopic information on colliding nuclei.

**Problem development status.** The theoretical calculations of the astrophysical S factor performed within different methods show considerable spread. Particularly, the microscopic methods of the calculation show rather sensitivity to the form of the NN potentials. The similar situation occurs in the case of using the two body potential method. The DWBA calculations of the cross section of the transfer reactions restricted by first term of the polynomial distribution of the Coulomb polarization potential. It is proved that for peripheral nuclear reactions is the important to take into account the contribution of other (high) terms of the polynomial distribution of the Coulomb polarization potential as well.

**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.

**The aim of the research** is the development of asymptotic methods for calculating surface nuclear processes of transfer and radiative capture of a charged particle at low and ultralow energies and determination of experimental ANC values for  $A + a \rightarrow B$  and their application for calculating astrophysical S factors for reactions of the pp chain and CNO cycle at ultralow energies .

**Tasks of the research:**

to develop a modified two-particle potential method (MTPPM) for a model-independent description of the nuclear astrophysical of direct radiation capture  $A(a,\gamma)B$  reaction by introducing information on the ANC for  $A + a \rightarrow B$  to the reaction amplitude;

to perform an analysis of modern precision experimental astrophysical S factors ( $S^{\text{exp}}(E)$ ) reactions of direct radiation capture  $t(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$  and  $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$  at low energies  $E$ , as part of the MTPPM, obtain experimental ANC values for  $\alpha + t \rightarrow ^7\text{Li}$  and  $^7\text{Be} + p \rightarrow ^8\text{B}$  and apply them to determine the values of the astrophysical S factor ( $S(E)$ ) and their errors in the region of ultralow energies;

to generalize the modified distorted wave born approximation method (MDWBA) for the peripheral nuclear reaction of transfer of a charged particle  $A(x,y)B$  ( $x = y + a$ ,  $B = A + a$  and  $a$  is a transmitted particle) with an approximate account of the three particle Coulomb dynamics in the transmission mechanism;

to apply MDWBA to analyze experimental differential cross sections for proton transfer reactions  $^6\text{Li} (^3\text{He}, d)^7\text{Be}$ ,  $^{13}\text{C} (^3\text{He}, d)^{14}\text{N}$ ,  $^{14}\text{N} (^3\text{He}, d)^{15}\text{O}$  and obtain the experimental ANC values for  $^6\text{Li} + p \rightarrow ^7\text{Be}$ ,  $^{13}\text{C} + p \rightarrow ^{14}\text{N}$  and  $^{14}\text{N} + p \rightarrow ^{15}\text{O}$ ;

to develop a modified R-matrix method for calculating the nuclear astrophysical reactions  $A(a,\gamma)B$  proceeding through resonant states by correctly taking into account the contribution of the direct part of the amplitude in the full amplitude of the process and analyzing the experimental astrophysical S factors of resonant radiation capture reactions of  ${}^6\text{Li} (p,\gamma){}^7\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{C} (p,\gamma){}^{13}\text{N}$ ,  ${}^{13}\text{C}(p,\gamma){}^{14}\text{N}$  and  ${}^{14}\text{N}(p,\gamma){}^{15}\text{O}$  at low energies, using the ANC values for  ${}^6\text{Li} + p \rightarrow {}^7\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{C} + p \rightarrow {}^{13}\text{N}$ ,  ${}^{13}\text{C} + p \rightarrow {}^{14}\text{N}$  and  ${}^{14}\text{N} + p \rightarrow {}^{15}\text{O}$  to determine the values of astrophysical S factors and their errors in the field of ultralow energies as well as reaction rates at stellar temperatures ( $0.01 \leq T_9 \leq 10$ ,  $T_9 = 10^9$  K);

to develop an asymptotic method for describing the direct disintegration of the nucleus  ${}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + d$  in the Coulomb field of the multiply charged nucleus  ${}^{208}\text{Pb}$  taking into account the three-particle Coulomb effects in the final state and determine the ANC value for  $\alpha + d \rightarrow {}^6\text{Li}$  and use it to determine the astrophysical S factor of the reaction  $d (\alpha, \gamma){}^6\text{Li}$  at ultra low energies;

to develop a microscopic method for calculating the overlap integrals of the internal wave functions of mirror ( ${}^{12}\text{B}$ ,  ${}^{12}\text{N}$ ) nuclei, ANC and spectroscopic factors (SF) for  ${}^{11}\text{C} + p \rightarrow {}^{12}\text{N}$ ,  ${}^{11}\text{B} + n \rightarrow {}^{12}\text{B}$  within the framework of the many-particle shell model using the effective NN Volkov (V1 and V2) potentials and four forms of M3Y, and study their sensitivity to the types of potentials used;

to determine the values of the astrophysical S-factor of the reaction of direct radiation capture  ${}^{11}\text{C}(p,\gamma){}^{12}\text{N}$  at ultralow energies, using the calculated ANC values for  ${}^{11}\text{C} + p \rightarrow {}^{12}\text{N}$ .

**The subject of the research** are surface nuclear processes at low and ultralow energies involving light nuclei.

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

a generalized modified distorted wave born approximation method (MDWBA) is proposed with an approximate allowance for three-particle Coulomb dynamics in the mechanism of transfer of a charged particle  $a$  in the peripheral nuclear reaction  $A(x,y) B$  (where  $x = y + a$  and  $B = A + a$ ) in the three body model ( $A$ ,  $a$  and  $y$ );

quantitative estimates of the contribution of three-particle Coulomb dynamics in the proton transfer mechanism of  ${}^6\text{Li} ({}^3\text{He}, d){}^7\text{Be}$ ,  ${}^{13}\text{C} ({}^3\text{He}, d){}^{14}\text{N}$  and  ${}^{14}\text{N} ({}^3\text{He}, d){}^{15}\text{O}$  reactions and its effect on the experimental ANC values for  ${}^6\text{Li} + p \rightarrow {}^7\text{B}$ ,  ${}^{13}\text{C} + p \rightarrow {}^{14}\text{N}$  and  ${}^{14}\text{N} + p \rightarrow {}^{15}\text{O}$  are obtained;

a modified two particle potential method of model independent extraction of experimental ANC values for  $A + a \rightarrow B$  is developed;

experimental ANC values for  $\alpha + t \rightarrow {}^7\text{Li}(\text{g.s.})$ ,  $\alpha + t \rightarrow {}^7\text{Li} (0.478 \text{ MeV})$  and  ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B}$ , as well as astrophysical S factors for reactions  $t (\alpha, \gamma){}^7\text{Li}$  and  ${}^7\text{Be} (p, \gamma){}^8\text{B}$  at energies  $0 \leq E \leq 25 \text{ keV}$  are determined;

a modified two-particle R-matrix method for describing the nuclear-astrophysical reaction  $A (a, \gamma) B$  taking into account the correct information about the ANC for  $A + a \rightarrow B$  in the direct part of the amplitude is developed;

the values of the total astrophysical S factors and their errors are determined for the reactions  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{C}(p,\gamma){}^{13}\text{N}$ ,  ${}^{13}\text{C}(p,\gamma){}^{14}\text{N}$  and  ${}^{14}\text{N}(p,\gamma){}^{15}\text{O}$  in the energy

range  $0 \leq E \leq 25$  keV, as well as the speed of the last three reactions in the range of  $0.01 \leq T_9 \leq 10$  K and the value of the radiation  $\gamma$ -width of the first resonant excited state of the nucleus  $^{13}\text{N}(2.365 \text{ MeV}; 1/2^-)$ ;

it is shown that hydrogen burning in the inner part of the star through the slowest reaction of the  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$  CNO cycle occurs 1.8 times slower than previously estimated;

**The reliability of the research results** is justified by the use of modern methods of theoretical nuclear and mathematical physics, the dispersion theory of nuclear reactions at low energies, as well as modern efficient numerical methods and algorithms; a thorough check of the consistency of the obtained theoretical results with modern precision measured experimental data and the results of research by other authors; consistency of conclusions with the main provisions of the theory of the structure of light nuclei and surface nuclear processes at low and ultra-low energies.

**Scientific and practical significance of the research results.** The scientific significance of the research results is determined by the possibility of using the developed asymptotic methods for describing sub barrier reactions of the transfer of a charged particle and related nuclear astrophysical processes of the solar  $pp$ -chain and the hot CNO cycle occurring in massive stars and descriptions of the fundamental characteristics of sub threshold and resonant states of the nuclei forming in these processes.

The practical significance of the research results lies in the fact that they can be successfully applied to solving quantum-mechanical problems of several bodies in atomic and nuclear physics, as well as to predict the solar neutrino flux and the quantitative formation of light elements in the Universe in the period after the Big Bang. Asymptotic methods and on its basis new results obtained for the ANC (for example, for  $\alpha + t \rightarrow ^7\text{Li}$ ,  $^6\text{Li} + p \rightarrow ^7\text{Be}$  and  $^7\text{Be} + p \rightarrow ^8\text{B}$ ) cross sections for surface reactions of transfer and radiative capture are already being used for setting up new precision experiments on accelerators scientific centers of Italy, Hungary, Poland, Kazakhstan, Uzbekistan and Japan.

**Application of the research results.** Based on the obtained results on the development of modified two- and three-particle methods for calculating nuclear-astrophysical reactions of radiation capture at ultra-low energies:

the developed generalized modified distorted wave method for the peripheral above-barrier transfer of the charged particle  $A(x,y) B$  ( $x = y + a$ ,  $B = A + a$ , where  $a$  is the transmitted particle) with an approximate account of the three-particle Coulomb effects in the initial, intermediate and state was used to analyze nuclear reactions on light nuclei in interactions with deuterons and alpha particles, performed at the Institute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan (Letter of the Institute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy of Republic of Kazakhstan № 34-02-13 / 836 of 12 June 2018.). According to the research results, a correct description of the astrophysical  $S$ -factors of a number of nuclear-astrophysical reactions of radiation capture of the CNO cycle and their high precision extrapolation to the energy region near the Gamow peak was achieved;

the proposed modified two-particle potential method (MTPPM) of model-independent extraction of experimental values of the asymptotic normalization coefficient (ANC) for  $A + a \rightarrow B$  and the developed modified two-particle R-matrix method for describing the nuclear-astrophysical reaction  $A(a, \gamma)B$  taking into account information about the ANC for  $A + a \rightarrow B$  in the direct part of the amplitude was used in the creation of an experimental research methodology on the EG-2 electron accelerator of the National University of Uzbekistan (Letter of the Ministry of High and Secondary Special Education of the Republic of Uzbekistan No 89-0303148 by 2018.09.06.). Using the results of the research helps to explain the experimental results of the radiative capture of a proton by the  $^{12}\text{C}$  and  $^{16}\text{O}$  nuclei and to determine the rates of the nuclear-astrophysical reactions of the radiation capture of the proton by the  $^{12}\text{C}$  and  $^{14}\text{N}$  nuclei;

the obtained results on the astrophysical S-reaction factor of the radiation capture  $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$  were used by international researchers (links in foreign scientific journals: 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, etc.). The results obtained supplemented the database on the determination of the reaction rate of  $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$  taking place in the interior of the Sun and massive stars and served as a comparative analysis of the results obtained.

**Approbation of the research results.** The main results of the thesis were reported and discussed at 15 international and republican scientific conferences.

**Publication of the research results.** On the topic of the thesis 26 scientific papers were published. 11 scientific articles of them are recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of doctoral theses, 10 of them were published in foreign scientific journals.

**Structure and volume of the dissertation.** The thesis consists of an introduction, five chapters, conclusion, list of references and has a total amount of 184 pages.

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

**І бўлим (part I; I часть)**

1. Igamov S.B., R. Yarmukhamedov. Triple-differential cross -section of the  $^{208}\text{Pb}(^6\text{Li},\alpha d)^{208}\text{Pb}$  Coulomb breakup and astrophysical S-factor of the  $d(\alpha,\gamma)^6\text{Li}$  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  $^{11}\text{C}(p,\gamma)^{12}\text{N}$  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  $a+A\rightarrow B+\gamma$  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  $^{14}\text{N}\rightarrow^{13}\text{C}+p$  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  $p+^7\text{Be}\rightarrow^8\text{B}$  and the direct  $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$  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  $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$  reaction at low energies and the asymptotical normalization coefficient (nuclear vertex constant) for the  $p+^{12}\text{C}\rightarrow^{13}\text{N}$  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 astrophysical  $a+A\rightarrow B +\gamma$  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)  $A+a\rightarrow B$  and their application to the  $A(\alpha,\gamma)B$  astrophysical  $S$  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  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$  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  $^6\text{Li} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + \alpha + d$ // 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  $^6\text{Li}(p,g)^7\text{Be}$  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  $T(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$  and  $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$  reactions// 2th Inter. Conf. «Nuclear and Radiation Physics», 7-10 June 2001. – Almaty (Kazakhstan), 2001 – p. 69

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

15. Igamov S.B., Tursunmuratov T.M., Yarmukhamedov R. Model independent spectroscopic information from an analysis of peripheral direct radiative capture reaction and its application for an extrapolation of an astrophysical  $S$ - factor to stellar energies// The 5<sup>th</sup> 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  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$  astrophysical  $S$ -factor in frame of the R-matrix approach // Proc. 4<sup>th</sup> 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 peripheral direct capture  $A(a,\gamma)B$  reaction at stellar energies// 3<sup>th</sup> 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  $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$  Reaction at Extremely Low Energies Within the Modified Two

– Body Potential Approach// 3<sup>th</sup> 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  $T(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$  and  $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$  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 (Nuclear Vertex Constant) and Nuclear Astrophysical Problem// The 6<sup>th</sup> 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  $^{12}\text{C}+p\rightarrow^{13}\text{N}$  and the astrophysical S - factor of the  $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$  reaction at stellar energies // 6<sup>th</sup> 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., Zapparov E.A. Asymptotic Normalization Coefficients for the States of Nucleus  $^{14}\text{N}$  and Astrophysical S –Factors for the  $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$  Reaction // The 6<sup>th</sup> 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 4<sup>th</sup> 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  $^{12}\text{C}+p\rightarrow^{13}\text{N}$  and the astrophysical S - factor of the  $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$  reaction at stellar energies // The 4<sup>th</sup> 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  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$  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  $^6\text{Li}$  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

Автореферат «\_\_\_\_\_» журнали тахририяида тахрирдан ўтказилди  
(\_\_\_\_\_ 2019 йил).

Босишга рухсат этилди: \_\_\_\_\_ 2019 йил  
Бичими 60x45 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>, «Times New Roman»  
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.  
Шартли босма табағи 3,6. Адади: 100. Буюртма: № \_\_\_\_\_.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»  
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.