ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ, АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ, ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

ТОЖИБОЕВ ОЛИМЖОН РУСТАМОВИЧ

УЗАТИЛИШ РЕАКЦИЯЛАРИДАН ^{7}Be, ^{25}Mg, ^{25}Al ЯДРОЛАРИНИНГ СПЕКТРОСКОПИК ҲУСУСИЯТЛАРИ ВА РАДИАЦИОН ҚАМРАШ ^{12}C+p РЕАКЦИЯСИНИНГ ЧИҚИШ КАТТАЛИГИНИ АНИҚЛАШ ВА УЛАРНИ ЯДРОВИЙ АСТРОФИЗИКАДА ҚЎЛЛАШ

01.04.08 – Атом ядроси ва элементар заррачалар физикаси. Тезлаштирувчи техника

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

Тошкент – 2019

УДК 539.17

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

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

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

Тожибоев Олимжон Рустамович
Узатилиш реакцияларидан ^{7}Be, ^{25}Mg, ^{25}Al ядроларининг спектроскопик хусусиятлари ва радиацион қамраш ^{12}C+p реакциясининг чиқиш катталигини аниқлаш ва уларни ядровий астрофизикада қўллаш..... 3

Тожибоев Олимжон Рустамович
Определение спектроскопических характеристик ядер ^{7}Be, ^{25}Mg, ^{25}Al из реакции передачи и выхода радиационного захвата ^{12}C+p, и их применение в ядерной астрофизике..... 23

Tojiboyev Olimjon Rustamovich
Determination of the spectroscopic characteristics of nuclei ^{7}Be, ^{25}Mg, ^{25}Al from the transfer reactions and yield of the radiative capture ^{12}C+p, and their application in nuclear astrophysics……. 43

Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ
List of published works…….. 52

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ, АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ, ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

ТОЖИБОЕВ ОЛИМЖОН РУСТАМОВИЧ

УЗАТИЛИШ РЕАКЦИЯЛАРИДАН ^{7}Be, ^{25}Mg, ^{25}Al ЯДРОЛАРИНИНГ СПЕКТРОСКОПИК ҲУСУСИЯТЛАРИ ВА РАДИАЦИОН ҚАМРАШ ^{12}C+p РЕАКЦИЯСИНИНГ ЧИҚИШ КАТТАЛИГИНИ АНИҚЛАШ ВА УЛАРНИ ЯДРОВИЙ АСТРОФИЗИКАДА ҚЎЛЛАШ

01.04.08 – Атом ядроси ва элементар заррачалар физикаси. Тезлаштирувчи техника

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

Тошкент – 2019

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2018.1.PhD/FM185 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институтида бажарилган.

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

Илмий раҳбар: **Артемов Сергей Викторович**
физика-математика фанлари доктори, катта илмий ходим

Расмий оппонентлар: **Олимов Косим**
физика-математика фанлари доктори, профессор

Полвонов Сатимбой Ражапович
физика-математика фанлари номзоди, профессор

Етакчи ташкилот: **Самарқанд давлат университети**

Диссертация ҳимояси Ядро физикаси институти, Астрономия институти, Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100174, Тошкент шаҳри, Улуғбек қўрғони, Ядро физикаси институти. Тел. (+99871) 289-31-41; факс (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

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

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

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

Э.М. Турсунов
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д.,
катта илмий ходим

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

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда жаҳонда ядро қуйи ҳолатлари тузилиши ҳақида ишончли маълумотларни олишга қайта эътибор берилмоқда. Кўп жиҳатдан, бу космик технологиясининг ривожи ва экспериментал имкониятларнинг ортиши билан боғлиқ бўлган жадал ривожланаётган ядровий астрофизика эҳтиёжлари билан белгиланади. Бошқа томондан, сўнги ўн йилларда, юқори аниқликда ўлчанган тажриба натижалари таҳлилидан моделдан деярли боғлиқ бўлмаган маълумотларни, хусусан бир заррали ядро ҳолатларининг асимптотик нормировка доимийларини (АНД) олиш имконини берувчи, ядровий астрофизикада кенг қўлланилаётган назарий ёндашувлар ишлаб чиқилган. Ушбу маълумотлар ядроларнинг замонавий назарий моделларини ва реакция механизмларини текшириш, ҳамда юлдузли жараёнлардаги ва бирламчи нуклеосинтездаги Гамов энергетик ойнаси соҳасида астрофизик S-факторларни ҳисоблаш учун зарур. Бироқ, астрофизика учун муҳим бўлган енгил ядролар, жумладан бериллий, углерод ҳамда магний иштирокидаги нуклон ва альфа узатилиш реакцияларига тегишли бўлган экспериментал маълумотларнинг аксарияти ўтган асрда олинган ва катта хатоликларга эга, ёки замонавий ёндашувлар доирасида таҳлил қилинмаган. Шу боис ушбу ишда амалга оширилган магний изотоплари иштирокидаги (d,p) ва (d,t) реакцияларининг экспериментал тадқиқотлари, бу ва ^{12}C ядролари билан ўзаро таъсирларда альфа-заррача узатилиш жараёнларини батафсил таҳлил қилиш долзарб ва зарур ҳисобланади.

Бугунги кунда нуклон ва альфа-зарралар радиацион қамраш каби ядровий астрофизик жараёнларнинг чиқиш ҳамда кесим катталикларини имкон қадар юлдузлар температурасига тўғри келувчи қуйи энергияларда кичик хатоликлар билан ўлчаш имконини берувчи янги экспериментал усулларни ишлаб чиқиш муҳим ҳисобланади. Кесим (астрофизик S-факторлар) катталикларини ўлчашга бугунги кунда катта эътибор берилаётган ^{12}C каби астрофизик муҳим ядролар учун бундай жараёнларнинг чиқиш катталиклари бўйича муқобил маълумотлар жуда ҳам кам. Шунинг учун ушбу ишда активацион методининг янги вариантини яратиш, ишлаб чиқиш ва ундан фойдаланиб радиацион қамраш реакцияларининг чиқиш қийматлари бўйича янги маълумотларни олиш ҳам муҳим аҳамият касб этади.

Мамлакатимизда асосий эътибор қуйи энергияли ядро физикаси соҳасидаги фундаментал тадқиқотларни амалга оширишга қаратилмоқда. Ўзбекистонда ушбу соҳада дунёга маълум бўлган мактаб яратилди ва у қуйи (~5-20 МэВ/N) ҳамда ўта қуйи (< 0.5 МэВ) энергияларда ядровий жараёнларни ўрганишда муҳим натижаларга эришди. Мамлакатимиз илм-фан ривожи ҳамда фундаментал тадқиқот натижаларини ҳаётга татбиқ қилиш учун фундаментал тадқиқотларнинг муҳим йўналишлари Ўзбекистонни янада ривожлантириш бўйича 2017-2021 йиллардаги Ҳаракатлар

стратегиясига[1] киритилган. Ушбу ишда олиб борилган тадқиқотлар, дунёда замонавий тадқиқотларнинг олди ҳисобланувчи ядровий астрофизика муаммолари, бошқариладиган термоядро жараёнлари физикаси, жумладан ядро энергетикаси билан бевосита боғлиқ.

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

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Жаҳоннинг ядро марказлари етакчи олимлари, жумладан америкалик (A.M. Mukhamedzhanov, P.E. Tribble, K. M. Nollett, K.E. Rehm ва бошқалар), японияли к (T. Kajino, T. Motabayashi, K. Ogata, H. Hidetoshi), италиялик (C. Spitareli, M. La Cognata), козоғистонлик (Н. Буртебаев, Л. Ибраева, М. Жусупов) ва бошқалар томонидан енгил ядроларнинг бир заррали ҳолатлари учун АНД ва спектроскопик фактор (СФ) қийматларини аниқлаш ва уларни радиацион қамраш реакцияларининг астрофизик S-факторини ҳисоблашда фойдаланиш мақсадида нуклон ва кластер узатилиш периферик ядро реакциялари бўйича тадқиқот ишлари олиб борилмоқда. Ўзбекистонлик олимлар (С.В. Артемов, Р. Ярмухамедов, Г.К. Ни, ва бошқалар) томонидан бир қатор енгил ядроларда (d,t) ва (^{3}He,d) нуклон узатилиш периферик реакциялари ўрганилди. Олинган АНД қийматлари *pp*-занжири ва CNO водород ёниш циклининг бир қанча реакциялари астрофизик S-факторининг экстраполяцион қийматларини ҳисоблашда ишлатилди.

Протоннинг ^{12}C ядроси томонидан радиацион қамраш реакцияси (CNO-циклнинг кириш реакцияси) канадалик олимларнинг (C.Rolfs ва бошқалар) дастлабки ишларида ўрганилган. Тошкент (С.В. Артемов ва бошқалар) ва Пекин (Li Zhi Hong ва бошқалар) гуруҳлари томонидан олинган {^{12}C+p} системанинг АНД қийматлари бир-биридан 30% дан ортиққа фарқ қилади. Н. Буртебаев, Р. Ярмухамедов ва бошқаларнинг ишларида Гамов пики яқинидаги энергияларда (~20-25 кэВ) экстраполяция қилиш учун бу реакциянинг кесим катталигини тўғридан-тўғри қамраш механизми устун келувчи энергия соҳаларида аниқ ўлчаш зарурияти кўрсатилган. Бу

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

реакциянинг тезлигини муқобил усуллар билан, шунингдек, унинг чиқиш катталиги орқали ҳам баҳолаш муҳим саналади.

$^{3}He(\alpha,\gamma)^{7}Be$ радиацион қамраш реакцияси бирламчи нуклеосинтезнинг муҳим жараёни ва юлдузларда водород ёниш *pp*–занжирининг асосий ҳалқаларидан бири ҳисобланиб, юқори энергияли Қуёш нейтриноларининг оқимини белгилайди. Астрофизик аҳамиятга эга бўлганлиги сабабли, бу реакция юқори аниқликда қуйи энергия соҳаларига яқинлашган ҳолда 50 йиллар давомида тажриба асосида ўрганилиб келинмоқда. Яқинда LUNA ҳамкорлик доирасида (F. Confortola, D. Bemmerer ва бошқалар) ушбу реакциянинг астрофизик S- фактори ~ 93 кэВ энергиягача ўлчанди, ҳамда унинг қиймати 23 кэВ энергияда билвосита метод билан Қуёш нейтриносини ўлчаш орқали баҳоланди (Marcell P. Takács, D. Bemmerer ва бошқалар). Ўзбек олимлари Р. Ярмухамедов ва К. Турсунмахатовлар томонидан E≥90 кэВ энергияларда ушбу эксперименталь маълумотлар таҳлилидан олинган АНД қийматларидан фойдаланиб, S-факторнинг экстраполяцион ҳисоб ишлари амалга оширилган. Бироқ АНД қийматига аниқлик киритилиши лозим.

^{24}Mg-^{25}Al системасида протон узатилиши ($d,^{3}He$) реакциялардан фойдаланган ҳолда 18 ва 20 МэВ энергияларда B. Mertens (Германия) (1970), 33 МэВ энергияда F. Entezami (Буюк Британия) (1981), 38.5 МэВ энергияда R.J. Peterson (АҚШ) (1975) ишларида ва ^{24}Mg-^{25}Mg системасида нейтрон узатилиши E.W.Hamburger (АҚШ) (1960), В.В. Токаревский ва бошқалар (Украина), И.Р. Гуламов ва бошқалар (Ўзбекистон) (1990) ишларида ўрганилган. Бироқ, {^{24}Mg+p} ҳолатининг АНД қиймати фақат С.В. Артемов, С.Б. Игамов ва бошқалар (Ўзбекистон) ишларида аниқланган. Бу қиймат MgAl циклининг биринчи занжир ҳалқаси ҳисобланиб $^{24}Mg(p,\gamma)^{25}A1(\beta+)^{25}Mg(p,\gamma)^{26}A1(\beta+)^{26}Mg$ цикларида протоннинг ^{24}Mg ядросидаги радиацион қамраш реакциясининг астрофизик S-факторини баҳолашда муҳим аҳамиятга эга. ^{26}Mg изотопининг ҳосил бўлиш механизми юлдузлар нуклеосинтези моделларининг тасдиқланишида асосий ўрин тутади, чунки Коинотдаги юлдуз нуклеосинтези давомийлигининг биринчи далили ҳисобланувчи $^{26}A1(\beta+)^{26}Mg$ β–парчаланиши натижасида ҳосил бўладиган γ-линияси аниқланди. Шунинг учун {^{24}Mg+p} да протон боғланган ҳолатнинг АНД қийматини аниқлаштириш лозим.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши ЎзР ФА Ядро физикаси институти илмий-тадқиқот ишлари режасининг Ф2-ФА-Ф114 рақамли «Паст энергияли реакцияларда ҳосил бўлувчи экзотик ядроларнинг ҳусусиятларини ва енгил элементларни пайдо бўлишини ўрганиш» (2012-2016) ва Ф2-ФА-Ф117 рақамли «Ядровий астрофизикада ядро фундаментал хусусиятларининг динамик хоссалари устида тадкикотлар» (2012-2016) лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади нуклон ва альфа-кластер узатилиш периферик ядро реакциялари таҳлилидан $^{24}Mg(p,\gamma)^{25}Al$ ва $^{3}He(\alpha,\gamma)^{7}Be$ радиацион қамраш реакцияларининг S-факторини ҳисоблаш учун $^{3}He+\alpha\rightarrow^{7}Be$; $^{24}Mg+n\rightarrow^{25}Mg$;

$^{24}Mg+p\rightarrow^{25}Al$ феноменологик асимптотик нормировка доимийлари қийматларини, ҳамда, $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ радиацион қамраш реакциясининг чиқиш катталигини ва реакция тезлигини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

ядро реакцияси чиқиш катталигининг кичик қийматларини ўлчашда янги активацион усулни ишлаб чиқиш;

экспериментал маълумотлардан ядро реакциясининг чиқиш катталигини олиш алгоритмини ишлаб чиқиш ва тегишли дастур таъминотини яратиш;

янги активацион усулни амалга оширувчи ЭГ-2 тезлаткичида яратилган MAIS экспериментал қурилмасининг асосий хусусиятларини аниқлаш ва тест ўтказиш;

ЭГ-2 тезлаткичида олинган протонлар оқимида $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ реакциясининг чиқиш катталигини 190 – 650 кэВ энергия доирасида ўлчаш ишларини амалга ошириш;

14.5 МэВ энергияли дейтронларни $^{24,25}Mg$ ядролардаги эластик сочилиши, ҳамда $^{24}Mg(d,p)^{25}Mg$ ва $^{25}Mg(d,t)^{24}Mg$ нейтрон узатилиши реакцияларининг дифференциал кесимини (ДК) ўлчаш ишларини ўтказиш;

Такомиллаштирилган тўлқинларнинг бузилиши асосидаги усул орқали $^{24}Mg(d,n)^{25}Al$, $^{24}Mg(^{3}He,d)^{25}Al$, $^{25}Mg(d,t)^{24}Mg$, $^{24}Mg(d,p)^{25}Mg$, $^{12}C(d,^{6}Li)^{8}Be$ ва $^{12}C(^{3}He,^{7}Be)^{8}Be$ реакцияларининг экспериментал ДКни таҳлил қилиш ва бир заррали боғланган ҳолатлар $^{3}He+\alpha\rightarrow^{7}Be$; $^{24}Mg+n\rightarrow^{25}Mg$; $^{24}Mg+p\rightarrow^{25}Al$; $^{3}He+\alpha\rightarrow^{7}Be^{*}$ (E^{*}=0.430 МэВ) учун АНД квадратлари ва $^{24}Mg+n\rightarrow^{25}Mg$ учун СФ қийматларини олиш;

$^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ радиацион қамраш реакцияси чиқиш катталигининг ўлчанган қийматидан фойдаланиб, ушбу реакция тезлигини қуйи энергияларда ҳисоблаш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида ядровий астрофизика реакцияларида қатнашувчи енгил ядроларнинг бир заррали ҳолатлари олинган.

Тадқиқотнинг предмети бўлиб нуклон ва альфа-зарра узатилиш периферик ядро реакциялари ҳамда енгил ядролар иштирокидаги қуйи ва ўта қуйи энергиялардаги радиацион қамраш жараёнлари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Реакциянинг зарядли маҳсулларини кремнийли детекторлар телескопларида ΔE-E усул орқали қайд қилиш, ҳамда турларга ажратишда ва гамма-квантларни сцинтилляцион спектрометрларда қайд қилишда яхши маълум бўлган ва ишонарли экспериментал усуллардан, шунингдек маълумотларни қайта ишлашнинг умумий статистик усулларидан фойдаланилди. Маълумотларни таҳлил қилиш учун хозирги кунда кенг миқёсда фойдаланилаётган такомиллаштирилган тўлқинларнинг бузилиши асосидаги усул қўлланилади.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

радиоактив ядролар ҳосил бўлиши билан рўй берадиган зарядланган зарралар радиацион қамраш реакцияларининг кичик қийматли чиқиш катталикларини ўлчаш учун активацион усулнинг янги варианти ишлаб чиқилган;

$^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ реакциясининг чиқиш катталиги биринчи марта 350 кэВ дан

қуйи энергияларда ўлчанган ва унинг тезлиги юлдузлар ҳароратида ($0.01 \le T_9 \le 1.0$) ҳисобланган;

дейтронларнинг E_d=14.5 и 18 МэВ энегияларда ^{24,25}Mg+d эластик сочилиши, ҳамда ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg ва ^{25}Mg(d,t)^{24}Mg реакцияларининг экспериментал дифференциал кесим қийматлари 8° дан 44° бурчак оралиғида юқори аниқликда олинган;

^{25}Mg ва ^{25}Al ядроларининг {^{24}Mg+n} ва {^{24}Mg+p} бир заррали боғланган конфигурациялари учун асимптотик нормировка доимийларининг квадратик қийматлари $C^2_{25Mg\to24Mg+n}$=1.72±0.07 Фм$^{-1}$, $C^2_{25Al\to24Mg+p}$=4.57±0.49 Фм$^{-1}$, ҳамда ^{25}Mg ядросининг ^{24}Mg+n конфигурацияси асосий ҳолати учун спектроскопик фактор қиймати олинган $Z_{25Mg\to24Mg+n}$ =0.41±0.12;

^{7}Be ядросининг асосий (J^π=3/2$^-$, E*=0.0 МэВ) ва биринчи уйғонган (J^π=1/2$^-$, E*=0.430 МэВ) ҳолатларида ^{3}He+α→^{7}Be системасида α-заррали боғланган конфигурация учун асимптотик нормировка доимийларининг квадратик қийматлари олинган $C^2_{7Be\to3He+\alpha}$=22.9±0.7 Фм$^{-1}$, $C^2_{7Be\to3He+\alpha}$=18.0±0.5 Фм$^{-1}$.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

зарядланган зарраларнинг радиацион қамраш барьер ости жараёнларида чиқиш катталикларни ва астрофизик S-факторнинг жуда кичик қийматларини ўлчаш имконини берувчи активацион усул вариантини амалга ошириш учун экспериментал ускуна яратилган;

реакция чиқиш катталиги ва астрофизик S-факторини юлдузлар энергиялари соҳаларида экстраполяция қилиш учун аҳамиятли ва зарур бўлган протоннинг ^{12}C ядросида радиацион қамраш ядровий астрофизик жараённинг 190 – 650 кэВ энергиялар оралиқларида чиқиш катталиги олинган;

енгил ядроларнинг бир заррали боғланган ҳолатлари учун асимптотик нормировка доимийсининг қийматлари олинган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги олинган экспериментал маълумотлар бўйича реакциянинг зарядли маҳсулларини кремнийли детекторлар телескопларида қайд қилиш ва идентификациялашда ишончли ва кенг қўлланилувчи ΔE-E – усул ва аннигиляцион гамма-квантларни қайд қилишда сцинтилляцион усуллардан фойдаланилганлиги, етарли даражада статистик таъминланганлиги, экспериментал усулларнинг диққат билан калибровка қилинганлиги ва синов ўлчашларнинг мавжуд маълумотлар билан мос келишлиги, шунингдек экспериментал маълумотларни қайта ишлашнинг ва тахлил қилишнинг умумий статистик усулларидан фойдаланганлиги билан асосланади.

Ядро сатҳлари тўғрисидаги спектроскопик маълумотлар хозирги вақтда тан олинган радиацион қамраш ва нуклон узатилиш периферик ядро реакциялари тахлилининг назарий моделлари доирасида олинди ва бошқа тадқиқотчиларнинг экспериментал натижалари ва назарий хулосалари билан яхши мос келади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Натижаларнинг илмий аҳамияти шундан иборатки, ^{3}He+α→^{7}Be,

$^{24}Mg+n \rightarrow ^{25}Mg$, $^{24}Mg+p \rightarrow ^{25}Al$ учун аниқланган асимптотик нормировка доимийларининг қийматлари, бу қийматларни олдиндан айтиб берувчи енгил ядроларнинг бир заррали сатхлари тузилиши назарий моделларининг тўғрилигини текшириш имконини беради. Улардан ($^{3}He+\alpha$) қўшилиш ва ^{24}Mg ядроларида нуклонни радиацион қамраш реакцияларининг кесимларини экспериментал эришиб бўлмайдиган ўта қуйи энергиялар соҳаларида экстраполяцион ҳисобларда фойдаланиш, юқори энергетик Қуёш нейтринолари оқимини ва юлдузларда водород ёниш Mg-Al циклида тўғридан-тўғри жараён улушини тегишлича баҳолаш имконини беради. ^{12}C ядроларида протон радиацион қамраш реакцияси чиқиш катталигининг ўлчанган қийматлари юлдузларда водород ёниш CNO – циклида ушбу жараённинг тезлигини альтернатив назарий баҳолаш имконини беради.

Натижаларнинг амалий аҳамияти шундан иборатки, зарядли зарралар радиацион қамраш жараёнларида жуда кичик қийматли чиқиш катталикларини ўлчаш активацион усулининг ишлаб чиқилган янги варианти ядровий астрофизика соҳасидаги фундаментал тадқиқотларда қўлланилиши билан бирга, амалий мақсадлар – тез нейтронлар ва зарядланган зарралар оқимларида активацион таҳлилда ҳам ишлатилиши мумкин. Ярим емирилиш даври бир неча ўн секундлардан то бир неча ўн соатларгача бўлган деярли ҳар қандай емирилиш маҳсулотларини ўлчашни ўз ичига олувчи «PROMPT» ҳамда «ACTIVATION» имкониятлари сабабли, ушбу усул турли хил экспериментал масалаларга мослашувчан ҳисобланади.

Енгил ядроларнинг асосий ва қуйи боғланган ҳолатларининг асимптотик нормировка доимийларининг олинган феноменологик қийматлари енгил ядроларнинг бир заррали ҳолатлари бўйича тузилишини назарий моделлар асосида ўрганишда ва ядро реакцияларининг кесимларини экстраполяцион йўл билан ҳисоблашда, шунингдек ядровий астрофизикада ҳам ишлатилиши мумкин.

Углеродда протон радиацион қамраш реакцияси чиқиш катталигининг олинган экспериментал қийматларини қуйи энергияли ядро реакциялари назарияси ҳамда ядровий ва термоядровий ускуналар материалшунослигида ҳам қўллаш мумкин.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. ^{12}C, $^{24,25}Mg$ ядроларида узатилиш реакцияларни ва радиацион қамраш реакцияларни тадқиқ қилишдан олинган натижалар асосида:

радиацион қамраш реакцияларининг чиқиш ва кесим катталикларини ўлчаш учун активацион усулнинг ишлаб чиқилган варианти “Астрофизик ва ядровий жараёнлар тадбиқи учун 1p-қобиқ ядроларда енгил ионлар таъсиридаги ядро реакцияларининг кесимларини ўлчаш” (2018-2020) мавзусидаги лойиҳа доирасида зарядланган зарраларни радиацион қамраш ядровий астрофизик реакцияларни тадқиқ қилишда фойдаланилган (Козоғистон Республикаси Энергетика Вазирлиги ҳузуридаги Ядро физикаси институтининг 2019 йил 29 апрелдаги 34-11-01-04/571 - сонли маълумотномаси). Илмий натижаларининг қўлланилиши радиацион қамраш

реакцияларининг жуда кичик қийматдаги кесим катталикларини ўлчаш имконини берган;

E_d=14.5 и 18 МэВ энегияларда ^{24,25}Mg+d эластик сочилиш, ҳамда ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg ва ^{25}Mg(d,t)^{24}Mg реакцияларининг олинган экспериментал дифференциал кесим қийматлари, шунингдек ушбу реакциялар таҳлилидан олинган АНД қийматлари МТМ “Курчатов институти” Ядро реакциялари лабораториясида қуйи энергияли ядро реакцияларини тадқиқ қилишда фойдаланилган (МТМ “Курчатов институти”нинг 2019 йил 26 апрелдаги маълумотномаси). Илмий натижаларининг қўлланилиши Козоғистон Республикаси Ядро физикаси институти У150-М циклотрони ҳамда Варшава Университети Оғир ионлар лабораторияси С200-Р циклотронлари оғир ионлар дасталарида янги тажрибаларни режалаштириш ва тадқиқ қилиш имконини берган;

магний изотопларида нуклон узатилиш периферик реакциялари таҳлилидан ^{25}Mg ва ^{25}Al ядроларининг {^{24}Mg+n} ҳамда {^{24}Mg+p} ҳолатлари учун олинган АНД қийматлари “Астрофизик ва ядровий жараёнлар тадбиқи учун 1р-қобиқ ядроларда енгил ионлар таъсиридаги ядро реакцияларининг кесимларини ўлчаш” (2018-2020) мавзусидаги лойиҳа доирасида Ядро физикаси институти тезлаткичларида тажрибаларни ўтказишда фойдаланилган (Козоғистон Республикаси Энергетика Вазирлиги ҳузуридаги Ядро физикаси институтининг 2019 йил 29 апрелдаги 34-11-01-04/571 сонли маълумотномаси). Илмий натижаларининг қўлланилиши магний изотопларининг протон қамраш ядровий астрофизик реакцияларини экспериментал тадқиқ қилишда муҳим бўлган кесим катталигини баҳолаш имконини берган;

^{12}C(d,^{6}Li)^{8}Be ва ^{12}C(^{3}He,^{7}Be)^{8}Be реакциялар таҳлилидан ^{3}He+α→^{7}Be учун олинган АНД қийматлари, ҳамда E_d=14.5 и 18 МэВ энергияларда ^{24,25}Mg+d эластик сочилиш ва ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg ва ^{25}Mg(d,t)^{24}Mg реакцияларининг олинган экспериментал дифференциал кесим қийматлари “Енгил ядроларнинг асимптотик нормировка доимийларини аниқлаш” мавзусидаги лойиҳа доирасида фойдаланилган (Варшава Университети Оғир ионлар лабораториясининг 2019 йил 20 майдаги маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши Варшава Университети С200-Р циклотрони оғир ионлар дасталарида янги тажрибаларни режалаштириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 7 та халқаро илмий-амалий анжуманларда муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 12 та илмий иш нашр қилинган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 5 та мақола, жумладан, 3 таси хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйҳатидан иборат.

Диссертациянинг умумий ҳажми 113 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

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

Диссертациянинг "**Периферик узатилиш реакциялари кесимидан АНД ва СФ олиш усуллари**" деб номланган биринчи бобида зарралар узатилиши ядро реакцияларининг, жумладан, периферик узатилиш ядро реакцияларида (такомиллаштирилган тўлқинларнинг бузилиши асосидаги усул) асосий назарий усулларнинг қисқача таҳлили келтирилган. Иккинчи ҳолатда эса ядровий астрофизикада Қуёш ва катта массали юлдузлар қаърида рўй берадиган ядро реакциялари тезликларини ҳисоблашда муҳим ўрин тутувчи моделдан деярли боғлиқ бўлмаган спектроскопик маълумотларни олиш мумкинлиги кўрсатилган.

Шу билан бирга, периферик узатилиш ядро реакциялари $A(x,y)B$ учун, бунда $B=A+a$ ва $x=y+a$ (бу ерда x – енгил ядролар d, t, ^{3}He; a – узатилаётган заррача, нуклон ёки α-кластер), $I_{Aa;l_B j_B}(r)$ қопланиш интеграли радиал қисмининг асимптотик кўриниши, $r > r_N$ ядро таъсирлари соҳасидан ташқарида $\{A+a\}$ ва $\{y+a\}$ боғланган ҳолатларда бир заррали тўлқин функциясининг радиал боғлиқлигига ўхшаш бўлади ва қуйидаги ифода орқали аниқланади (агар a –зарядланган зарра бўлса):

$$I_{Aa;l_B j_B}(r) \approx C_{B\to Aa;l_B j_B} \frac{W_{-\eta_B l_B+1/2}(2\kappa_{Aa} r)}{r}, \qquad (1)$$

бу ерда $C_{B\to Aa;l_b j_B}$ - $A+a\to B$ (ва $y+a\to x$ учун ҳам) конфигурация учун тўлқин функциялар қопланиш интеграли нормировкасини периферияда аниқловчи $B=\{A+a\}$ боғланган ҳолат асимптотик нормировка доимийси (АНД), $W_{\alpha;\beta}(...)$ - Уиттекер функцияси, $\eta_B = Z_A Z_a e^2 \mu_{Aa} / \kappa_{Aa}$ - $B=\{A+a\}$ боғланган ҳолат учун Кулон параметри, $\kappa_{Aa} = \sqrt{2\mu_{Aa}\varepsilon_{Aa}}$, μ_{Aa} - A ва a зарраларнинг келтирилган массалари, ε_{Aa} - B ядросининг $\{A+a\}-$ каналига нисбатан боғланиш энергияси.

Битта узатилувчи момент l ($l_B=l$ ва $j_B=j\pm=l\pm s$, s - a заррача спини) устун келувчи фаразга кўра, такомиллаштирилган тўлқинларнинг бузилишига асосланган усулда периферик реакциянинг дифференциал кесими (ДК) спектроскопик фактор (СФ) билан эмас, АНД квадратлари кўпайтмалари билан аниқланади:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = C^2_{B;l,j+}[R_{j+}(E,\theta;b_{l,j+},b_x) + \lambda R_{j-}(E,\theta;b_{l,j-},b_x)\,, \qquad (2)$$

$\lambda = (C_{l,j-})^2/(C_{l,j+})^2$ ва

$$R(E,\theta;b_{l,j}) = \left(\frac{C_x}{b_x}\right)^2 \frac{\sigma^{DW}(E,\theta;b_{l,j})}{b^2_{l,j}}\,, \qquad (3)$$

бу ерда $\sigma^{DW}(E,\theta;b_{l,j\pm})$ – тўлқинларнинг бузилишига асосланган усулда DWUCK5 прграмма алгоритмидан фойдаланган ҳолда ҳисобланувчи нуклон узатилишнинг «бир заррали» ДК. b_x ва $b_{l,j\pm}$– мос равишда x ва B ядролар потенциалида узатилаётган a заррача боғланган ҳолатининг бир заррали тўлқин функцияси учун «бир заррали» асимптотик нормировка доимийси. Умумий ҳолда АНД квадрати C^2 ва СФ Z қуйидаги ифода билан боғланган бўлиб,

$$C^2 = Zb^2\,, \qquad (4)$$

тўлқинларнинг бузилишига асосланган усулда ҳисобланувчи периферик амплитуда абсолют нормировкасининг тўғрилигини таъминлайди ва кичик бурчакларда реакция дифференциал кесимига аососий ҳиссасини қўшади.

Периферик бўлишлик шарти:

$$R(E,\theta;b_{l,j}) = R(b) \approx const \qquad (5)$$

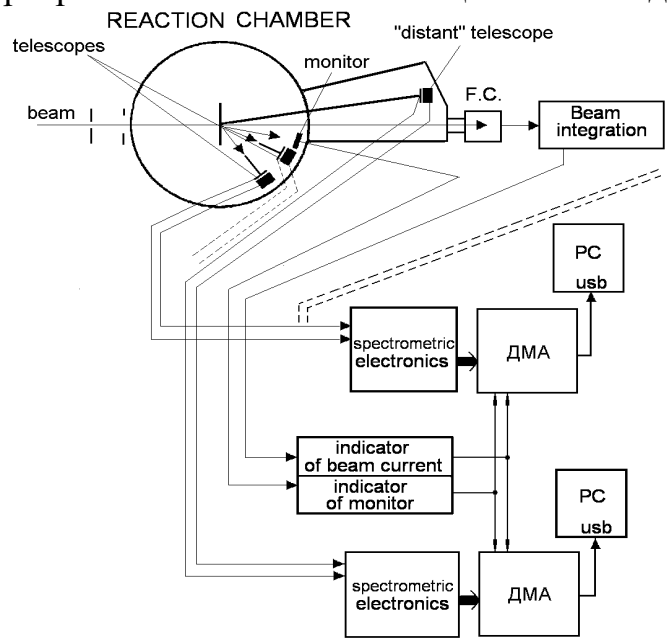
R функция қийматининг моделдан боғлиқ $b_{l,j}$ катталикнинг ўзгаришидан, шунингдек боғланган ҳолат потенциали геометрик параметрларининг бир хил эмаслигидан деярли боғлиқ бўлмаслиги талаб этилади. Бу, (2) ифодадан агар $x=\{y+a\}$ учун АНД қиймати маълум бўлса, $B=\{A+a\}$ учун АНД қийматини деярли моделсиз аниқлаш имконини таъминлайди. Қайд этиш лозимки, бунда $b_{l,j}$ ва $\sigma^{DW}(E,\theta;b_{l,j})$, шунингдек СФ ҳам боғланган ҳолат модел потенциали геометрик параметрларидан сезиларли равишда боғлиқ бўлади.

Диссертациянинг **«Радиацион қамраш чиқиш катталиклари ва узатилиш реакцияларининг дифференциал кесимларини ўлчаш усуллари, эксперименталь маълумотлар»** деб номланган иккинчи бобида икки эксперименталь усуллар – эксперименталь маълумотларни олиш учун ишлатилган циклотрон дастасида узатилиш реакцияларининг ДК ўлчаш усули ҳамда ўта қуйи энергияларда ядровий-астрофизик реакцияларининг чиқиш ва кесимини ўлчаш учун активацион усулнинг ишлаб чиқилган варианти таснифи ёритилган.

Биринчи усулда эксперименталь қурилма илгари ЎзР ФА ЯФИ да ишлаб чиқилган ва ҚР ЯФИ ходимлари билан ҳамкорликда У-150М тезлаткичининг ион ўтказгичига ўрнатилган. Умумий ҳолда ўлчаш усули зарралар оқимини коллимациялаш системаси билан биргаликда реакция камерасини, нишон ва детектрлаш системаларини, реакция махсуллари спектрларини ўлчаш ва идетификациялаш ΔE-E-усулини амалга оширувчи NIM стандартидаги

спектрометрик электроникани, ҳамда маълумотларни йиғиш ва қайта ишлаш учун махсус ишлаб чиқилган программа таъминотини ўз ичига олади.

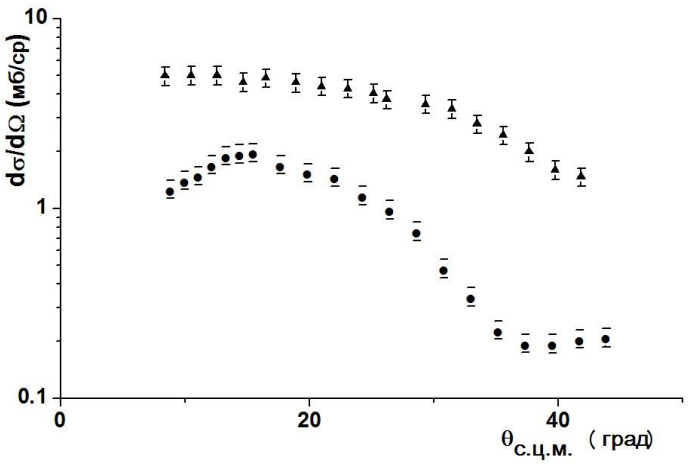
1-расмда циклотрон дастасида ядро реакциясининг зарядланган махсуллари спектрларини ўлчаш блок-схемаси келтирилган. Реакция камерасида ΔE ва E яримўтказгичли детекторлардан иборат 3 та телескоп, ҳамда нишон ҳолатини назорат қилиш учун монитор детектори мавжуд. Нишондан ўтган дасталар оқими Фарадей цилиндрида ютилади ва ҳар бир ўлчаш учун унинг оқими интегралланади ва сақланади. Телескоплардаги спектрометрик сигналлар кучайтирилади ва мос келтирилгандан сўнг икки ўлчамли кўпканалли импульслар анализаторига тушади (1-расм), шундан сўнг икки ўлчамли ΔE-E –спектрлар шахсий компьютерда йиғилади. Кейин рақамлаштирилган маълумотлар экспериментал ДК олиш учун of-line режимда махсус программа таъминоти билан қайта ишланди.



1-расм. Циклотрон дастасида ўлчаш блок-схемаси

Магний нишонлар сифатида қалинликлари 0.82 ва 0.78 мг/см^2 бўлган юқори даражада бойитилган ^{24}Mg ва ^{25}Mg металл фольгалари ишлатилди. Ўлчанган кесимлардаги систематик хатолик нишонлар қалинлигидаги ноаниқлик (~6%), спектрометрнинг фазовий бурчагига тегишли ноаниқлик (1%) билан боғлиқ, статистик хатолик бурчак тақсимотининг асосий максимумида 1-5% ташкил этади, ва умумий экспериментал хатолик 8-10% дан ошмайди.

Дейтронларнинг ^{24,25}Mg ядроларида эластик сочилиш ва ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg, ^{25}Mg(d,t)^{24}Mg реакциялар ДКнинг бурчак тақсимоти асосий максимумни ўз ичига олувчи бурчакларда E_d=14.5 ва 18 МэВ энергияларда ўлчанди (2-расм). Ўлчанган ДК (адабиётларда келтирилган маълумотлар билан бирга) 3 бобда ^{24}Mg+n→^{25}Mg$_{o.c.}$ учун феноменологик АНД ва СФ қийматларини аниқлаш мақсадида тўлқинларнинг бузилишига асосланган усулда таҳлил қилинди.



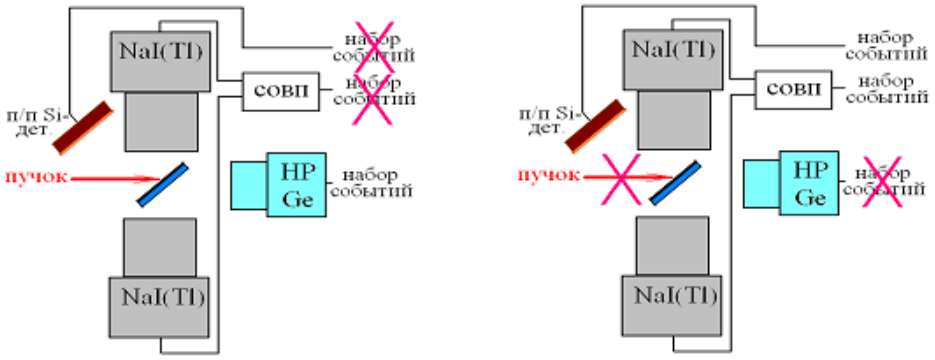
2-расм. E_d=14.5 МэВ энергияли дейтронларда $^{24}Mg(d,p)^{25}Mg$ (учбурчак) ва $^{25}Mg(d,t)^{24}Mg$ (айлана) реакцияларининг экспериментал ДК

2 бобнинг 2.3 бўлимида β^+-актив сўнгги ядро ҳосил бўлиши билан рўй берувчи $A(a,\gamma)B$ зарядланган зарралар радиацион қамраш реакцияси чиқиш катталиги Y_B(E) нинг кичик қийматларини ўлчаш учун активацион усулнинг ишлаб чиқилган ва тузилган янги варианти баён қилинган. Реакция чиқишига $Y(E)$ E энергияли a заррачалар бирлик оқимининг қалинлиги a заррачалар югуриш йўлидан катта бўлган нишондаги A ядролар билан ўзаро таъсирлашувида хосил бўлган B ядролар сони тушунилади:

$$Y(E) = n_A \int_0^E dE' / S_x(E') \times \sigma(E') = n_A \int_0^E W_1(E') \times \sigma(E') dE' \qquad (6)$$

бу ерда n_A – нишон моддадаги A ядролар концентрацияси, $S_x(E')$ – нишондаги модда узунлик бирлигида заррачалар оқимининг солиштирма ионизацион йўқотилиш функцияси, $\sigma(E')$ – реакция тўлиқ кесими.

Усулнинг ўзиги хос хусусияти нишон нурланишининг ва аннигиляцион квантларни қайд қилишнинг берилган нурлантириш ва ўлчаш даврларида автоматик равишда даврий такрорланиши хисобланади, ва схематик тарзда 3-расмда кўрсатилган.



3-расм. Маълумотлар тўпланиш тартибининг кўрсатилиши. Чапда - «оний» γ-квантлар спектрларининг йиғилиши, ўнгда – ҳосил бўлган радиоактив ядролар емирилишининг йиғилиши

Бунда даврлар давомийлиги фойдали ва фон саноқларининг нисбатини яхшилаш учун оптималлаштирилади, нурланиш оқимининг интеграл саноғи ва аннигиляцион квантларнинг саноғини тўплаш, оқим интенсивлигининг вақт бўйича ўзгаришини хисобга олиш, охирги ядроларнинг ярим емирилиш даврини аниқлаш учун ҳар бир даврда градацияларга (мос равишда i ва j индекслар) бўлинади.

Даврларнинг умумий сони керакли статистика билан аниқланади.

Нурланиш оқими интеграторидан ва аннигиляцион квантлар мослашувидан автоматик алмашинувчи тез счетчикларда қайд қилинаётган саноқлар шахсий компьютер хотирасида даврлар бўйича икки ўлчамли саноқлар матрицаси Nγγ(i,j) кўринишида йиғилади, сўнг махсус ишлаб чиқилган дастур таъминотида таҳлил қилинади. Бундай тарзда йиғилган маълумотларни таҳлил қилиш ва улардан реакция чиқиш катталигини олиш аҳамиятли вазифа ҳисобланади, чунки оқим ўзгаришига тузатиш киритишдан ташқари, парчаланиш эгри чизиғи орқали керакли ядрони идентификациялаш ва фақат унинг парчаланишидан ҳосил бўлган саноқларни ажратиш, бошқа энергияли ўлчашга ўтишда ва бир ўлчаш давридан иккинчисига ўтишда нишонда йиғилувчи қолдиқ активликни эътиборга олиш лозим бўлади. Ушбу қолдиқ активликлар ва фоннинг улуши баҳоланади ва $N_{\gamma\gamma}(i,j)$ нинг саноқ қийматларидан чиқариб юборилади. Шундан сўнг, барча даврий ўлчашлардаги йиғиндилар (i индекс бўйича) нишондаги β^+ - актив аралашма ядролар таркибини график тарзда таҳлил қилувчи саноқ тезлиги массивига $V_{\gamma\gamma}(j)$ ўтказилади. *B* ядроларнинг a_B фойдали активлиги билан, текширилаётган реакциянинг чиқиши Y_B орасидаги охирги ифода мураккаб тузилишга эга бўлади:

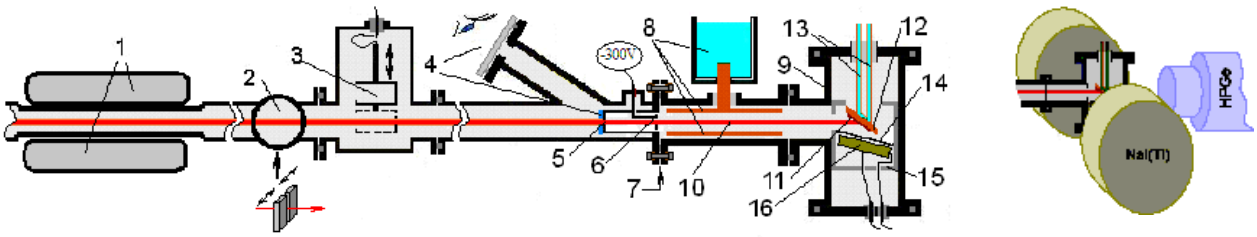
$$a_B = C \cdot Y_B \cdot (1/\delta t_{irr}) \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot \delta t_{irr}}) \cdot e^{-\lambda \cdot t_{irr}}) \cdot \sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{m=1}^{i} \left[e^{-\lambda \cdot \Delta t \cdot (j-m)} \cdot \sum_{k=1}^{k_{\max}} \{ N_{m,k}^{I} \cdot e^{k \cdot \lambda \cdot \delta t_{irr}} \} \right] \quad (7)$$

бу ерда C – интеграторни калибровкалашдаги (импульс/кулон) ва формулага киритилган ўлчаш бирликларини ҳисобга олган ҳолдаги доимий; $N_{m,k}^{I}$ экспериментнинг “*m*-чи” давридаги оқим интеграторининг “*k*-чи” саноғи; t_{irr} – даврдаги нурлантириш вақти; δt_{irr} - нурлантириш вақтини бўлиниш интервали.

Шундай қилиб, реакциянинг *E* белгиланган энергиядаги чиқиш катталиги ёки тўлиқ кўнгдаланг кесимини аниқлаш тартиби, экспериментал маълумотлардан бизни қизиқтирган охирги *B* ядрога нисбатан эффектив a_B активликни олишга асосланади.

Ишлаб чиқилган такомиллаштирилган активацион усулни амалга оширувчи экспериментал қурилма ЭГ-2 «СОКОЛ» электростатик тезлаткичида йиғилди (ЯМФМТИ ходимлари билан ҳамкорликда), чунки тезлаткич ўзининг параметрларига кўра енгил ядроларда протон радиацион қамраш ядро-астрофизик жараёнларни тадқиқ қилиш имконини беради.

4-расмда ионўтказгичнинг оқимда аралашма компоненталарни чекловчи ажратувчи магнитдан (1) кейинги бир нечта қисмлари, ҳамда қурилманинг қисмлари схематик кўрсатилган.



1- ажратувчи магнит, 2- тирқишли коллиматор. 3 – оқим узгич, 4 – кўрувчи ойна, 5 – оқимни шакллантирувчи диафрагма, 6 – чегараловчи ҳалка, 7 – электроизоляцияли уланиш, 8 – азот қопқони, 9 – нишон камераси, 10 – оқим траекторияси, 11 – нишон, 12 – нишонлар тутқичи, 13 – сувли совутиш системаси, 14 – экранловчи фольга, 15 – қўрғошинли конвертер, 16 – кремнийли детектор. Ўнг томондаги қисмда сцинтиляцион NaI(Tl) кристали ва HPGe-детектор схематик тасвирланган

4-расм. Оқим ташувчи система ва экспериментал қурилма

Нишон камераси ён томонларида 3 та гардишли Т-шаклли труба кўринишидаги ички диаметри 40 мм ли зангламайдиган пўлатдан тайёрланган. Камера ионўтказгичнинг бошқа қисмларидан изоляция қилинган бўлиб, нишонга келиб тушаётган оқимни интеграллаш учун Фарадей цилиндри бўлиб хизмат қилади.

Детекторлаш системаси қалинлиги 50 мм ли қўрғошин ҳимоя девори билан ўралган иккита сцинтилляцион NaI(Tl) детекторларидан ва қайд қилиш нисбий эффективлиги 40% бўлган, ҳамда энергия барқарорлигини, ўрганилаётган реакциядан “оний” гамма-квантларни детекторлаш орқали назорат қилувчи HPGe – детектордан иборат

Яратилган усулнинг ишлашини текшириш ва созлаш учун $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ реакциянинг чиқиш катталиги протоннинг $^{12}C+p$ системада биринчи резонансга тўғри келувчи энергия соҳаларида (E_r=457 кэВ) ўлчанди ва адабиётлардаги шу энергия соҳаларидаги мавжуд ишончли қийматлар билан яхши мос келиши аниқланди.

Ишлаб чиқилган усулда реакциянинг чиқиш катталиги 190≤E≤650 кэВ энергиялар соҳаларида ўлчанди, ўлчаш натижалари 1-жадвалда келтирилган. Чиқиш катталиги бўйича ўлчаш натижалари 4 бобда $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ радиацион қамраш реациясининг тезлигини ҳисоблашда фойдаланилди.

Ер=550 ва 650 кэВ энергияларда олинган қийматлар хатоликлар чегарасида Seagrave J.D. (Phys. Rev. 84 (1951) p.1219) ишдан олинган натижаларга тўлиқ мос тушади (жадвалда ярим қора шрифт билан ажратилган).

1-жадвал

$^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ реакциянинг чиқиш катталиги бўйича экспериментал натижалар

E_p, кэВ (лаб)	Y(E), 1/протон	E_p, кэВ (лаб)	Y(E), 1/протон
190	$3.96\cdot10^{-14}\pm3.09\cdot10^{-14}$	457	$2.57\cdot10^{-10}\pm4.62\cdot10^{-12}$
200	$5.62\cdot10^{-14}\pm2.89\cdot10^{-14}$	467	$3.50\cdot10^{-10}\pm1.45\cdot10^{-12}$
210	$8.06\cdot10^{-14}\pm1.87\cdot10^{-14}$	475	$4.57\cdot10^{-10}\pm8.68\cdot10^{-12}$
230	$1.85\cdot10^{-13}\pm2.82\cdot10^{-14}$	485	$5.32\cdot10^{-10}\pm1.01\cdot10^{-11}$
257	$3.71\cdot10^{-13}\pm3.47\cdot10^{-14}$	500	$5.67\cdot10^{-10}\pm1.13\cdot10^{-11}$
300	$1.29\cdot10^{-12}\pm6.90\cdot10^{-14}$	550	$6.37\cdot10^{-10}\pm1.07\cdot10^{-11}$ **$6.81\cdot10^{-10}\pm4.77\cdot10^{-11}$(*)**
350	$5.38\cdot10^{-12}\pm1.48\cdot10^{-13}$	600	$6.77\cdot10^{-10}\pm1.26\cdot10^{-11}$
400	$2.26\cdot10^{-11}\pm5.75\cdot10^{-13}$	650	$7.26\cdot10^{-10}\pm1.20\cdot10^{-11}$ **$7.19\cdot10^{-10}\pm5.03\cdot10^{-11}$ (*)**
447	$1.62\cdot10^{-10}\pm1.62\cdot10^{-12}$		

Диссертациянинг **«Узатилиш реакцияларининг дифференциал кесимларини таҳлил қилиш, АНД ва СФ аниқлаш»** деб номланган учинчи бобида нейтрон узатилиши $^{24}Mg(d,p)^{25}Mg$, протон узатилиши $^{25}Mg(d,t)^{24}Mg$, $^{24}Mg(d,n)^{25}Al$, $^{24}Mg(^3He,d)^{25}Al$ ва α–заррачалар узатилиши $^{12}C(d,^6Li)^8Be$, $^{12}C(^3He,^7Be)^8Be$ реакцияларидан $^{24}Mg+n\rightarrow^{25}Mg$, $^{24}Mg+p\rightarrow^{25}Al$ ва $^3He+\alpha\rightarrow^7Be$ бир заррали боғланган ҳолатлари учун феноменологик АНД ва СФ қийматларини олиш учун тўлқинларнинг бузилишига асосланган усулдаги таҳлил натижалари келтирилган. Ҳар бир ҳолатда, дастлаб, ДК бурчак тақсимотининг асосий максимум соҳаларида реакцияларнинг периферик бўлишлиги баҳоланди ((2), (5) формулаларга қаранг). Феноменологик АНД қийматларини олиш, экспериментал қийматларга мос келтириш орқали ҳисобланган ДКни (2) бурчак тақсимотнинг асосий максимумига нормировка қилиш орқали амалга оширилди. Ҳисобларда d→p+n конфигурация учун C_d^2=0.774 Фм$^{-1}$, ^{3}He→d+p ва ^{3}H→d+n учун $C_{3He}^2=C_t^2$=4.28 ва ^{6}Li→d+α учун C_{6Li}^2=5.37 ишончли деб топилган адабиётлардаги қийматлари ишлатилди. ДК таҳлилида DWUCK5 программасида бузилган тўлқинлар функциясини ҳисоблаш учун кириш ва чиқиш каналларида χ^2 мезони бўйича оптимал танланган оптик потенциал (ОП) параметрлари ишлатилди. Адабиётларда келтирилган маълумотлар билан бир қаторда яроқли замонавий глобал ОП ишлатилди, бунда эластик сочилиш ДКнинг (жумладан биз томондан ўлчанганлар ҳам бор) сифатли тасвирланиши орқали назорат қилиб турилди. Ҳар бир ДК таҳлилидан олинган АНД ва/ёки СФ қийматлари, бурчак тақсимотнинг асосий максимумида экспериментал нуқталарга сифатли мос келишини эътиборга олган ҳолда, салмоқлари бўйича ўртачалаштирилди.

$^{24}Mg(d,n)^{25}Al$ реакциясининг экспериментал ДК E_d =7, 9 МэВ энергияда, $^{24}Mg(^3He,d)^{25}Al$ реакциясининг экспериментал ДК эса E_{3He} =25.0, 33.3 ва 38.5

МэВ энергияларда таҳлил қилинди (3.1 бўлим). Ушбу реакциялар кўрилган энергияларда периферик эканлиги кўрсатилди, чунки R(b) функция $b_{l,j}$ параметрининг 2.7≤ $b_{l,j}$ ≤5.7 Фм$^{-1/2}$ соҳа оралиғида ўзгариши ^{24}Mg(d,n)^{25}Al реакцияси учун ±4% ва ^{24}Mg(^{3}He,d)^{25}Al реакцияси учун ±8% дан кўп бўлмади. ^{25}Al ядросининг асосий ҳолатида ^{24}Mg+p→^{25}Al учун АНД квадратининг феноменологик қиймати олинди.

^{25}Mg(d,t)^{24}Mg реакциясининг ДК E_d =14.5, 14.8 ва 18 МэВ энергияларда ва ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg реакциясининг ДК E_d =13.6 ва 14.5 МэВ энергияларда таҳлил қилинди (3.2 бўлим). Экспериментал ДК 14.5 МэВ энергияда давогар томонидан ўлчанган, улар янги маълумот ҳисобланади. ^{25}Mg(d,t)^{24}Mg реакцияси ўрганилган энергияларда периферик эканлиги кўрсатилди, ^{25}Mg ядросининг асосий ҳолатида ^{24}Mg+n→^{25}Mg конфигурация учун АНД квадратининг қиймати олинди. ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg реакцияси периферик эмаслиги ойдинлашди ва ДК таҳлилидан АНД қийматини олиш нотўғри бўлади. АНД квадрати СФ билан (4) ифода билан боғлиқлигидан, ^{25}Mg ядросининг асосий ҳолатида ^{24}Mg+n→^{25}Mg конфигурация учун СФнинг аниқ $Z = 0.41^{+0.13}_{-0.11}$ қиймати олинди, бу ҳолда, b қиймати R(b) нинг маълум «эксперименталь» қиймати билан белгиланади.

3.3 бўлимда ^{3}He+α→^{7}Be конфигурациянинг АНД қийматини олиш мақсадида α –зарралар узатилиш ^{12}C(d,^{6}Li)^{8}Be ва ^{12}C(^{3}He,^{7}Be)^{8}Be реакциялари мос равишда E_d=28 ва E_{3He}=41 МэВ энергияларда таҳлил қилинди. Биринчи реакциянинг ДК таҳлилидан олинган ^{8}Be+α→^{12}C конфигурация учун АНД квадратининг қиймати ^{12}C(^{3}He,^{7}Be)^{8}Be реакциясининг таҳлилида ишлатилди. Шундай қилиб, ^{7}Be ядросининг асосий ва биринчи уйғонган ҳолатларида α+^{3}He→^{7}Be конфигурациясининг АНД квадратлари қийматлари олинди.

Барча кўрилган реакциялар таҳлилидан олинган АНД квадратларининг қийматлари фойдаланилган ОП жуфтликлари бўйича ва реакциянинг кириш каналидаги энергиялар бўйича мос равишда салмоқлари билан ўртачалаштирилди, улар 2 жадвалда берилган.

2-жадвал

АНД квадратларининг феноменологик қийматлари

конфигурациялар	$C^2 \pm \Delta C^2$, Фм$^{-1}$
^{24}Mg+p→^{25}Al	4.57±0.49
^{24}Mg+n→^{25}Mg	1.72±0.07
^{3}He+α→^{7}Be (E*=0)	22.9±0.7
^{3}He+α→^{7}Be (E*=0.430 МэВ)	18.0±0.5

АНД квадратларидаги хатоликлар аниқ ОПдан боғлиқ бўлган ўртача оғишларни, $R(b)$ функциянинг қолдиқ боғлиқликларини ва эксперименталь хатоликларни ўз ичига олади.

^{25}Mg ва ^{25}Al кўзгу ядроларининг асосий ҳолатларида нейтрон ва протонлар учун олинган АНД квадратлари қийматлари бир қатор замонавий

назарий ёндашув ҳисобларидан келиб чиқадиган $C_p^2/C_n^2=b_p^2/b_n^2$ тенглик хатоликлар даражасида бажарилишини билдиради.

Диссертациянинг **«Радиацион қамраш реакцияларининг астрофизик S-фактори ва тезлигини ҳисоблаш»** деб номланган тўртинчи бобида $^3He(\alpha,\gamma)^7Be$ ва $^{24}Mg(p,\gamma)^{25}Al$ реакцияларининг астрофизик S-факторини ҳисоблаш учун 3-бобда аниқланган АНД қийматларининг қўлланилиш натижалари кўрсатилган, $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ реакциясининг ўлчанган чиқиш катталикларидан унинг тезлиги ҳисобланди (4.4-бўлим). Ядровий астрофизик реакцияларнинг S-факторини ҳисоблаш учун АНД қийматларидан фойдаланиш натижасида уларнинг аниқлик даражасини сезиларли равишда ошириш имконини берувчи ЯФИ назариётчилари томонидан ривожлантирилган R-матрицали ёндашув ва такомиллаштирилган иккизаррали потенциал усуллар (ва мос равишда дастур таъминоти) ишлатилди.

Олинган АНД қийматлардан фойдаланиб, Қуёш нейтриноларининг шиддатли оқимини берувчи $^3He(\alpha,\gamma)^7Be$ ядровий астрофизик реакциянинг астрофизик S–фактори қийматлари ҳисобланди. E_α =0 ва 23 кэВ энергияларда S–факторининг мос қийматлари 0.596±0.017 ва 0.591±0.017 олинди. Бу қийматлар бошқа муаллифлар томонидан олинган натижаларга яхши мос келади.

$^{25}Al\rightarrow^{24}Mg+p$ учун олинган АНД қийматидан фойдаланиб, магний циклида водород ёнишнинг мухим ҳалқаси ҳисобланувчи $^{24}Mg(p,\gamma)^{25}Al$ реакция S-факторининг энергияга боғлиқлиги ўрганилди. Тўғридан-тўғри радиацион қамрашнинг E=0 да олинган S-фактор қиймати $S^{dir}(0)$ = 41.3 кэВ·б, Peterson R.J., et al. (Nucl. Phys. A246 (1975) p.402) ишида олинган 30.0 кэВ·б қийматидан 27% га кўп бўлди.

4.4 бўлимда $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ радиацион қамрашнинг тезлигини юлдузлар температураси соҳаларида ($0.01\leq T_9\leq 1.0$), ушбу реакциянинг адабиётларда берилган ва биз томондан ўлчанган чиқиш катталиклари орқали Roughton N.A., et al. (Astrophys. J. V205 (1976) p.302) ишида берилган усулдан фойдаланиб хисоблаш натижалари берилган. Бунинг учун чиқиш катталигининг энергиядан боғланиш эмпирик аппроксимацияси мавжуд барча экспериментал маълумотлар билан бир қаторда $\{^{13}N=^{12}C+p\}$ системанинг 1-резонанс ва ундан қуйи соҳаларидаги реакциянинг тўлиқ кесими ва астрофизик *S*-факторларига асосланиб қурилди (5-расм) ва қуйидаги кўринишда бўлади:

, (8)

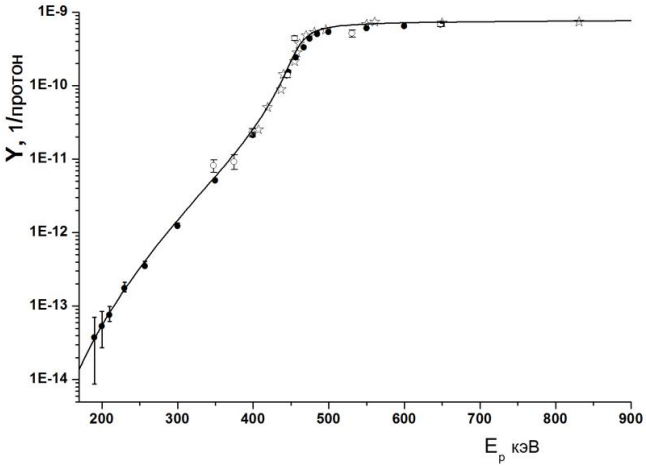
бу ерда , W = 0.417, Г = 0.0395 МэВ ва $k(x=E')$ даража кўрсаткичи:

$$k(x) = 5.0935 - 2.691x - 67.975x^2 + 282.825x^3 - 415.35x^4 + 226.4x^5 + \exp(2.2 - 53.2x + 56.15x^2)$$

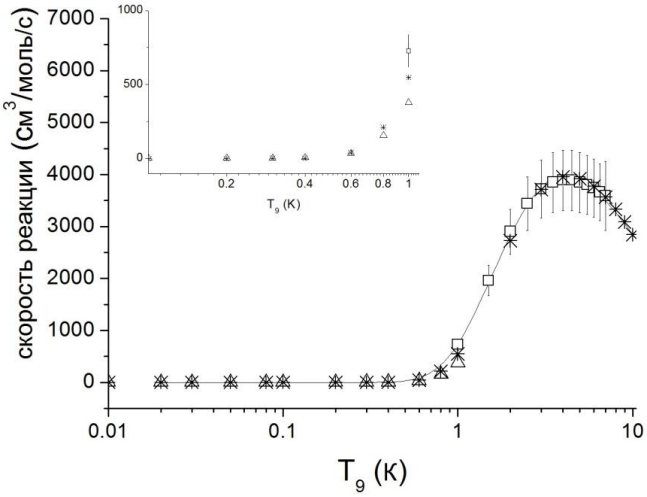
Протоннинг углероддаги тўхташ қобилиятининг тескари қиймати $S^{-1}(x)$

қуйидаги кўринишда аппроксимация қилинди:

$$S^{-1}(x) = 9.72\cdot10^{-4}+4.14\cdot10^{-3}x-8.23\cdot10^{-4}x^2+2.26\cdot10^{-3}\cdot\exp(-52x)$$



5-расм. $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ реакция чиқиш катталигининг энергетик боғлиқлиги. Узлуксиз эгри чизиқ – чиқиш катталигининг энергетик боғлиқлик эмпирик аппроксимацияси. Тўлиқ айлана – ўлчанган экспериментал маълумотлар



6-расм. $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ реакция тезлигининг температурага боғлиқлиги. Учбурчаклар – бизнинг маълумотлар, квадратлар - Roughton N.A., et al. (Astrophys. J. V205 (1976) p.302) ишидан олинган. Расмнинг ички қисмида шу ишда ўлчанган чиқиш қиймати билан ҳисобланган ушбу боғлиқликнинг бир қисми кўрсатилган

Олинган ҳисоблар Roughton N.A., et al. (Astrophys. J. V205 (1976) p.302) иш муаллифлари томонидан олинган натижалар билан мос келади.

ХУЛОСА

“Узатилиш реакцияларидан ^{7}Be, ^{25}Mg, ^{25}Al ядроларининг спектроскопик хусусиятлари ва радиацион қамраш ^{12}C+p реакциясининг чиқиш катталигини аниқлаш ва уларни ядровий астрофизикада қўллаш” мавзусидаги физика-

математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси доирасида бажарилган тадқиқотлар асосида қуйидагиларни хулоса қилиш мумкин:

1. E=14.5 и 18 МэВ энергияли дейтронларнинг ^{24,25}Mg ядроларида эластик сочилиши ва E=14.5 МэВ энергияли дейтронларда ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg ва ^{25}Mg(d,t)^{24}Mg реакцияларининг дифференциал кесимини ўлчаш ишлари амалга оширилди.
2. Ядровий астрофизика учун мухим бўлган қуйи энергияли ядро реакцияларининг кесими ва чиқиш катталикларини ўлчаш учун активацион методнинг оригинал варианти ишлаб чиқилди. Экспериментал қийматлардан чиқиш (кесим) катталикларини автоматик тарзда олувчи маълумотларни йиғиш ва қайта ишлаш учун тегишли программа таъминоти яратилди.
3. Ишлаб чиқилган активацион методни амалга ошириш учун ЭГ-2 электростатик тезлаткичда ҳамкорликда экспериментал қурилма йиғилди, унинг асосий ҳусусиятлари белгиланди, ишга лаёқатлилиги кўрсатилди.
4. 190≤E≤ 650 кэВ энергия оралиқларида ^{12}C(p,γ)^{13}N ядровий астрофизик реакциясининг чиқиш катталиклари ўлчанди, қуйи энергияларда реакциянинг чиқиш катталигининг янги қийматлари олинди ва реакциянинг тезлиги ҳисобланди.
5. Такомиллаштирилган тўлқинларнинг бузилиши асосидаги усул орқали протон ^{24}Mg(^{3}He,d)^{25}Al, ^{24}Mg(d,n)^{25}Al, нейтрон ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg, ^{25}Mg(d,t)^{24}Mg ва альфа узатилиш ^{12}C(d,^{6}Li)^{8}Be, ^{12}C(^{3}He,^{7}Be)^{8}Be реакциялари тушаётган заррачаларнинг бир қанча энергияларида таҳлил қилинди ва ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg реакциясидан ташқари барча реакциялар қаралаётган энергияларда чиқаётган зарралар бурчак тақсимотининг биринчи максимумида периферик эканлиги белгиланди.
6. ^{25}Mg ва ^{25}Al ядроларнинг асосий ҳолатлари учун АНК квадратларининг $C^2_{25Mg\to24Mg+n}$ ва $C^2_{25Al\to24Mg+p}$ қийматлари аниқланди. ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg реакцияси периферик реакция эмаслиги кўрсатилди. Олинган АНК $C^2_{25Mg\to24Mg+n}$ қийматини ҳисобга олган ҳолда, ^{25}Mg ядросининг асосий холати учун спектроскопик факторнинг аниқ қиймати олинди. ^{25}Mg ва ^{25}Al кўзгу ядроларининг асосий ҳолатлари учун назарий жихатдан айтилган АНК квадратлари орасидаги $C_p^2/C_n^2=b_p^2/b_n^2$ муносабат бажарилиши кўрсатилди.
7. ^{7}Be ядросининг асосий (J^{π}=3/2^{-}, E*=0.0 МэВ) ва биринчи уйғонган (J^{π}=1/2^{-}, E*=0.430 МэВ) ҳолатлари учун АНК квадратлари $C^2_{7Be\to3He+\alpha}$ қийматлари ва ^{3}He(α,γ)^{7}Be реакциясининг E=0 ва 23 кэВ энергияларда астрофизик S-фактори аниқланди.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ, АСТРОНОМИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ, НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ТОЖИБОЕВ ОЛИМЖОН РУСТАМОВИЧ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЯДЕР ^{7}Be, ^{25}Mg, ^{25}Al ИЗ РЕАКЦИИ ПЕРЕДАЧИ И ВЫХОДА РАДИАЦИОННОГО ЗАХВАТА ^{12}C+p, И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЯДЕРНОЙ АСТРОФИЗИКЕ

01.04.08 – Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ускорительная техника

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

Ташкент – 2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистана за номером B2018.1.PhD/FM185

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистана.

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

Научный руководитель:	**Артемов Сергей Викторович** доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Официальные оппоненты:	**Олимов Косим** доктор физико-математических наук, профессор
	Полвонов Сатимбой Ражапович кандидат физико-математических наук, профессор
Ведущая организация:	**Самаркандский государственный университет**

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2019 г. в _____ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики, Астрономическом институте, Национальном университете Узбекистана (100124, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ; тел. (+99871) 289-31-18; факс (+99871) 289-31-50; e-mail: info@inp.uz).

С докторской диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный номер_____). (100124, г. Ташкент, поселок Улугбек, ИЯФ; тел. (+99871) 289-31-19).

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

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

Э.М. Турсунов
ученый 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 диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире большое внимание вновь привлечено к получению надежных сведений о структуре низколежащих ядерных состояний. В большой степени это определяется потребностями бурно развивающейся ядерной астрофизики, что связано с прогрессом в космической технике, возросшими экспериментальными возможностями. С другой стороны, в последние десятилетия развиты теоретические подходы, позволяющие извлекать из прецизионных экспериментальных данных практически безмодельную информацию, в частности, асимптотические нормировочные коэффициенты (АНК) одночастичных ядерных состояний, широко используемых в ядерной астрофизике. Такие данные необходимы для проверки современных теоретических моделей ядра и механизмов реакций, для расчета астрофизических S-факторов в области энергетического окна Гамова в звездных процессах и при первичном нуклеосинтезе. Однако большая часть требующихся для этого экспериментальных данных по реакциям передачи нуклонов и альфа-частиц с участием важных для астрофизики легких ядер, таких как изотопы бериллия, углерода, магния, получены в основном в прошлом столетии, имеют большие погрешности либо не анализировались в рамках современных подходов. Поэтому выполненные в данной работе экспериментальные исследования реакций (d,p) и (d,t) с участием изотопов магния, детальный анализ этих и других процессов с передачей α-частицы во взаимодействиях с ядрами ^{12}C актуальны и востребованы.

Очень важным является создание новых экспериментальных методик, позволяющих измерять сечения и выходы непосредственно ядерно-астрофизических процессов, таких как радиационный захват нуклонов и альфа-частиц, с малыми погрешностями при возможно меньших энергиях, соответствующих звездным температурам. Измерениям сечений (астрофизических S-факторов) в настоящее время уделяется огромное внимание, тогда как альтернативные данные по выходам таких процессов чрезвычайно скудны даже для таких астрофизически важных ядер, как ^{12}C. Поэтому не менее актуальным являются выполненные в данной работе разработка и создание новой активационной методики с получением новых данных по выходам радиационного захвата при ее использовании.

В нашей Республике проведению фундаментальных исследований в области ядерной физики низких энергий уделяется первостепенное внимание. В Узбекистане сформировалась известная в мире школа по этому направлению, которая достигла значимых результатов в изучении ядерных процессов при низких (~5-20 МэВ/N) и сверхнизких (< 0.5 МэВ) энергиях. Направления этих фундаментальных исследований, имеющих большое значение для развития науки нашей страны и её дальнейшего практического применения, отражены в Стратегии действий по дальнейшему развитию

Республики Узбекистан на 2017–2021 гг.[1] Выполненные в данной работе исследования непосредственно связаны с проблемами ядерной астрофизики и физики управляемых термоядерных процессов, в том числе ядерной энергетики, что является передним краем современных исследований в мире.

Данная научно-исследовательская работа соответствует задачам, утвержденным в государственных нормативных документах, Указах Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017−2021 гг.», № УП-4958 от 16 февраля 2017 года «О дальнейшем совершенствовании системы послевузовского образования», в Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности».

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в Республике Узбекистан II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

Степень изученности проблемы. Исследования периферийных ядерных реакций с передачей нуклонов и кластеров для установления значений АНК и спектроскопических факторов (СФ) одночастичных уровней легких ядер и их использование в расчетах астрофизических S-факторов радиационного захвата проводятся ведущими учеными мировых ядерных центров, например, американскими (A.M. Mukhamedzhanov, P.E. Tribble, K. M. Nollett, K.E. Rehm и др.), японскими (T. Kajino, T. Motabayashi, K. Ogata, H. Hidetoshi), итальянскими (C. Spitareli, M. La Cognata), казахстанскими (Н. Буртебаев, Л. Ибраева, М. Жусупов) и другими. Узбекистанскими учеными (С.В. Артемов, Р. Ярмухамедов, Г.К. Ни, и др.) исследованы периферийные реакции передачи нуклона (d,t) и (^{3}He,d) на ряде легких ядер. Полученные значения АНК использованы для экстраполяционных расчетов астрофизических S-факторов некоторых реакций *pp*-цепочки и CNO цикла горения водорода.

Радиационный захват протона ядром ^{12}C (входная реакция CNO-цикла) исследован в ранних работах канадских ученых (C.Rolfs и др.). Имеющиеся на данный момент значения АНК для системы {^{12}C+p}, полученные ташкентской (С.В. Артемов и др.) и пекинской (Li Zhi Hong и др.) группами различаются более, чем на 30%. В работе Н. Буртебаева, Р. Ярмухамедова и др. была показана необходимость прецизионного измерения сечения этой реакции в области энергий, где доминирует роль прямого механизма для его экстраполяции в область энергий вблизи Гамовского пика (~20-25 кэВ). Важна также оценка скорости этой реакции альтернативными методами, в частности, через ее выход.

[1] Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 г.

Реакция радиационного захвата $^{3}He(\alpha,\gamma)^{7}Be$ является важным процессом первичного нуклеосинтеза и одним из основных звеньев *pp*-цепочки горения водорода в звездах, определяя, в частности, поток высокоэнергетичных Солнечных нейтрино. Ввиду ее астрофизической значимости эта реакция экспериментально исследуется на протяжении почти 50 лет с повышением прецизионности и продвижением в область все меньших энергий. Недавно в рамках коллаборации LUNA (F. Confortola, D. Bemmerer и др.) S-фактор этой реакции измерен вплоть до энергии ~ 93 кэВ, а также его величина оценена непрямым методом при энергии 23 кэВ (положение пика Гамова) по измерениям потока Солнечных нейтрино (Marcell P. Takács, D. Bemmerer и др.). Узбекскими учеными Р. Ярмухамедовым и К. Турсунмахатовым выполнены экстраполяционные расчеты S-факторов с использованием значений АНК, найденных из анализа этих экспериментальных данных при энергии E≥90 кэВ. Однако необходимо уточнение значения АНК.

Передача протона в системе ^{24}Mg - ^{25}Al изучалась в работах B. Mertens (Германия) с использованием реакции $(d,^{3}He)$ при 18 и 20 МэВ (1970), F. Entezami (Великобритания) 33 МэВ (1981), R.J. Peterson (США) 38.5 МэВ, и передачи нейтрона ^{24}Mg-^{25}Mg в работах E.W.Hamburger (США, 1960), В.В. Токаревского и др. (Украина), И.Р. Гуламова и др. (Узбекистан, 1990). Однако значения АНК состояний $\{^{24}Mg+p\}$ определялись только в работах С.В. Артемова, С.Б. Игамова и др. (Узбекистан). Эта величина важна для оценки астрофизического S-фактора радиационного захвата протона ядром ^{24}Mg, являющегося первым звеном цепочки MgAl цикла $^{24}Mg(p,\gamma)^{25}A1(\beta+)^{25}Mg(p,\gamma)^{26}A1(\beta+)^{26}Mg$. Механизм образования изотопа ^{26}Mg стал ключевым для подтверждения моделей звездного нуклеосинтеза, поскольку в космическом излучении обнаружена γ-линия, сопровождающая β–распад $^{26}A1(\beta+)^{26}Mg$, что является первым доказательством продолжения звездного нуклеосинтеза во Вселенной. Поэтому необходимо уточнение значений АНК протонно-связанных состояний $\{^{24}Mg+p\}$.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательских проектов Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан по темам: Ф2-ФА-Ф114 «Исследование формирования легких элементов и свойств экзотических ядер, образующихся в реакциях при низких энергиях» (2012-2016) и Ф2-ФА-Ф117 «Исследования динамических свойств фундаментальных характеристик ядер для ядерной астрофизики» (2012-2016).

Целью исследования является определение феноменологических значений асимптотических нормировочных коэффициентов $^{3}He+\alpha\rightarrow^{7}Be$; $^{24}Mg+n\rightarrow^{25}Mg$; $^{24}Mg+p\rightarrow^{25}Al$ путем анализа периферийных ядерных реакций передачи нуклонов и альфа-кластеров для использования в расчетах S-факторов ядерно-астрофизических процессов радиационного захвата $^{24}Mg(p,\gamma)^{25}Al$ и $^{3}He(\alpha,\gamma)^{7}Be$, а также определение выходов и скорости реакции радиационного захвата $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$.

Задачи исследования:

разработать новый активационный метод измерения малых величин выхода ядерной реакции;

разработать алгоритм извлечения значений выходов ядерных реакций из экспериментальных данных и создать соответствующее программное обеспечение;

определить основные характеристики и провести тестирование созданной на ускорителе ЭГ-2 экспериментальной установки MAIS, реализующей новый активационный метод;

выполнить прецизионные измерения выходов реакции $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ в диапазоне 190 – 650 кэВ на протонном пучке ускорителя ЭГ-2;

выполнить измерение дифференциальных сечений (ДС) упругого рассеяния дейтронов на ядрах $^{24,25}Mg$ и реакций передачи нейтрона $^{24}Mg(d,p)^{25}Mg$ и $^{25}Mg(d,t)^{24}Mg$ при энергии дейтронов 14.5 МэВ;

выполнить анализ экспериментальных ДС реакций $^{24}Mg(d,n)^{25}Al$, $^{24}Mg(^{3}He,d)^{25}Al$, $^{25}Mg(d,t)^{24}Mg$, $^{24}Mg(d,p)^{25}Mg$, $^{12}C(d,^{6}Li)^{8}Be$ и $^{12}C(^{3}He,^{7}Be)^{8}Be$ в рамках модифицированного метода искаженных волн (ММИВ) и получить значения квадратов АНК для одночастичных связанных состояний $^{3}He+\alpha\rightarrow^{7}Be$; $^{24}Mg+n\rightarrow^{25}Mg$; $^{24}Mg+p\rightarrow^{25}Al$; $^{3}He+\alpha\rightarrow^{7}Be^{*}$ (E^{*}=0.430 МэВ); и СФ для $^{24}Mg+n\rightarrow^{25}Mg$;

выполнить расчет скорости реакции радиационного захвата $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ при низких энергиях E, используя измеренные значения выходов этой реакции.

Объектом исследования являются одночастичные состояния легких ядер, участвующих в ядерно-астрофизических реакциях.

Предметом исследования являются периферийные ядерные реакции с передачей нуклонов и α-частиц, а также процессы их радиационного захвата при низких и сверхнизких энергиях с участием легких ядер.

Методы исследования. Используются хорошо известные и надежные экспериментальные методы ΔE-E регистрации и идентификации заряженных продуктов реакций телескопами кремниевых детекторов и гамма-квантов сцинтилляционными спектрометрами, а также общепринятые статистические методы обработки данных. Для анализа данных применяется широко используемый в настоящее время модифицированный метод искаженных волн.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработан новый вариант активационного метода измерения малых выходов процессов радиационного захвата заряженных частиц с образованием радиоактивных конечных продуктов;

получены новые данные по выходу реакции $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ при энергии ниже 350 кэВ и рассчитаны её скорости при звездных температурах ($0.01\leq T_9\leq 1.0$);

получены прецизионные экспериментальные значения дифференциального сечения упругого $^{24,25}Mg+d$ рассеяния, реакций

^{24}Mg(d,p)^{25}Mg и ^{25}Mg(d,t)^{24}Mg при энергиях E_d=14.5 и 18 МэВ в диапазоне углов вылета от 8° до 44° в с.ц.м.;

определены значения квадратов асимптотических нормировочных коэффициентов для одночастичных связанных конфигураций {^{24}Mg+n} и {^{24}Mg+p} ядер ^{25}Mg $C^2_{25Mg\to24Mg+n}$=1.72±0.07 Фм$^{-1}$ и ^{25}Al $C^2_{25Al\to24Mg+p}$=4.57±0.49 Фм$^{-1}$, а также спектроскопического фактора ядра ^{25}Mg в ^{24}Mg+n - конфигурации в основном состоянии $Z_{25Mg\to24Mg+n}$ =0.41±0.12;

определены значения квадратов асимптотических нормировочных коэффициентов для α-частичных связанных конфигураций ^{3}He+α→^{7}Be в основном (J^π=3/2$^-$, E*=0.0 МэВ) $C^2_{7Be\to3He+\alpha}$=22.9±0.7 Фм$^{-1}$ и первом возбужденном (J^π=1/2$^-$, E*=0.430 МэВ) $C^2_{7Be\to3He+\alpha}$=18.0±0.5 Фм$^{-1}$ состояниях ядра ^{7}Be.

Практические результаты исследования заключается в следующем:

создана экспериментальная установка, реализующая разработанный вариант активационного метода для измерения очень малых выходов и S-факторов в глубоко подбарьерных процессах радиационного захвата заряженных частиц;

получены данные по выходу ядерно-астрофизического процесса радиационного захвата протона ядром ^{12}C в области энергий 190–650 кэВ, необходимых и важных для экстраполяции выходов и S-факторов в область звездных энергий;

получены значения асимптотических нормировочных коэффициентов для одночастичных состояний легких ядер.

Достоверность результатов исследования обосновывается использованием надежных и широко используемых ΔE-E - метода регистрации и идентификации заряженных частиц-продуктов ядерных реакций и сцинтилляционного метода регистрации аннигиляционных гамма-квантов, достаточно высокой статистической обеспеченностью, тщательной калибровкой характеристик экспериментальных методик и совпадением результатов тестовых измерений с имеющимися данными, а также применением общепринятых статистических методов обработки и анализа экспериментальных данных. Спектроскопическая информация о ядерных уровнях получена в рамках общепризнанных в настоящее время теоретических моделей анализа периферийных ядерных реакций передачи нуклонов и радиационного захвата и хорошо согласуется с экспериментальными результатами и теоретическими выводами других исследователей.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов заключается в том, что найденные значения асимптотических нормировочных коэффициентов для ^{3}He+α→^{7}Be, ^{24}Mg+n→^{25}Mg, ^{24}Mg+p→^{25}Al позволяют проверять корректность теоретических моделей структуры одночастичных уровней легких ядер, предсказывающих эти значения, а их использование в экстраполяционных расчетах сечений слияния (^{3}He+α) и радиационного захвата нуклона ядрами ^{24}Mg в области очень низких экспериментально недоступных энергий

позволяют соответственно оценить поток высокоэнергетических солнечных нейтрино и вклад прямого процесса в Mg-Al циклах звездного горения водорода. Измеренные прецизионные значения выхода радиационного захвата протона ядрами ^{12}C позволяют произвести альтернативные теоретические оценки скорости этого процесса в CNO – цикле звездного горения водорода.

Практическое значение результатов заключается в том, что разработанный новый вариант активационного метода измерения очень малых выходов для процессов радиационного захвата заряженных частиц может найти применение как в фундаментальных исследованиях в области ядерной астрофизики, так и в прикладных целях – активационном анализе на пучках заряженных частиц и быстрых нейтронов. Метод гибок относительно различных экспериментальных задач, поскольку он включает возможность как «PROMPT»-, так и «ACTIVATION» измерений практически любых продуктов распада конечных ядер с периодами от десятка секунд до десятков часов.

Полученные феноменологические значения асимптотических нормировочных коэффициентов основных и низколежащих состояний легких ядер могут быть использованы при построении теоретических моделей для структуры одночастичных состояний в легких ядрах и при экстраполяционных расчетах сечений ядерных процессов, в т. числе в ядерной астрофизике.

Полученные экспериментальные значения выходов реакции радиационного захвата протонов углеродом могут быть использованы в теории ядерных реакций при низких энергиях, в материаловедении ядерных и термоядерных установок.

Внедрения результатов исследования. На основе полученных результатов по исследованию реакций передачи на ядрах ^{12}C, $^{24,25}Mg$ и радиационному захвату:

разработанный вариант активационной методики для измерений выходов и сечений реакции радиационного захвата использован при исследовании ядерно-астрофизических реакций радиационного захвата заряженных частиц в рамках проекта «Измерение сечений ядерных реакций на ядрах 1p-оболочки, индуцированных легкими ионами, для астрофизических и ядерных приложений» (2018-2020) (письмо РГП «Институт ядерной физики» Министерства энергетики Республики Казахстан от 29 апреля 2019 года №34-11-01-04/571). Использование полученных результатов позволяет проводить измерения сечений реакции радиационного захвата с очень малыми значениями;

полученные экспериментальные значения дифференциального сечения упругого $^{24,25}Mg+d$ рассеяния и реакций $^{24}Mg(d,p)^{25}Mg$ и $^{25}Mg(d,t)^{24}Mg$ при энергиях E_d=14.5 и 18 МэВ, а также значения АНК, полученные из анализа этих реакций, использовались при исследованиях ядерных реакций при низких энергиях (письмо НИЦ «Курчатовский институт» от 26 апреля 2019 года). Полученные результаты позволили планировать и проводить новые

эксперименты на циклотроне C200-P Лаборатории тяжелых ионов Варшавского Университета и циклотроне У150-М Института ядерной физики Республики Казахстан;

полученные значения АНК для одночастичных связанных конфигураций $\{^{24}Mg+n\}$ и $\{^{24}Mg+p\}$ ядер ^{25}Mg и ^{25}Al в результате анализа периферийных реакций передачи нуклонов на изотопах магния использованы при проведении соответствующих экспериментов на ускорителях Института ядерной физики, выполняемых по теме «Измерение сечений ядерных реакций на ядрах 1p-оболочки, индуцированных легкими ионами, для астрофизических и ядерных приложений» (2018-2020) (письмо РГП «Институт ядерной физики» Министерства энергетики Республики Казахстан от 29 апреля 2019 года №34-11-01-04/571). Эти данные позволяют выполнить предварительные оценки сечений, что важно при экспериментальном исследовании ядерно-астрофизических реакций радиационного захвата протона изотопами магния;

полученные значения АНК для $^{3}He+\alpha\rightarrow{}^{7}Be$ в результате анализа реакций $^{12}C(d,^{6}Li)^{8}Be$ и $^{12}C(^{3}He,^{7}Be)^{8}Be$, а также экспериментальные значения дифференциального сечения упругого $^{24,25}Mg+d$ рассеяния и реакций $^{24}Mg(d,p)^{25}Mg$ и $^{25}Mg(d,t)^{24}Mg$ при энергиях E_d=14.5 и 18 МэВ использовались по проекту «Определения асимптотических нормировочных коэффициентов для легких ядер» (письмо Лаборатории тяжелых ионов Варшавского Университета от 20 мая 2019 года). Полученные результаты позволили планирования новых экспериментов на циклотроне C200-P Лаборатории тяжелых ионов Варшавского Университета.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались на 7 международных научных конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, 5 научных статей в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из них 3 в зарубежных научных журналах.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 113 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** представлены актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан, дана научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость,

приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также о структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Методы извлечения АНК и СФ из сечений периферийных реакций передачи»** приводится краткий обзор основных теоретических методов анализа прямых ядерных реакций с передачей частицы, в том числе периферийных ядерных реакций передачи (Модифицированный метод искаженных волн (ММИВ)). Указано, что в последнем случае возможно получение практически модельно-независимой спектроскопической информации, что важно для её ядерно-астрофизического применения при расчетах скоростей ядерных реакций, протекающих в недрах Солнца и массивных звезд.

При этом для периферийных реакций передачи $A(x,y)B$, где $B=A+a$ и $x=y+a$ (здесь x – легчайшие ядра d, t, ^{3}He; a – передаваемая частица, нуклон или α-кластер), асимптотическое поведение радиальной части интеграла перекрытия, $I_{Aa;l_B j_B}(r)$ вне области ядерных взаимодействий, $r > r_N$ аналогично радиальной зависимости одночастичных волновых функций (о.в.ф.) связанных состояний $\{A+a\}$ и $\{y+a\}$, и определяется соотношением (в случае, если a – заряженная частица):

$$I_{Aa;l_B j_B}(r) \approx C_{B\to Aa;l_B j_B} \frac{W_{-\eta_B l_B+1/2}(2\kappa_{Aa} r)}{r}, \qquad (1)$$

где $C_{B\to Aa;l_b j_B}$ – асимптотический нормировочный коэффициент (АНК) связанного состояния $B=\{A+a\}$, определяющий нормировку интеграла перекрытия волновых функций на периферии для конфигурации $A+a\to B$ (и аналогично, для $y+a\to x$), $W_{\alpha;\beta}(...)$ - функция Уиттекера, $\eta_B = Z_A Z_a e^2 \mu_{Aa} / \kappa_{Aa}$ - кулоновский параметр для связанного состояния $B=\{A+a\}$, $\kappa_{Aa} = \sqrt{2\mu_{Aa}\varepsilon_{Aa}}$, μ_{Aa} - приведенная масса частиц A и a, ε_{Aa} - энергия связи ядра B относительно $\{A+a\}-$ канала.

В предположении, что доминирует один передаваемый момент l (и что $l_B=l$ и $j_B=j\pm=l\pm s$, где s -спин частицы a), дифференциальное сечение (ДС) в ММИВ периферийной реакции определяется произведением квадратов АНК, а не спектроскопических факторов (СФ):

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = C^2_{B;l,j+}[R_{j+}(E,\theta;b_{l,j+},b_x) + \lambda R_{j-}(E,\theta;b_{l,j-},b_x), \qquad (2)$$

где $\lambda = (C_{l,j-})^2/(C_{l,j+})^2$ и

$$R(E,\theta;b_{l,j}) = \left(\frac{C_x}{b_x}\right)^2 \frac{\sigma^{DW}(E,\theta;b_{l,j})}{b^2_{l,j}}. \qquad (3)$$

Здесь $\sigma^{DW}(E,\theta;b_{l,j\pm})$ – «одночастичное» ДС передачи нуклона, рассчитываемое в ММИВ с использованием алгоритма программы DWUCK5. b_x и $b_{l,j\pm}$– «одночастичные» асимптотические нормировочные

коэффициенты для о.в.ф. связанного состояния передаваемой частицы a в потенциале ядер x и B, соответственно. Квадрат АНК C^2 и СФ Z в общем случае связан соотношением

$$C^2 = Zb^2 \tag{4}$$

что гарантирует корректность абсолютной нормировки периферийных амплитуд, рассчитываемых в ММИВ и дающих основной вклад в дифференциальное сечение реакции при малых углах.

Условием периферийности:

$$R(E,\theta;b_{l,j}) = R(b) \approx const \tag{5}$$

является требование практической независимости значений функции R от вариаций модельной величины $b_{l,j}$ и, следовательно, от неоднозначности геометрических параметров потенциала связанного состояния. Это обуславливает возможность практически безмодельного определения в (2) АНК для B={A+a} из периферийной реакции, если известно АНК для x={y+a}. Отметим, что при этом $b_{l,j}$ и $\sigma^{DW}(E,\theta;b_{l,j})$, а следовательно, и СФ существенно зависят от геометрических параметров модельного потенциала связанного состояния.

Вторая глава **«Методика измерений дифференциальных сечений реакций передачи и выходов радиационного захвата, экспериментальные данные»** посвящена описанию двух экспериментальных методик, использованных нами для получения экспериментальных данных – методики измерения ДС реакций передачи на пучках циклотрона, а также созданного нами варианта активационного метода для измерения очень малых выходов и сечений ядерно-астрофизических (и термоядерных) реакций при очень низких энергиях.

Экспериментальная установка первой методики была разработана ранее в ИЯФ АН РУз и смонтирована на ионопроводе ускорителя У-150М в рамках коллаборации с сотрудниками ИЯФ Республики Казахстан. В целом методика измерений включает в себя камеру реакций с коллимирующей системой ввода пучка, мишенными и детектирующими системами, спектрометрическую электронику в стандарте NIM, реализующую ΔE-E-метод измерения спектров продуктов реакции и их идентификацию, и специально разработанное программное обеспечение набора и обработки информации.

На рисунке 1 приведена блок-схема измерений спектров заряженных продуктов ядерных реакций на пучке циклотрона. В камере реакций были задействованы 3 телескопа полупроводниковых ΔE и E детекторов, а также мониторный детектор для контроля за состоянием мишени. Пучок, прошедший сквозь мишень, тормозился в цилиндре Фарадея, его ток интегрировался и запоминался для каждого измерения. Спектрометрические сигналы от телескопов после усиления и стробирования совпадающих сигналов поступали на входы двумерных многоканальных анализаторов импульсов ДМА (см. рис. 1), и далее в виде двумерных ΔE-E – спектров

накапливалась в ПК. Далее оцифрованная информация в режиме of-line обрабатывалась программным обеспечением для получения экспериментальных ДС.

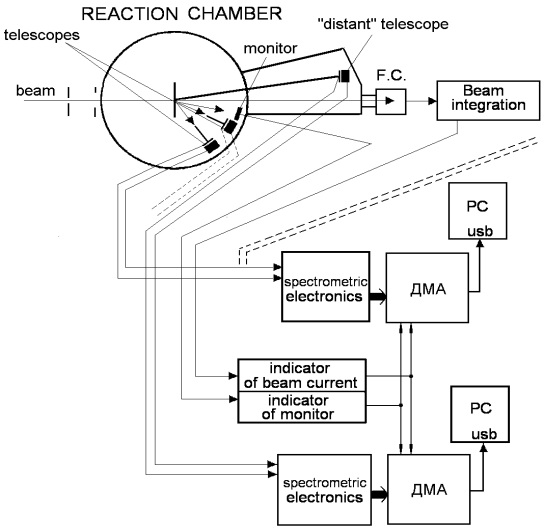


Рис. 1. Блок-схема измерений на пучке циклотрона

В качестве магниевых мишеней нами использованы высокообогащенные металлические фольги из ^{24}Mg и ^{25}Mg с толщинами 0.82 и 0.78 мг/см^2. Систематическая погрешность в измеренных сечениях связана с неопределенностью толщины мишени (~6%), телесного угла спектрометра (1%), статистическая ошибка составила 1-5% в главном максимуме угловых распределений, и полная экспериментальная погрешность не превышала 8-10%.

Были измерены угловые распределения ДС упругого рассеяния дейтронов на ядрах ^{24,25}Mg и реакций ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg, ^{25}Mg(d,t)^{24}Mg при энергиях E_d=14.5 и 18 МэВ в диапазоне углов, охватывающих главный максимум (рис. 2). Измеренные ДС (вместе с литературными данными) были проанализированы в рамках ММИВ в главе 3 с целью определения феноменологических значениях АНК и СФ для ^{24}Mg+n→^{25}Mg$_{о.с.}$.

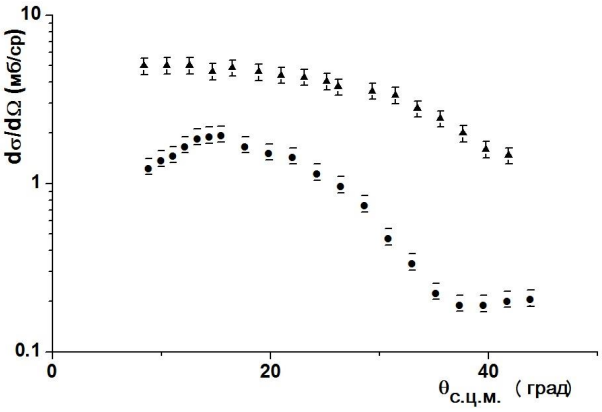


Рис. 2. Экспериментальные ДС реакций ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg (треугольники) и ^{25}Mg(d,t)^{24}Mg (кружки) при энергии дейтронов E_d=14.5 МэВ

В разделе 2.3 главы 2 описан разработанный и созданный новый вариант активационной методики для измерения малых выходов Y_B(E) реакции радиационного захвата заряженных частиц $A(a,\gamma)B$ с образованием β^+ - активного конечного ядра. Под выходом $Y(E)$ реакции понимается число образующихся ядер B при взаимодействии единичного потока частиц a энергией E с ядрами A в мишени с толщиной больше пробега частиц a:

$$Y(E) = n_A \int_0^E dE' / S_x(E') \times \sigma(E') = n_A \int_0^E W_1(E') \times \sigma(E') dE' \qquad (6)$$

где n_A – концентрация ядер A в веществе мишени, $S_x(E')$ – функция удельных ионизационных потерь частиц пучка на единице длины в веществе мишени, $\sigma(E')$ – полное сечение реакции.

Особенностью методики является циклическое повторение в автоматическом режиме облучения мишени и регистрации аннигиляционных квантов с задаваемыми периодами облучения и измерения, что схематически показано на рис. 3. При этом длительности периодов оптимизируются для улучшения соотношения полезных и фоновых событий, а накопление отсчетов интеграла тока пучка и отсчетов аннигиляционных квантов в каждом периоде разбито на градации (индексы i и j, соответственно) для учета варьирования интенсивности пучка во времени и определения периодов полураспада конечных ядер.

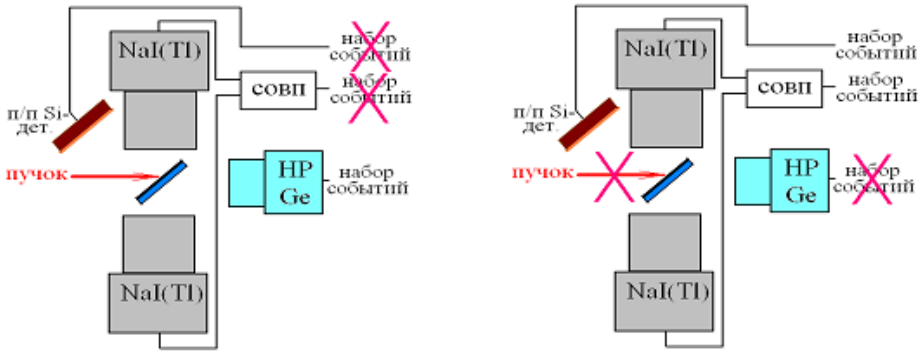


Рис. 3. Демонстрация процедуры накопления информации. Слева – накопление спектра «мгновенных» γ-квантов, справа – накопление событий распада образовавшихся радиоактивных ядер

Общее число циклов определяется необходимой статистикой. Регистрируемые автоматически переключающимися быстрыми счетчиками отсчеты от интегратора тока пучка и совпадений аннигиляционных квантов накапливаются в виде двумерных матриц событий Nγγ(i, j) по циклам в памяти ПК, затем анализируются специально разработанным программным обеспечением. Анализ накопленной таким образом информации и извлечение из нее значений выходов реакции является нетривиальной задачей, поскольку кроме учета поправок на вариации тока пучка, идентификации нужного конечного ядра путем построения кривой распада и выделения событий, связанных только с его распадом, необходимо учитывать эффекты

накопления остаточных активности остаточных в мишени от цикла к циклу и при переходе к измерениям при другой энергии. Эти остаточные активности и вклад фона оцениваются и исключаются из значений отсчетов $N_{\gamma\gamma}(i,j)$. Затем данные, просуммированные по всем циклам измерений (по индексу i), преобразуются в массив скоростей счета $V_{\gamma\gamma}(j)$, который графически анализируется на возможное содержание примесных β^+ - активных ядер в мишени. Окончательное выражение для эффективной активности a_B ядер *B,* связанной с выходом Y_B исследуемой реакции, имеет достаточно сложную структуру:

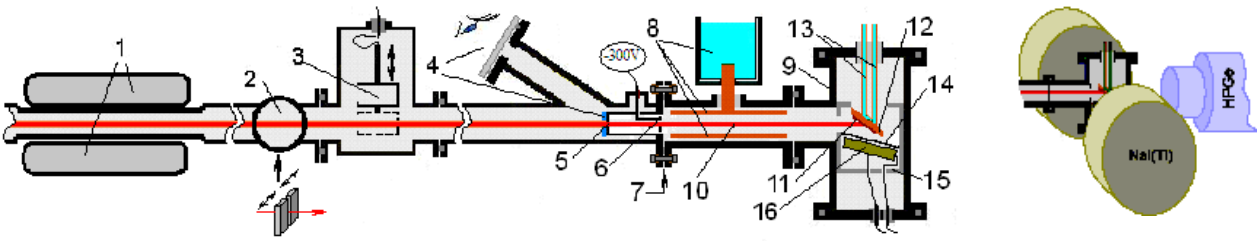
$$a_B = C \cdot Y_B \cdot (1/\delta t_{irr}) \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot \delta t_{irr}}) \cdot e^{-\lambda \cdot t_{irr}}) \cdot \sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{m=1}^{i} \left[e^{-\lambda \cdot \Delta t \cdot (j-m)} \cdot \sum_{k=1}^{k_{\max}} \{ N_{m,k}^{I} \cdot e^{k \cdot \lambda \cdot \delta t_{irr}} \} \right] \quad (7)$$

здесь *C* – постоянная, учитывающая калибровку интегратора (импульс/кулон) и согласующая единицы измерения входящих в формулу величин; $N_{m,k}^{I}$ есть “*k*-ый” отсчет интегратора пучка в “*m*-ом” цикле эксперимента; t_{irr} - время облучения в цикле; δt_{irr} - интервал разбиения времени облучения;

Таким образом, процедура определения выхода или полного поперечного сечения реакции при фиксированной энергии *E* основана на извлечении эффективной активности a_B относительно интересующего конечного ядра *B* из экспериментальных данных.

Экспериментальная установка, реализующая разработанный модифицированный активационный метод, была создана на электростатическом ускорителе ЭГ-2 «СОКОЛ» (совместно с его сотрудниками НИИФПМ), поскольку ускоритель по своим параметрам позволяет проводить исследования ядерно-астрофизических процессов радиационного захвата протона на легких ядрах.

На рис. 4 схематически показаны часть ионопровода после сепарирующего магнита (1), дискриминирующего примесные компоненты в пучке, а также элементы самой установки.



1- сепарирующий магнит, 2- щелевой коллиматор. 3 - прерыватель пучка, 4 – смотровое окно, 5 – формирующая пучок диафрагма, 6 – охранное кольцо, 7 – электроизолирующее соединение, 8 – азотная ловушка, 9 - мишенная камера, 10 – траектория пучка, 11 – мишень, 12 – держатель мишени, 13 – система водяного охлаждения, 14 – экранирующая фольга, 15 – свинцовый конвертер позитронов, 16 – кремниевый детектор. На вставке справа схематически показаны сцинтилляционные NaI(Tl) кристаллы и HPGe- детектор

Рис. 4. Система транспортировки пучка и экспериментальная установка

Мишенная камера из нержавеющей стали имеет трубчатую Т-образную конфигурацию с 3 фланцами на торцах патрубков с внутренним диаметром 40 мм. Камера изолирована от остальных части ионопровода и служит цилиндром Фарадея для интегрирования тока пучка, падающего на мишень.

Система детектирования состоит двух сцинтилляционных NaI(Tl) детекторов, окруженных свинцовой защитой толщиной 50 мм и HPGe - детектора (см. вставку справа на рис. 4), имеющего 40%-ую относительную эффективность регистрации и предназначенного для контроля стабильности энергии по детектируемым "мгновенным" гамма-квантам из исследуемой реакции.

Отладка и проверка работоспособности созданной методики была выполнена путем измерения выхода реакции $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ в области энергий протонов, соответствующей первому резонансу в системе $^{12}C+p$ (E_r=457 кэВ) и был получено хорошее согласие с надежными литературными значениями выходов, имеющимися в этой области энергий.

По разработанной методике выполнены измерения выходов реакции в области энергии 190≤E≤650 кэВ и приведены в таблице 1. Результаты измерений по выходу использованы в расчетах скорости реакции радиационного захвата $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ в главе 4.

Таблица 1

Экспериментальные данные по выходам реакции $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$

E_p, кэВ (лаб)	Y(E), 1/протон	E_p, кэВ (лаб)	Y(E), 1/протон
190	$3.96\cdot10^{-14}\pm3.09\cdot10^{-14}$	457	$2.57\cdot10^{-10}\pm4.62\cdot10^{-12}$
200	$5.62\cdot10^{-14}\pm2.89\cdot10^{-14}$	467	$3.50\cdot10^{-10}\pm1.45\cdot10^{-12}$
210	$8.06\cdot10^{-14}\pm1.87\cdot10^{-14}$	475	$4.57\cdot10^{-10}\pm8.68\cdot10^{-12}$
230	$1.85\cdot10^{-13}\pm2.82\cdot10^{-14}$	485	$5.32\cdot10^{-10}\pm1.01\cdot10^{-11}$
257	$3.71\cdot10^{-13}\pm3.47\cdot10^{-14}$	500	$5.67\cdot10^{-10}\pm1.13\cdot10^{-11}$
300	$1.29\cdot10^{-12}\pm6.90\cdot10^{-14}$	550	$6.37\cdot10^{-10}\pm1.07\cdot10^{-11}$ **$6.81\cdot10^{-10}\pm4.77\cdot10^{-11}$(*)**
350	$5.38\cdot10^{-12}\pm1.48\cdot10^{-13}$	600	$6.77\cdot10^{-10}\pm1.26\cdot10^{-11}$
400	$2.26\cdot10^{-11}\pm5.75\cdot10^{-13}$	650	$7.26\cdot10^{-10}\pm1.20\cdot10^{-11}$ **$7.19\cdot10^{-10}\pm5.03\cdot10^{-11}$ (*)**
447	$1.62\cdot10^{-10}\pm1.62\cdot10^{-12}$		

Наши данные при Ер=550 и 650 кэВ в пределах погрешностей согласуются с результатами, полученными в работе Seagrave J.D. (Phys. Rev. 84 (1951) p.1219) (в таблице выделены полужирным шрифтом).

В третьей главе **«Анализ дифференциальных сечений реакций передачи, извлечение АНК и СФ»** приведены результаты анализа в рамках ММИВ полученных нами и литературных данных по реакциям передачи нейтрона $^{24}Mg(d,p)^{25}Mg$, $^{25}Mg(d,t)^{24}Mg$, передачи протона $^{24}Mg(d,n)^{25}Al$, $^{24}Mg(^3He,d)^{25}Al$ и передачи α–частицы $^{12}C(d,^6Li)^8Be$, $^{12}C(^3He,^7Be)^8Be$ для извлечения феноменологических значений АНК и СФ для одночастичных

связанных состояний ^{24}Mg+n→^{25}Mg, ^{24}Mg+p→^{25}Al и ^{3}He+α→^{7}Be. В каждом случае предварительно проводилась оценка периферийности реакции в области главного максимума углового распределения ДС по поведению функции R(b) (см. ф-лы (2), (5)). Извлечение феноменологических АНК производилось путем нормировки расчетных ДС (2) к соответствующим экспериментальным значениям в области главного максимума углового распределения. При расчетах использованы надежно установленные литературные значения C_d^2 =0.774 Фм$^{-1}$ для конфигурации d→p+n, $C_{3He}^2 = C_t^2$ =4.28 для ^{3}He→d+p и ^{3}H→d+n и C_{6Li}^2 =5.37 для ^{6}Li→d+α. При анализе ДС использовались оптимально отобранные по критерию χ^2 параметры оптических потенциалов (ОП) во входном и выходном каналах, необходимых для вычисления искаженных волновых функций программой DWUCK5. Использовались литературные данные, в том числе современные глобальные ОП, пригодность которых контролировалась качеством описания ДС упругого рассеяния, в т. числе измеренных нами. Значения АНК и/или СФ, извлекаемые из анализа каждого ДС, далее усреднялись с весами, учитывающими качество подгонки к экспериментальным точкам в главном максимуме углового распределения.

Для реакции ^{24}Mg(d,n)^{25}Al анализ экспериментальных ДС выполнен при энергиях E_d =7, 9 МэВ, и для реакции ^{24}Mg(^{3}He,d)^{25}Al при E_{3He} =25.0, 33.3 и 38.5 МэВ (раздел 3.1). Показано, что эти реакции при рассмотренных энергиях периферийны, поскольку функция R(b) изменяется не более, чем на ±4% для реакции ^{24}Mg(d,n)^{25}Al и на ±8% для реакции ^{24}Mg(^{3}He,d)^{25}Al при изменении параметра $b_{l,j}$ в интервалах 2.7≤ $b_{l,j}$ ≤5.7 Фм$^{-1/2}$. Извлечены феноменологические значения квадратов АНК ^{24}Mg+p→^{25}Al основного состояния ядра ^{25}Al.

ДС реакции ^{25}Mg(d,t)^{24}Mg проанализированы при энергиях E_d =14.5, 14.8 и 18 МэВ и реакция ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg при E_d =13.6 и 14.5 МэВ (раздел 3.2). При энергии 14.5 МэВ экспериментальные ДС измерены соискателем и являются новыми. Установлено, что реакция ^{25}Mg(d,t)^{24}Mg при рассмотренных энергиях периферийна, и извлечены значения квадратов АНК для конфигурации ^{24}Mg+n→^{25}Mg в основном состоянии ядра ^{25}Mg. Выяснилось, что реакция ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg не периферийна, и извлечение АНК из анализа ее ДС некорректно. Поскольку квадрат АНК связан с СФ с соотношением (4), было получено корректное значение СФ $Z = 0.41^{+0.13}_{-0.11}$ для ^{24}Mg+n→^{25}Mg в основном состоянии ядра ^{25}Mg, т.к. в этом случае значение b фиксируется по известному «экспериментальному» значению R(b).

В разделе 3.3 выполнен анализ реакции передачи α - частицы ^{12}C(d,^{6}Li)^{8}Be и ^{12}C(^{3}He,^{7}Be)^{8}Be для получения АНК конфигураций ^{3}He+α→^{7}Be при энергии E_d=28 и E_{3He}=41 МэВ, соответственно. Полученное из анализа ДС первой реакции значение квадрата АНК для ^{8}Be+α→^{12}C использовано в при анализе реакции^{12}C(^{3}He,^{7}Be)^{8}Be. Таким образом, получены значения

квадратов АНК $\alpha+^3He\rightarrow^7Be$ для основного и первого возбужденного состояний ядра ^7Be.

Полученные из анализа всех рассмотренных реакций значения квадратов АНК были усреднены по использованным парам ОП и по энергиям во входном канале реакции с соответствующими весами, и представлены в таблице 2.

Таблица 2

Феноменологические значения квадрата АНК

конфигурация	$C^2\pm\Delta C^2$, $Фм^{-1}$
$^{24}Mg+p\rightarrow^{25}Al$	4.57±0.49
$^{24}Mg+n\rightarrow^{25}Mg$	1.72±0.07
$^3He+\alpha\rightarrow^7Be$ (E*=0)	22.9±0.7
$^3He+\alpha\rightarrow^7Be$ (E*=0.430 МэВ)	18.0±0.5

Погрешности в значениях квадрата АНК включают в себя средние отклонения, связанные с зависимостью от конкретных ОП, погрешности, связанные с остаточной зависимостью функции $R(b)$ и экспериментальные ошибки.

Найденные нами значения квадрата АНК для нейтрона и протона в основных состояний зеркальных ядер ^{25}Mg и ^{25}Al в пределах погрешностей соответствуют выполнению соотношения $C_p^2/C_n^2=b_p^2/b_n^2$, вытекающего из расчетов АНК в ряде современных теоретических подходов.

В четвертой главе **«Расчеты астрофизических S-факторов и скоростей радиационного захвата»** продемонстрированы результаты применения найденных нами в главе 3 значений АНК для расчета астрофизических S-факторов реакций $^3He(\alpha,\gamma)^7Be$ и $^{24}Mg(p,\gamma)^{25}Al$ (раздел 4.2), а также выполнены расчеты скорости процесса $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ через измеренные нами выходы этой реакции (раздел 4.4) Использованы развитые теоретиками ИЯФ модифицированные двухчастичный потенциальный метод и R-матричный подход (и соответствующее программное обеспечение), которые позволяют использовать значения АНК для корректных расчетов S-факторов ядерно-астрофизических реакций, существенно увеличивая их точность.

С использованием найденных АНК рассчитаны значения астрофизических S–факторов ядерно-астрофизической реакции $^3He(\alpha,\gamma)^7Be$, которая дает поток жестких солнечных нейтрино. При энергиях E_α =0 и 23 кэВ получены суммарные значения $S_{34}(E)$ 0.596±0.017 и 0.591±0.017, соответственно. Эти значения хорошо коррелируют с результатами, полученными другими авторами.

Также с использованием найденного АНК для $^{25}Al\rightarrow^{24}Mg+p$ рассчитана зависимость от энергии S-фактора реакции $^{24}Mg(p,\gamma)^{25}Al$, которая является важным звеном горения водорода в магниевом цикле. Полученное для E=0 значение S – фактора для прямого радиационного захвата $S^{dir}(0)$ = 41.3 кэВ·б, больше на 27% значения 30.0 кэВ·б, полученного в работе Peterson R.J., et al. (Nucl. Phys. A246 (1975) p.402).

В разделе 4.4 приведены результаты расчета скорости радиационного захвата $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ в области звездных температур ($0.01 \le T_9 \le 1.0$) с помощью метода, предложенного в работе Roughton N.A., et al. (Astrophys. J. V205 (1976) p.302) непосредственно через измеренные нами и литературные значения выходов этой реакции. Для этого предварительно построена эмпирическая аппроксимация энергетической зависимости выхода (см. рис. 5), основанная на всех имеющихся экспериментальных данных, включая астрофизические *S*-факторы и полные поперечные сечения в области и ниже 1-го резонанса (E_r = 0.457 МэВ) в системе $\{^{13}N=^{12}C+p\}$ и имеющая вид:

$$[illegible], \qquad (8)$$

где $[illegible]$, W = 0.417, Г = 0.0395 МэВ и показатель степени $k(x=E')$:

$$k(x) = 5.0935 - 2.691x - 67.975x^2 + 282.825x^3 - 415.35x^4 + 226.4x^5 + \exp(2.2 - 53.2x + 56.15x^2)$$

Обратное значение тормозной способности $S^{-1}(x)$ протона в углероде аппроксимировалось в виде:

$$S^{-1}(x) = 9.72\cdot10^{-4}+4.14\cdot10^{-3}x-8.23\cdot10^{-4}x^2+2.26\cdot10^{-3}\cdot\exp(-52x)$$

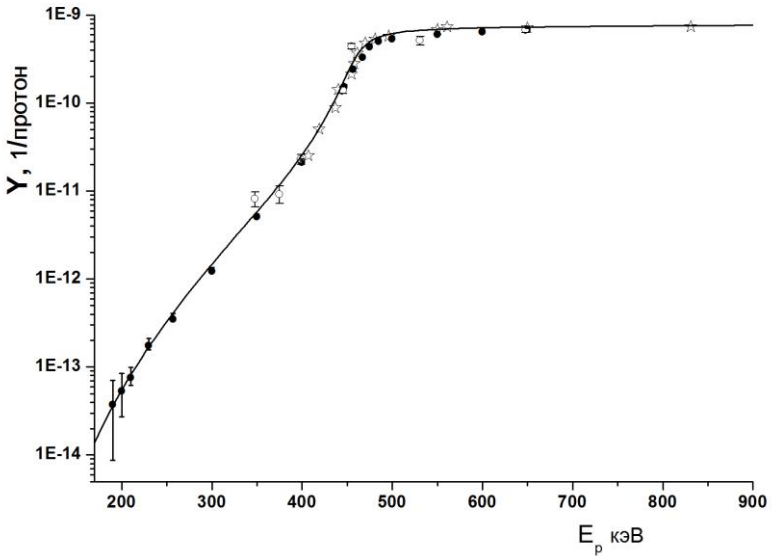


Рис. 5. Энергетическая зависимость выхода реакции $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$. Сплошная кривая - эмпирическая аппроксимация энергетической зависимости выхода. Полные кружки – наши экспериментальные данные

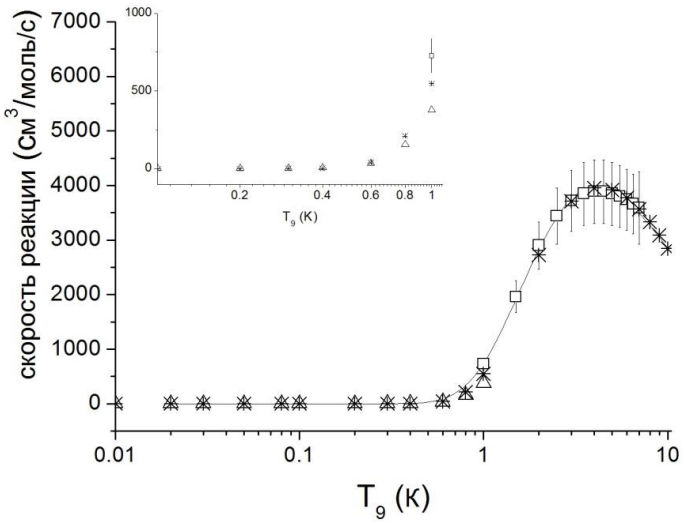


Рис. 6. Зависимость скорости реакции радиационного захвата $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ от температуры. Треугольники – наши данные, квадратики- из работы Roughton N.A., et al. (Astrophys. J. V205 (1976) p.302). На вставке рисунка показан фрагмент этой зависимости, рассчитанной по измеренным в данной работе выходам

Наши расчеты хорошо коррелируют с результатами, полученными авторами работы Roughton N.A., et al. (Astrophys. J. V205 (1976) p.302).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему «Определение спектроскопических характеристик ядер ^{7}Be, ^{25}Mg, ^{25}Al из реакции передачи и выхода радиационного захвата ^{12}C+p, и их применение в ядерной астрофизике» можно сделать следующие выводы.

1. Выполнены измерения ДС упругого рассеяния дейтронов на ядрах ^{24,25}Mg при энергии дейтронов E=14.5 и 18 МэВ и реакций передачи нейтрона ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg и ^{25}Mg(d,t)^{24}Mg при энергии дейтронов E=14.5 МэВ в передней полусфере углов вылета.
2. Разработана оригинальная версия метода активации для прецизионных измерений выходов и сечений ядерных реакций при низких энергиях, представляющих интерес для ядерной астрофизики. Создано соответствующее программное обеспечение набора и обработки информации, позволяющее в автоматическом режиме извлекать из экспериментальных данных значения выходов (сечений).
3. На выведенном пучке электростатического ускорителя ЭГ-2 в сотрудничестве создана экспериментальная установка, реализующая разработанный метод активации, установлены ее основные характеристики и продемонстрирована работоспособность методики.
4. Выполнены измерения выходов астрофизически важной реакции ^{12}C(p,γ)^{13}N в диапазоне энергий 190≤E≤ 650 кэВ, получены новые

прецизионные данные по выходу реакции при более низких энергиях и рассчитаны скорости реакции.

5. В рамках ММИВ выполнен анализ реакций передачи протона ^{24}Mg(^{3}He,d)^{25}Al, ^{24}Mg(d,n)^{25}Al, нейтрона ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg, ^{25}Mg(d,t)^{24}Mg и альфа частицы ^{12}C(d,^{6}Li)^{8}Be и ^{12}C(^{3}He,^{7}Be)^{8}Be при различных энергиях налетающих частиц и установлено, что эти реакции при рассмотренных энергиях являются периферийными в области главного максимума углового распределения вылетающей частицы, за исключением реакции ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg.
6. Определены значения квадратов АНК $C^2_{25Mg\to24Mg+n}$ и $C^2_{25Al\to24Mg+p}$ для основных состояний ядер ^{25}Mg и ^{25}Al. Показано, что реакция ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg является не периферийной. С учетом полученной АНК $C^2_{25Mg\to24Mg+n}$ извлечено корректное значение СФ для основного состояния ядра ^{25}Mg. Установлено, что пары зеркальных ядер ^{25}Mg и ^{25}Al в основном состоянии выполняются предсказанное теоретически соотношение $C_p^2/C_n^2=b_p^2/b_n^2$ между квадратами их АНК.
7. Получены значения квадратов АНК $C^2_{7Be\to3He+\alpha}$ для основного ($J^\pi=3/2^-$, E*=0.0 МэВ) и первого возбужденного состояний ($J^\pi=1/2^-$, E*=0.430 МэВ) ядра ^{7}Be и астрофизического S- фактора реакции ^{3}He(α,γ)^{7}Be при E=0 и 23 кэВ.

SCIENTIFIC COUNCIL DSC.27.06.2017.FM/T.33.01 ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS, ASTRONOMICAL INSTITUTE, NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN

INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS

TOJIBOYEV OLIMJON RUSTAMOVICH

DETERMINATION OF THE SPECTROSCOPIC CHARACTERISTICS OF ^{7}Be, ^{25}Mg, ^{25}Al NUCLEI FROM THE TRANSFER REACTIONS AND YIELD OF THE RADIATIVE CAPTURE ^{12}C+p, AND THEIR APPLICATION IN NUCLEAR ASTROPHYSICS

01.04.08 – Atomic nucleus and elementary particle physics. Accelerator facility

DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Tashkent – 2019

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No. B2018.1.PhD/FM185.

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

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

Scientific consultant:	**Artemov Sergey Viktorovich** Doctor of Physical and Mathematical Sciences
Official opponents:	**Olimov Kosim** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor
	Polvonov Satimboy Rajapovich Doctor of Philosophy (PhD) in Physics and Mathematics, professor
Leading organization:	**Samarkand State University**

The defense of the dissertation will be held on "___" _____ 2019, at ___ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics, Astronomical Institute, National University of Uzbekistan (Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-41, fax (+99871) 289-31-50; e-mail: info@inp.uz).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through in the Information Resource Centre of the Institute of Nuclear Physics (registered under No.____) Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-19.

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

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

E.M. Tursunov
Scientific Secretary of the Scientific Council for Awarding
Doctor of physical and mathematical sciences

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

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

Topicality and relevance of the theme of the dissertation. Nowadays in the world a lot of attention is drawn again to obtaining reliable information about the structure of the low-lying nuclear states. This is largely determined by the needs of rapidly developing nuclear astrophysics, which is associated with the progress in space technology and the increased experimental capabilities. On the other hand, the theoretical approaches developed in recent decades make it possible to extract practically model-free information from the precision experimental data, in particular, asymptotic normalization coefficients (ANC) of single-particle nuclear states, which are widely used in nuclear astrophysics. Such data are necessary for testing modern theoretical models of nucleus and reaction mechanisms as well as for calculating astrophysical S-factors at the Gamow energy window in stellar processes and during primordial nucleosynthesis. However, most of the required experimental data on nucleon and α-particle transfer, involving the light nuclei important for astrophysics, such as isotopes of beryllium, carbon, magnesium, were obtained mainly in the last century, have large errors, or have not been analyzed in the framework of the modern approaches. Therefore, the experimental studies of (d, p) and (d, t) reactions involving magnesium isotopes, a detailed analysis of these and other processes involving the transfer of an α-particle in interactions with ^{12}C nuclei, performed in this work, are relevant and in demand.

It is very important also to create new experimental techniques to measure directly the cross sections and yields of nuclear-astrophysical processes, such as radiation capture of nucleons and alpha particles, with small errors at the lowest possible energies corresponding to stellar temperatures. Measurements of the cross sections (or astrophysical S-factors) are currently receiving a great deal of attention, while alternative data on the yields of such processes are extremely scant even for such astrophysically important nuclei as ^{12}C. Therefore, no less relevant are development and creation of a new activation method, with obtaining new data on the ^{12}C+p radiation capture yields performed in this work.

In our Republic a primary attention is given to fundamental researches in the field of low-energy nuclear physics. A world-famous school in this area was developed in Uzbekistan, which has achieved significant results in studying the nuclear processes at low (~5-20 MeV/N) and ultra-low (<0.5 MeV) energies. The fundamental research topics, which are of great importance for the progress of science and its further application in practice in our country, are reflected in the Strategy[1] for Further Development of the Republic of Uzbekistan for 2017-2021. The researches in this work are directly related to the problems of nuclear astrophysics and the physics of controlled thermonuclear processes, including nuclear power, which is at leading edge of modern researches in the world.

The present investigation complies with tasks stipulated in government regulatory documents an Decree of the President of the Republic of Uzbekistan

[1] Decree of the President of the Republic of Uzbekistan "On the Strategy for the Further Development of the Republic of Uzbekistan" No. 4947 of 07 February 2017

UP-4947 “On Strategy of Actions for Further Development of the Republic of Uzbekistan for 2017-2021” dated of 2 February 2017, UP-4958 “On further improvement of postgraduate education” dated of 16 February 2017, in the Resolutions of the President of the Republic of Uzbekistan PP-2789 “On measures for further improvement of activities of the Academy of Sciences, organization, management and financing of research” dated of 17 February 2017.

Relevance of the research to the priority areas of science and technology development of the Republic of Uzbekistan. The dissertation research was conducted in accordance with the priority direction of development of science and technology in the Republic of Uzbekistan: II. “Energy, energy and resource efficiency”.

Degree of study of the problem. Study of the peripheral nuclear reactions with nucleons and clusters transfer for obtaining the values of ANC and spectroscopic factors (SF) of single-particle states in light nuclei and their use in calculations of astrophysical S-factors of radiative capture are conducted by leading scientists of world nuclear centers, for example, American (A.M. Mukhamedzhanov, P.E. Tribble , K.M. Nollett, K.E. Rehm, etc.), Japanese (T. Kajino, T. Motabayashi, K. Ogata, H. Hidetoshi), Italian (C. Spitareli, M. La Cognata), Kazakhstani (N. Burtebaev, L. Ibraeva, M. Zhusupov) and others. Uzbek scientists (S.V. Artemov, R. Yarmukhamedov, G.K. Ni, and others) which investigated the peripheral nucleon transfer reactions (d,t) and (^{3}He,d) on a number of light nuclei. The obtained ANC values are used for extrapolating calculations of astrophysical S-factors of some reactions of the pp-chain and CNO cycle of the hydrogen burning.

Radiative capture of a proton by a ^{12}C nucleus (input reaction of the CNO cycle) was investigated in the early works of Canadian scientists (C. Rolfs and others). The currently available ANC values for the {^{12}C + p} system obtained by Tashkent (S.V. Artemov and others) and Beijing (Li Zhi Hong, etc.) groups differ by more than 30%. The work of N. Burtebaev, R. Yarmukhamedov and others showed the need for precise measurement of the cross section for this reaction in the energy range, where the direct mechanism dominates, to extrapolate it to the energy range within the Gamow peak (~ 20-25 keV). It is also important to estimate the rate of this reaction by alternative methods, in particular, through its yield.

The ^{3}He(α,γ)^{7}Be radiative capture reaction is an important process of the primordial nucleosynthesis and one of the main links of the pp chain of hydrogen burning in stars, determining in particular the flux of high-energy solar neutrinos. Due to its astrophysical significance, this reaction has been experimentally investigated for almost 50 years with an increase in precision and advancement in the region of lower energies. Recently, in the framework of the LUNA collaboration (F. Confortola, D. Bemmerer, etc.), the S-factor of this reaction was measured up to an energy of ~ 93 keV, and its value was estimated by an indirect method at an energy of 23 keV (the position of the Gamow peak) by measuring the flux of solar neutrinos (Marcell P. Takács, D. Bemmerer, etc.). Uzbek scientists R.

Yarmukhamedov and K. Tursunmakhatov made extrapolating calculations of S-factors using the ANC values found from the analysis of these experimental data at energies E≥90 keV. However, it is necessary to define more exact the value of the ANC.

The proton transfer in the ^{24}Mg-^{25}Al system was studied by B. Mertens (Germany) using the (d,^{3}He) reaction at 18 and 20 MeV (1970); F. Entezami (United Kingdom) 33 MeV (1981); R.J. Peterson (USA) 38.5 MeV. The neutron transfer in the ^{24}Mg-^{25}Mg system was studied by E.W.Hamburger (USA) 1960, V.V. Tokarevsky et al. (Ukraine), I.R. Gulamov et al. (Uzbekistan) 1990. However, the ANC values of the {^{24}Mg+p} states were determined only by S.V. Artemov, S.B. Igamov et al. (Uzbekistan). This value is important for estimating the astrophysical S-factor for radiative capture of the proton by the ^{24}Mg nucleus, which is the first link in the MgAl chain of the ^{24}Mg(p,γ)^{25}A1(β^{+})^{25}Mg(p,γ)^{26}A1(β^{+})^{26}Mg cycle. The mechanism of formation of ^{26}Mg isotope has become the key for confirming the stellar nucleosynthesis models, since the γ-line found in cosmic radiation, accompanying β – decay of ^{26}A1(β^{+})^{26}Mg, is the first evidence of the continuation of stellar nucleosynthesis in the Universe. Therefore, it is necessary to define more exactly the ANC values of the proton-bound states {^{24}Mg+p}.

Connection of dissertational research with the plans of scientific research works of the scientific research institution, where the dissertation was conducted. The dissertation work was carried out within the framework of research projects at the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan on the following topics: F2-FA-Φ114 “Study of the formation of light elements and properties of exotic nuclei formed in reactions at low energies” (2012-2016) and F2- FA-F117 “Investigations of the dynamic properties of the fundamental characteristics of nuclei for nuclear astrophysics” (2012-2016).

The aim of the research is to determine the phenomenological values of ANC ^{3}He+α→^{7}Be; ^{24}Mg+n→^{25}Mg; ^{24}Mg+p→^{25}Al by analyzing the peripheral nuclear reactions of transferring nucleons and alpha clusters for use in calculation the S-factors of the nuclear astrophysical processes of radiative capture ^{24}Mg(p,γ)^{25}Al and ^{3}He(α,γ)^{7}Be, as well as determining the yields and reaction rates of radiative capture ^{12}C(p,γ)^{13}N.

The tasks of the research:

to develop a new activation method for measuring small values of the nuclear reaction yield;

to develop an algorithm for extracting nuclear reaction yields from experimental data and create appropriate software;

to determine the main characteristics and test the experimental installation MAIS created at the EG-2 accelerator, which implements a new activation method;

to perform precise measurements of the ^{12}C(p,γ)^{13}N reaction yields in the range of 190 - 650 keV at the proton beam of the EG-2 accelerator;

to measure differential cross sections (DS) of deuterons elastic scattering on ^{24,25}Mg nuclei and neutron transfer reactions ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg and ^{25}Mg(d,t)^{24}Mg at deuteron energy of 14.5 MeV;

to analyze the experimental DS of the reactions ^{24}Mg(d,n)^{25}Al, ^{24}Mg(^{3}He,d)^{25}Al, ^{25}Mg(d,t)^{24}Mg, ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg, ^{12}C(d,^{6}Li)^{8}Be and ^{12}C(^{3}He,^{7}Be)^{8}Be in the framework of the modified distorted wave Born approximation (MDWBA) and to obtain the values of the ANC squares for single-particle bound states ^{3}He+α→^{7}Be; ^{24}Mg+n→^{25}Mg; ^{24}Mg+p→^{25}Al; ^{3}He+α→^{7}Be* (E*=0.430 MeV); and SF for ^{24}Mg+n→^{25}Mg;

to calculate the reaction rate of the radiative capture ^{12}C(p,γ)^{13}N at low energies *E*, using the measured values of the yields of this reaction.

The objects of the research are the single-particle states of light nuclei involved in nuclear astrophysical reactions.

The subjects of the research are the peripheral nuclear reactions with transfer of nucleons and α-particles, as well as the processes of their radiative capture at low and ultra-low energies involving the light nuclei.

The methods of the research. The well-known and reliable experimental methods for ΔE-E registration and identification of charged reaction products by telescopes of silicon detectors and gamma-quanta by scintillation spectrometers, as well as conventional statistical data processing methods were used. The data were analysed by modified distorted wave Born approximation.

The scientific novelty of the research is as follows:

a new version of the activation method has been developed for measuring small yields in the reactions of radiative capture of charged particles with radioactive nuclei formation in the final state;

new data on the yield of the reaction ^{12}C(p,γ)^{13}N at an energy below 350 keV has been obtained and its rates have been calculated at stellar temperatures (0.01≤T9≤1.0);

the precise experimental values of the differential cross sections have been obtained for elastic ^{24,25}Mg+d scattering, ^{24}Mg(d,p)^{25}Mg and ^{25}Mg(d,t)^{24}Mg reactions at energies E_d=14.5 and 18 MeV in the range of angles from 8° to 44° in c.m.;

the values of squares of the asymptotic normalization coefficients for single-particle bound configurations {^{24}Mg+n} and {^{24}Mg+p} of ^{25}Mg $C^2_{25Mg\to24Mg+n}$=1.72±0.07 Fm^{-1} and ^{25}Al $C^2_{25Al\to24Mg+p}$=4.57±0.49 Fm^{-1} nuclei, as well as the value of spectroscopic factor of the ^{25}Mg nucleus in ^{24}Mg+n -configuration in the ground state $Z_{25Mg\to24Mg+n}$ =0.41±0.12 have been determined;

the values of the squares of the asymptotic normalization coefficients for α-particle bound configurations ^{3}He+α→^{7}Be in the ground (J^{π}=3/2^{-}, E*=0.0 MeV) $C^2_{7Be\to3He+\alpha}$=22.9±0.7 Fm^{-1} and first excited (J^{π}=1/2^{-}, E*=0.430 MeV) $C^2_{7Be\to3He+\alpha}$=18.0±0.5 Fm^{-1} states of the ^{7}Be nucleus have been determined.

Practical results of the research consist of the following:

an experimental facility has been created that implements the developed version of the activation method for measuring very low values of the yields and S-factors in deep sub-barrier processes of radiative capture of charged particles;

the yields of the nuclear-astrophysical process of proton radiative capture by ^{12}C nucleus were obtained in the energy range of 190–650 keV, which are necessary and important for extrapolating yields and S-factors to the stellar energy range;

the values of the asymptotic normalization coefficients for single-particle states of the light nuclei are obtained.

The reliability of the research results on the obtained experimental data is justified by use of reliable and widely used ΔE-E - method for detecting and identifying the charged particles-products of nuclear reactions, and scintillation method for recording annihilation gamma quanta, a sufficiently high statistical significance, a thorough calibration of the characteristics of experimental methods, by the agreement of the results of test measurements with the available data, as well as by application the conventional statistical methods to processing and analysis of the experimental data.

Spectroscopic information about nuclear levels was obtained within the framework of the generally accepted theoretical models for the analysis of peripheral reactions of nucleon transfer and radiation capture, and is in good agreement with the experimental results and theoretical conclusions of other researchers.

Scientific and practical significance of the research results. Scientific significance of the results obtained in this work is supported by the fact that the found values of the asymptotic normalization coefficients for $^{3}He+\alpha\rightarrow^{7}Be$, $^{24}Mg+n\rightarrow^{25}Mg$, $^{24}Mg+p\rightarrow^{25}Al$ make it possible to verify the correctness of the theoretical models of the structure of single-particle levels of light nuclei that predict these values. Use of them at extrapolating calculations of the fusion cross sections for ($^{3}He+\alpha$) and radiative capture of a nucleon by ^{24}Mg nuclei in the region of very low experimentally inaccessible energies allow us to estimate the flux of high-energy solar neutrinos and contribution of the direct process in the MgAl cycles of stellar hydrogen burning. The measured precision values of the yield of proton radiative capture by ^{12}C nuclei make it possible to implement the alternative theoretical estimates of the rate of this process in the CNO-cycle of stellar hydrogen burning.

The practical significance of the results obtained in this work is based on the fact that the developed new version of the activation method for measuring very small yields for the processes of radiation capture of charged particles can be used both in basic research in the field of nuclear astrophysics also for applied purposes - activation analysis on charged particle and fast neutrons beams. The method is flexible with respect to various experimental tasks, since it includes the possibility of both “PROMPT” - and “ACTIVATION” measuring of practically all decay products of final nuclei with periods ranging from ten seconds to tens of hours.

The obtained phenomenological values of the asymptotic normalization coefficients for the ground and low-lying states of light nuclei can be used in constructing the theoretical models for the structure of single-particle states in light nuclei, as well as in extrapolating calculations of nuclear processes, including the nuclear astrophysical ones.

The obtained experimental values of the yields of proton radiative capture by carbon can be used in the theory of nuclear reactions at low energies, in materials science research for nuclear and thermonuclear facilities.

Implementation of the research results. Based on the results obtained in study of transfer reactions on ^{12}C, $^{24,25}Mg$ nuclei and radiation capture:

The developed version of the activation method for measuring the yields and cross sections of the radiation capture reaction was used at the study of nuclear astrophysical reactions of radiation capture of charged particles in the framework of the project “Measurement of nuclear reaction cross sections on 1p-shell nuclei induced by light ions for astrophysical and nuclear applications” (2018- 2020) (Letter from the RSE "Institute of Nuclear Physics" of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan No. 34-11-01-04/571 of 29 April 2019). The developed version of the method allowed measurements of radiation capture cross sections with very small values;

The experimental values of the differential cross section for elastic $^{24,25}Mg+d$ scattering and $^{24}Mg(d,p)^{25}Mg$ and $^{25}Mg(d,t)^{24}Mg$ reactions at the energies E_d=14.5 and 18 MeV, as well as the ANC values obtained from analysis of these reactions were used at the researches nuclear reactions at low energies (Letter from the NRC “Kurchatov Institute” of 26 April 2019). The obtained results allowed to rsearch and planning new experiments at the cyclotron C200-P of the Heavy ion Laboratory of Warsaw University and cyclotron U-150M of the Institute of Nuclear Physics of the Republic of Kazakhstan;

The ANC values for configurations {$^{24}Mg+n$} and {$^{24}Mg+p$} of ^{25}Mg and ^{25}Al nuclei found as a result of analyzing the peripheral reactions of nucleon transfer on magnesium isotopes were used in conducting experiments at accelerators of the Institute of Nuclear Physics in the frameworks of the project “Measurement of nuclear reaction cross sections on 1p-shell nuclei induced by light ions for astrophysical and nuclear applications” (2018- 2020) (Letter from the RSE "Institute of Nuclear Physics" of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan No. 34-11-01-04/571 of 29 April 2019). These data make it possible to carry out preliminary estimates of the cross sections, which are important in the experimental study of nuclear astrophysical reactions of radiative capture of proton by magnesium isotopes;

The ANC values for $^{3}He+\alpha\rightarrow^{7}Be$ found as a result of analyzing the reactions $^{12}C(d,^{6}Li)^{8}Be$ and $^{12}C(^{3}He,^{7}Be)^{8}Be$, as well as the experimental values of the differential cross section for elastic $^{24,25}Mg+d$ scattering and $^{24}Mg(d,p)^{25}Mg$ and $^{25}Mg(d,t)^{24}Mg$ reactions at the energies E_d=14.5 and 18 MeV are currently used within the framework of the project “Determination of the asymptotic Normalization Coefficients for light nuclei” (Letter from the Heavy ion Laboratory

at Warsaw University of 20 May 2019). The obtained results allowed to planning new experiments at the cyclotron C200-P of Warsaw University.

Approbation of research results. The main results of the dissertation were reported at 7 international scientific conferences.

Publication of the research results. On the theme of the dissertation 12 scientific works were published, 5 scientific articles (3 of them in international scientific journals) are in the issues recommended by the Supreme Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of doctoral dissertations.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion and list of references. The volume of the dissertation is 113 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Artemov S.V., Zhuraev O.Sh., Karakhodzhaev A.A., Kayumov M.A., Yakushev V.P., Tozhiboev O.R. An Automated Technique for Identifying and Measuring Activities of Short_Lived Radionuclides // Instruments and Experimental Techniques. – Moscow (Russia), Ltd., 2013. -Vol.56, №2. -pp. 205–208. (№4. Journal Citation Reports; IF=0.613)
2. Aliev M.K., Artemov S.V., Baratbaev Sh., Igamov S.B., Karakhodjaev A.A., Muminov T.M., Raduk G.A., Rumi, R.F. Salikhbaev U.S., Tojibaev O.R., Khalikov R.I., Kholbaev I., Eshkobilov Sh.Kh., Juraev O.Sh. Multi detector setup for nuclear astrophysical reaction studies on the low energy ion beam // Uzbek Journal of Physics - Tashkent (Uzbekistan), 2015. -N 1-2 (17). -pp. 9-16 (01.00.00. №5)
3. Artemov S.V., Igamov S.B., Karakhodjaev A.A., Radyuk G.A., Tojiboyev O.R., Salikhbaev U.S., Ergashev F.Kh., Nam I.V., Aliev M.K., Kholbaev I., Rumi R.F., Khalikov R.I., Eshkobilov Sh.Kh., Muminov T.M. A Modified activation method for reaction total cross section and yield measurements at low astrophysically relevant energies // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – Netherlands, 2016. –V.825. –pp.17-23. (№4. Journal Citation Reports; IF=1.336)
4. Yarmukhamedov R., Tojiboev O.R., Artemov S.V. Asymptotic normalization coefficients for α + ^{3}He → ^{7}Be from the peripheral α-particle transfer reactions and their astrophysical application // IL NUOVO CIMENTO C.- Bologna (Italy), 2016. –V.39. –id.364. –p.5. (№41. SCImago; IF=0.134)
5. Артемов С.В., Буртебаев Н., Игамов С.Б., Караходжаев А.А., Тожибоев О.Р., Юлдашев Б.С. Анализ реакций передачи нуклона с участием изотопов магния и алюминия // Доклады Академии наук Республики Узбекистан.- Ташкент (Узбекистан), 2018. -№3. - С.38–43. (01.00.00. №7)

II бўлим (II часть; part II)

6. Алиев М.К., Артемов С.В., Баратбаев Ш., Игамов С.Б., Караходжаев А., Муминов Т.М., Радюк Г.А., Руми Р.Ф., Салихбаев У.С., Тожибаев О.Р., Халиков Р.И., Холбаев И., Эшкобилов Ш.Х., Якушев В.П. Четырех детекторная установка для изучения ядерноастрофизических реакций на электростатическом ускорителе «Сокол» НИИПФ НУУз // «Электростатические ускорители и ионные технологии»: Сб. Трудов 19-ой Межд. конф. - Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2013. -С.162-172

7. Yarmukhamedov R., Tojiboev O., Artemov S.V. Indirect methods and ANCs for nuclear astrophysics // JPS Conference Proceedings. – Tokyo (Japan), 2017. -V.14. –id.021003
8. Tadzhiboev O., Artemov S.V., Kajumov M, Sakuta S.B., Yarmukhamedov R. Determination of the asymptotic normalization coefficients for $p+^{7}Be\rightarrow {}^{8}B$, $\alpha+^{3}He\rightarrow^{7}Be$ and $\alpha+^{8}Be\rightarrow^{12}C$ from the $^{7}Be(d,n)^{8}B$, $^{12}C(d,^{6}Li)^{8}Be$ and $^{12}C(^{3}He,^{7}Be)^{8}Be$ reactions and their nuclear-astrophysical application // “Nuclear science and its application”: International Conference Samarkand, 25-28 September, 2012. – Tashkent, 2012. -pp.67-68
9. Aliev M.K., Artemov S.V., Tozhiboev O.R., Baratbaev Sh., Igamov S.B., Karakhodjaev A.A., Khalikov R.I., Kholbaev I., Muminov T.M., Salikhbaev U.S., Raduk G.A., Rumi R.F., Yakushev V.P. Eshkobilov Sh.Kh. Set-up for the Nuclear Astrophysical Reactions Study at Elektrostatic Accelerator EG-2 «Sokol» // “Nuclear science and its application”: International Conference Samarkand, 25-28 September, 2012. – Tashkent, 2012.-pp.164-165
10. Tojiboyev O.R., Artemov S.V., Igamov S.B., Karakhodjaev A.A., Nam I.V., Raduk G.A., Ergashev F.Kh., Aliev M.K., Kholbaev I., Rumi R.F., Khalikov R.I., Eshkobilov Sh.Kh. Testing the new activation method for study the reactions of nuclear astrophysics interest // «Ядерная и радиационная физика»: 10-я Межд. конф. 8-11 сентябрь, 2015. - Курчатов (Казахстан), 2015. -С. 118
11. Igamov S.B., Artemov S.V., Karakhodjaev A.A., Radyuk G.A., Tojiboyev O.R., Ergashev F.Kh., Aliev M.K., Kholbaev I., Rumi R.F., Khalikov R.I., Eshkobilov Sh.Kh. New calculation of rate of the astrophysical reaction $^{12}C(p,\gamma)^{13}N$ // Nuclear Science and Technologies: International Scientific Forum, September 12-15, 2017. - Almaty (Kazakhstan), 2017. -p.81
12. Tojiboyev O.R., Artemov S.V., Burtebayev N., Karakhodzhaev A.A., Ergashev F.Kh. Comparative MDWBA Analysis of Nucleon Transfer Reactions on $^{24,25}Mg$ for ANC Obtaining //«ЯДРО-2018»: 68-я Межд. конф. 1 – 6 июль 2018 г. - Воронеж (Россия), 2018. – С.172

Илмий раҳбар С.В.Артемов

Талабгор О.Р.Тожибоев