

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

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

КАЮМОВ БАХОДИР МАКСУДЖАНОВИЧ

**КУЛОН ТЎСИҒИГА ЯҚИН БЎЛГАН ЭНЕРГИЯЛАРДА ОҒИР
ИОНЛАР ЎРТАСИДАГИ ЎЗАРО ТАЪСИР ДИНАМИКАСИ**

01.04.08 – Атом ядроси ва элементар зарралар физикаси. Тезлаштирувчи техника

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

Тошкент– 2021

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

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

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

Каюмов Баходир Максуджанович

Кулон тўсиғига яқин бўлган энергияларда оғир ионлар ўртасидаги
ўзаро таъсир динамикаси..... 3

Kayumov Bakhodir Maksudjanovich

Dynamics of interaction in heavy ions collisions at the energy near to
Coulomb barrier..... 26

Каюмов Баходир Максуджанович

Динамика взаимодействия в столкновениях тяжелых ионов при
энергиях около кулоновского барьера..... 49

Эълон қилинган ишлар рўйхати

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

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

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

КАЮМОВ БАХОДИР МАКСУДЖАНОВИЧ

**КУЛОН ТЎСИҒИГА ЯҚИН БЎЛГАН ЭНЕРГИЯЛАРДА ОҒИР
ИОНЛАР ЎРТАСИДАГИ ЎЗАРО ТАЪСИР ДИНАМИКАСИ**

01.04.08 – Атом ядроси ва элементар зарралар физикаси. Тезлаштирувчи техника

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

Тошкент– 2021

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида № В2018.2.PhD/FM252 рақами билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, инглиз, рус (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси (www.inp.uz) ва «Ziynet» ахборот-таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Насиров Авазбек Каримович

физика-математика фанлари доктори,
катта илмий ходим

Расмий оппонентлар:

Артемьев Сергей Викторович

физика-математика фанлари доктори,
профессор

Олимов Хусниддин Қосимович

физика-математика фанлари доктори,
профессор

Етакчи ташкилот:

Ўзбекистон Миллий Университети

Диссертация ҳимояси Ядро физикаси институти ҳузуридаги DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 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 2021 йил « ____ » _____ куни тарқатилди.
(2021 йил “ ____ ” _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси)

М. Ю. Ташметов

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

О.Р.Тожибоев

Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш илмий котиби ф.-м.ф. PhD

И. Нуриддинов

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

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда дунёда аниқлиги юқори бўлган замонавий экспериментал курилмаларнинг пайдо бўлиши, атом ядроларининг тузилишини ва оғир ионлар тўқнашувидagi реакция механизмларини ўрганиш учун назарий тадқиқотларни ривожлантиришни талаб этмоқда. Экспериментал маълумотларга асосланиб кириш каналининг (бошланғич босқич) кулон тўсиғига яқин ва ундан юқори энергиялардаги реакция маҳсулотларининг ҳосил бўлишини ўрганиш ядроларнинг қўшилиш механизмларини аниқлашда ҳал қилувчи роль ўйнайди. Кириш каналининг таъсирини бир хил таркибий ядро ҳосил қилувчи турли масса асимметриясига эга бўлган снаряд-нишон жуфтлигининг реакциялар маҳсулотларини таҳлил қилиш орқали ўрганиш мумкин. Шу сабабли оғир ионларнинг ўзаро таъсир динамикасини ва массавий тақсимотини тадқиқ қилиш экспериментаторлар ва назарийчилар учун долзарб мавзулардан бири бўлиб қолмоқда.

Хозирги вақтда бутун дунё бўйлаб оғир ион тезлатгичларига эга тадқиқот марказларида трансурон ва ўта оғир элементларнинг янги изотопларини ишлаб чиқариш бўйича тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ўтказилаётган тажрибаларда қамраб олиш реакциялари ёрдамида ўта оғир элементларни олишда катта қийинчилик, бу синтез қилиш кесими қийматларининг жуда кичиклиги бўлиб, унинг сабаблари тўқнашувчи ядролар тўла қўшилишидаги мавжуд бўладиган тўсиқнинг катталиги ва/ёки ҳосил бўлган таркибий ядронинг бўлиниб кетишга қарши беқарорлигидир. Бундан ташқари, ядроларнинг тўла қўшилишининг кесимини таркибий ядро бўлинишида ўлчанилган маълумотларга асосланиб баҳолашда ноаниқлик мавжуд, чунки тўла қўшилишга рақобатдош бўлиниш симон реакция канали маҳсулотларининг айрим қисми қўшилиш-бўлиниш жараёни маҳсулотлари сифатида ўлчанилади. Оғир ионлар физикасидаги сўнгги тажрибаларнинг энг қизиқарли натижаларидан бири бу, янги турдаги реакция механизмларининг кашф этилишидир.

Ўзбекистонда сўнгги йилларда оғир ионлар ўртасидаги тўқнашувлар динамикаси, атом ядроларининг бўлиниш механизмларини ўрганиш бўйича назарий ва экспериментал тадқиқотларни ўтказишга катта эътибор қаратилмоқда. Ушбу фундаментал тадқиқотлар мамлакатимиз илм-фанининг ривожланишида катта аҳамиятга эгадир. Уларнинг амалий тадбиғи 2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегиясида¹ акс эттирилган.

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

¹Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги № ПФ-4947 сон Фармони «2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегияси»

тўғрисида” фармонлари, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон “Фанлар академияси фаолиятини янада такомиллаштириш, илмий ишларни ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштириш бўйича чора тадбирлар тўғрисида”, 2019 йил 21 ноябрдаги ПҚ-4526-сон “Ядро физикаси институти илмий-тадқиқот фаолиятини қўллаб-қувватлаш чора-тадбирлари тўғрисида” қарорлари, 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 иши республика фан ва технологиялар ривожланишининг II. «Энергетика, энерготехнакорлик ва муқобил энергия манбалари» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳозирги вақтда жаҳоннинг етакчи олимлари томонидан, жумладан, россиялик (G.G. Adamian, N.V. Antonenko, R. V. Jolos, E. M. Kozulin), германиялик (J. Khuyagbaatar, S. Hofmann, W. Scheid), италиялик (G. Fazio, G. Giardina, G. Mandaglio), кореялик (K. Kim, Y. Kim, Yongseok O.), хитойлик (H.Q. Zhang, P. Wen, L. Zhu), америкалик (E. Henry, W.U. Schröder), ҳиндистонлик (M. Thakur, A. Shamlath) ва бошқалар томонидан оғир ионлар ўртасидаги тўқнашувлар динамикасини ўрганиш борасида назарий ва экспериментал тадқиқотлар олиб борилмоқда. Бундан ташқари, ўзбекистонлик олимлар (В.П.Пикуль, Ю.Н.Коблик, А.К.Насиров, Р.Б.Ташходжаев ва бошқалар) нинг оғир ионлар хусусиятларини, бўлиниш маҳсулотларини, кинетик энергиясини ва реакциянинг бурчак тақсимотларини ўрганиш бўйича кўплаб ишлари мавжуд.

Бирлашган ядро тадқиқотлари институти (Россия) ва Ядро физикаси институти (Ўзбекистон) олимлари томонидан оғир ионлар ўртасидаги реакцияларда назарий ҳисоб ишларида аниқ натижалар олиш учун, қўшалок ядролар тизими модели ишлаб чиқилган. Бошқа моделлар билан таққослаганда қўшалок ядролар тизими моделининг афзалликларидан бири шундаки, бу модель ядро қобикларининг тузилишини тўқнашув жараёнига кўрсатган таъсирини ҳисобга олишга имкон беради. Бундан ташқари Хитойлик олимлар томонидан оғир ядроларни қўшилишини ҳисоблаш учун ишлаб чиқилган феноменологик модел мавжуд бўлиб, унинг параметрлари назарий натижаларни маълум бўлган экспериментал кесимлар ҳақидаги маълумотларга мослаштириш орқали топилади.

Аммо юқорида келтирилган усуллар ядроларнинг қўшилиш механизмлари физикасини тушунтириш учун етарлича маълумот бера олмайди. Бундан ташқари, реакция механизмига кириш каналининг қўшган ҳиссаси ва таркибий ядро ҳосил бўлиш вақтидаги нуклонлар алмашинуви шу кунгача ўрганилмаган.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институти илмий-тадқиқотлар режасининг ФА-Ф2-Ф055 "Оғир

ионлар иштрокидаги ядро реакциялар ва ядронинг бўлиниши натижасида ҳосил бўладиган маҳсулотларнинг чиқишини тадқиқ қилиш" (2007-2011), ФА-Ф2-Ф115 "Кўп нуклонли алмашилиш реакциялари ва қўшилиш-бўлиниш механизмини илмий тадқиқот қилиш" (2012-2016), ОТ-Ф2-14"Кучли ўзаро таъсирлашувчи квант системаларнинг коллектив ва микроскопик хусусиятларини тадқиқ қилиш" (2017-2020) мавзусидаги илмий лойиҳалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади бошланғич энергия ва орбитал моментнинг ҳар хил қийматлари учун реакция натижасида кузатилган маҳсулотлар чиқиш эҳтимоллигига турли механизмларнинг қўшган ҳиссасини баҳолашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

ядролар тўқнашувида бошланғич ҳолатдаги турли орбитал бурчак моменти ва ядро симметрия ўқи йўналиш бурчаклари учун умумий ўзаро таъсир потенциалини ҳисоблаш;

$^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ ва $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ реакцияларда ҳар хил бошланғич шартлар учун ҳаракат тенгламасини ечиш ва барьер ости қамраш жараёнларининг қўшган ҳиссасини баҳолаш учун тенгламани олиш;

$^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ ва $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ реакциялари учун қўшалок ядро системаси эволюциясининг мувозанатда бўлмаган бошланғич босқичи учун реакция маҳсулотларининг масса ва заряд тақсимотларини ҳисоблаш;

$^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ ва $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ реакциялари учун қўшалок ядро системаси эволюциясида қўшилиш, квазибўлиниш, тез бўлиниш ва буғланиш қолдиқлари учун кесим қийматларини ҳисоблаш;

$^{48}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ реакцияси учун қўшилиш, квазибўлиниш ва тез бўлиниш маҳсулотларини маасавий тақсимотга қўшган ҳиссасини баҳолаш;

$^{48}\text{Kr}+^{40}\text{Ca}$ реакцияси учун заряд тақсимотининг (чиқиш маҳсулотлари) бурчак моментига боғлиқлигини тадқиқ қилиш;

$^{48}\text{Kr}+^{40}\text{Ca}$ реакцияси учун чуқур эластик бўлмаган тўқнашув ва квазибўлиниш маҳсулотларининг бурчак тақсимот натижаларини таҳлил қилиш;

энергия ва бурчак моментининг ҳар хил бошланғич қийматлари учун қўшалок ядро системасининг яшаш вақтини баҳолаш.

Тадқиқотнинг объектини оғир ионлар тўқнашувидаги реакция маҳсулотлари ва уларнинг бурчак тақсимоти ташкил этади.

Тадқиқотнинг предметини иккита ядро ўртасидаги ўзаро таъсирнинг умумий потенциали, нишон-ядро томонидан снаряд ядросини қамрашида қўшалок ядро системасининг ҳосил бўлиши; ўзаро таъсир қилувчи иккита ядродан қўшалок системанинг эволюцияси, унинг яшаш муддати ва қўшалок ядро системасининг парчаланиши натижасида реакция маҳсулотларининг ҳосил бўлиши ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Кучли ўзаро таъсир феноменологик потенциалининг математик аппарати ва макроскопик статистик механика, дифференциал тенгламаларни ечишнинг аналитик ва сонли усуллари.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

энергиянинг потенциал тўсикдан паст қийматлари учун $^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ ва $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ реакцияларига камраш кесимининг тўсик ости қийматлари ҳисобланган;

$^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ ва $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ реакцияларининг 2n ва 3n эмиссия каналлари учун буғланиш қолдиғи кесимларида кузатилган экспериментал қийматларидаги катта фарқ сабаблари, ушбу реакцияларнинг ўзаро таъсир потенциаллари ва қўшилиш барьерлари орасидаги фарқ ҳисобига келиб чиқиши кўрсатилган;

$^{78}\text{Kr}(10 \text{ МэВ/нук.})+^{40}\text{Ca}$ реакциясида олд ярим шар қисмида снарядга ўхшаш маҳсулотларнинг кузатилишини, ҳосил бўлган қўшалок ядро системасининг 180° га бурилиб бўлиниш натижасидаги маҳсулотлар сифатида изоҳловчи янги усул таклиф қилинган;

$^{48}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ реакцияси бўлинишида, квазибўлиниш маҳсулотлари бўлинишга ўхшаш, яъни, қўшилиш-бўлиниш маҳсулотлари масса тақсимоти кенглигининг ошишига сабабчи эканлиги кўрсатилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

биринчи марта снаряд ядрони нишон ядроси билан камраш вақтида ҳосил бўлган қўшалок ядро система эволюциясининг мувозанатда бўлмаган босқичи учун масса ва заряд тақсимотлари олинган;

биринчи маротаба, олд ярим шар қисмида снарядга ўхшаш маҳсулотларнинг кузатилишини тушунтириш учун янги ҳисоблаш усули ишлаб чиқилган. Бунга асосан олд ярим шарда снарядга ўхшаш маҳсулотларнинг чиқиши, катта орбитал моментдаги тўқнашувларда ҳосил бўлган квазибўлиниш маҳсулотлари деб талқин қилинган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги ядро ва назарий физиканинг замонавий усуллари, юқори самарали алгоритмлар ва сонли усулларнинг қўлланилиши; олинган назарий натижаларнинг экспериментал маълумотларга ва бошқа муаллифларнинг натижаларига мувофиқлигини синчковлик билан текшириш; ҳулосаларнинг паст энергиядаги ядро реакцияларининг асосий қоидаларига мувофиқлиги билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти, Кулон тўсиғига яқин энергияда оғир ион тўқнашувида катта ядроларнинг қўшилиш механизмини аниқлашдан иборат. Диссертацияда келтирилган такомиллаштирилган назарий усуллар, ҳар бир реакция механизмларининг, чиқиш каналида кузатилган маҳсулотларга қўшган ҳиссасини баҳолашга имкон беради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, олинган натижалар ўта оғир ядроларни масса тақсимотида, нейтрон/протон сонларининг нисбати ва қобик эффектлари ролини ўрганишда имкон беради. Натижаларнинг яна бир амалий аҳамияти шундаки, реакция натижасида снаряд ядрони нишон ядронинг олд қисмида кузатилишини изоҳлашдир.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Кулон тўсиғига яқин бўлган энергияларда оғир ионлар ўртасидаги ўзаро таъсир динамикаси бўйича олинган илмий натижалар асосида:

$^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ ва $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ камраш реакциялари тўсик ости кесимининг ҳисобланган қийматлари хорижий олимлар томонидан фойдаланилган

(халқаро илмий журналлардаги ҳаволалар: Nuclear Physics A 994, 121662, 2020; Physical Review C 101, 014616, 2020; Physical Review C 101, 064604, 2020; Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 47, 075106, 2020). Илмий натижаларнинг қўлланилиши турли хил реакцияларда бошланғич энергиянинг потенциал тўсиқдан паст қийматлари учун камраш кесимининг тўсиқ ости қийматларини ҳисоблашга имкон берган;

$^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ ва $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ реакцияларида бўғланиш қолдиқ кесимларининг қийматлари ўртасидаги катта фарқни тушунтириш учун олинган натижалар халқаро тадқиқотчилар томонидан янги назарий ёндашувни синаб кўриш учун ишлатилган (халқаро илмий журналлардаги ҳаволалар: Nuclear Physics A 994, 121662, 2020; Physical Review C 101, 014616, 2020; Physical Review C 101, 064604, 2020; Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 47, 075106, 2020). Илмий натижаларнинг қўлланилиши кириш каналининг ролини кўшалок ядро системасининг эволюциясига қўшган хиссасини изоҳлашга имкон берган;

$^{78}\text{Kr}(10\text{ МэВ/нук.})+^{40}\text{Ca}$ реакциясида олд ярим шар қисмида снарядга ўхшаш маҳсулотларнинг кузатилиши учун таклиф қилинган усул чет эллик тадқиқотчилар томонидан фойдаланилган (халқаро илмий журналлардаги ҳаволалар: The European Physical Journal A 55, 29, 2019; Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 47, 045115, 2020; Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 47, 075106, 2020). Илмий натижаларнинг қўлланилиши кўшалок ядро системасидан снарядга ўхшаш маҳсулотларни чиқишини ўрганиш ва шу системанинг яшаш вақтини баҳолашга имкон берган;

$^{48}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ реакцияси бўлинишидаги квазибўлиниш маҳсулотлари ролини ўрганишдан олинган назарий ҳисоблашлар чет эллик тадқиқотчилар томонидан тадқиқ этилаётган реакцияларда масса тақсимотини ўрганишда фойдаланилган (халқаро илмий журналлардаги ҳаволалар: Physical Review C 98, 034601, 2018; Physical Review C 98, 014606, 2018; Physical Letters B 803, 135297, 2020). Илмий натижаларнинг қўлланилиши паст энергияларда оғир ионлар ўртасидаги реакцияларда рақобатлашувчи механизмларни бир биридан ажратиб олиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари 7 та халқаро ва республика илмий амалий анжуманларида ва халқаро мактабларда муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси доирасида жами 12 та илмий иш нашр этилган, жумладан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 5 та мақола, шулардан 4 таси ҳорижий журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг умумий ҳажми 102 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган. Республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган. Муаммонинг ўрганилганлик даражаси муҳокама қилинган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, тадқиқотнинг илмий янгилиги ҳамда амалий натижалари баён қилинган. Диссертация ишининг апробацияси ҳамда ишнинг ҳажми ва тузилиши ҳақида қисқача маълумот берилган.

Диссертациянинг **"Оғир ионлар тўқнашувида дастлабки босқичларнинг динамикаси"** деб номланган биринчи бобида тўқнашаётган ядроларнинг нисбий ҳаракатини тавсифлаш учун ядро-ядро ўзаро таъсир потенциали, масса ва ишқаланиш коэффицентини ҳисоблаш ишлари амалга оширилган. Ишқаланиш кучлари ядролар орасидаги нуклон алмашинуви ва уларнинг заррача-тешик қўзғалиши билан боғлиқлигини ҳисобга олсак, ишқаланиш коэффиценти микроскопик усулда ҳисобланади. Тўқнашаётган ядроларнинг динамикасини ўрганиш учун нисбий ҳаракат тенгламалари олинган. Булардан фойдаланиб, $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$, $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ ва $^{78}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ реакциялари учун турли хил бошланғич энергия ва орбитал момент қийматлари учун, қамраш ва чуқур эластик бўлмаган тўқнашув траекториялари ҳисоблаб чиқилган.

Қўшалок ядро системаси (ҚЯС) модели доирасида ўзаро таъсир потенциали қуйидаги ифода ёрдамида ҳисобланади:

$$V(R) = V_C(R) + V_N(R) + V_{rot}(R), \quad (1)$$

бу ерда $V_C(R)$, $V_N(R)$ ва $V_{rot}(R)$ Кулон, ядровий ва айланиш потенциалларидир. Реакцияда қатнашувчи ядроларнинг шакли кулон ва ядровий потенциалларни ҳисоблашда муҳим аҳамиятга эга. Ўзаро таъсир потенциалидаги ядровий қисми Мигдал томонидан таклиф қилинган $f_{eff}[\rho(x)]$ эффе́ктив нуклон-нуклон кучлари орасидаги фолдинг амалёти билан ҳисобланади.

$$\begin{aligned} V_{nucl}(R) &= \int \rho_1^{(0)}(r - r_1) f_{eff}[\rho] \rho_2^{(0)}(r - r_2) d^3r, \\ f_{eff}[\rho] &= C_0 \left(f_{in} + (f_{ex} - f_{in}) \frac{\rho^{(0)} - \rho(r)}{\rho^{(0)}} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Бу ерда $\rho_1^{(0)}$ ва $\rho_2^{(0)}$ снаряд ва нишон ядроларидаги нуклонларнинг зичлиги; $C_0 = 300 \text{ MeV fm}^3$, $f_{in} = 0.09$, $f_{ex} = -2.59$ эффе́ктив нуклон-нуклон ўзаро таъсирининг доимийлари; $\rho = \rho_1^{(0)} + \rho_2^{(0)}$.

Тўқнашаётган ядроларнинг нисбий ҳаракати қуйидаги тенгламалар ёрдамида ҳисобланади:

$$\mu(R) \frac{d\dot{R}}{dt} + \gamma_R(R) \dot{R}(t) = F(R), \quad (3)$$

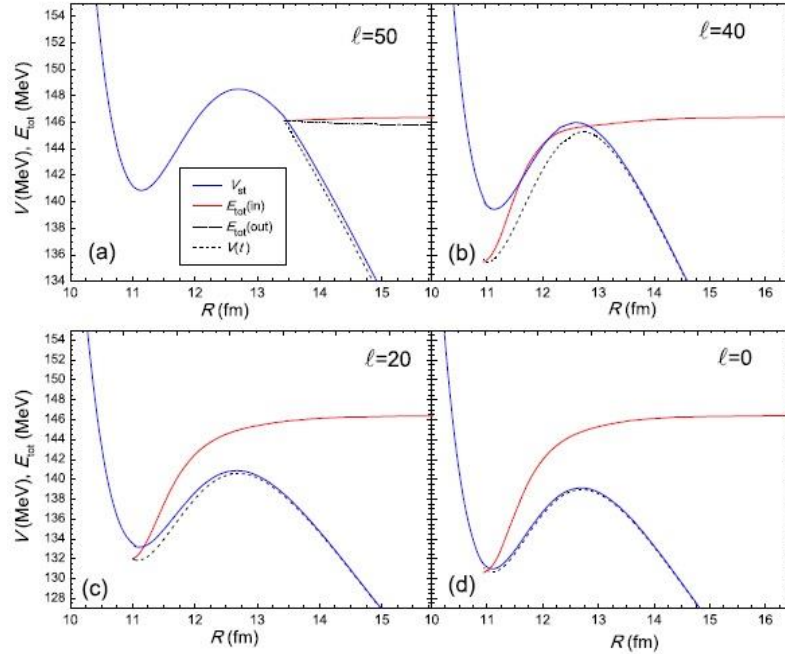
$$F(R, \alpha_1, \alpha_2) = -\frac{\partial V(R, \alpha_1, \alpha_2)}{\partial R} - \dot{R}^2 \frac{\partial \mu(R)}{\partial R},$$

$$\frac{dL}{dt} = \gamma_\theta(R) R(t) (\dot{\theta} R(t) - \dot{\theta}_1 R_{1eff} - \dot{\theta}_2 R_{2eff}),$$

$$L_0 = J_R(R, \alpha_1, \alpha_2) \dot{\theta} + J_1 \dot{\theta}_1 + J_2 \dot{\theta}_2,$$

$$E_{rot} = \frac{J_R(R, \alpha_1, \alpha_2) \dot{\theta}^2}{2} + \frac{J_1 \dot{\theta}_1^2}{2} + \frac{J_2 \dot{\theta}_2^2}{2},$$

Қамраш ва чуқур ноэластик тўқнашувлар ўртасидаги фарқ шундаки, нисбий ҳаракат импульси тўлиқ берилади ёки тўлиқ берилмайди. Иккала ҳолатда ҳам ҚЯС шаклланади. Қамраб олиш учун иккита шарт бажарилиши керак: 1) масса марказидаги снаряднинг дастлабки энергияси $E_{с.м.}$ ўзаро таъсир тўсиғини енгиш учун етарлича катта бўлиши керак (Кулон тўсиғи + кириш каналининг айланиш энергияси), 2) ҚЯС ядро-ядро ўзаро таъсир потенциали қудуғига тушиб қолиши учун нисбий кинетик энергиянинг бир қисмини тарқатиши керак. Агар потенциал қудуқ бўлмаса, чуқур ноэластик тўқнашув содир бўлади.



1-расм. $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ реакцияси учун, $E_{с.м.} = 146.41$ МэВ энергияда чуқур ноэластик тўқнашув (а) ва қамраш (б), (с), (д) траекториялари

Биринчи ҳолда (1(а)-расм) система ядро-ядро ўзаро таъсирининг потенциал қудуғига тушмайди ва чуқур ноэластик тўқнашувлар давомийлиги, қамраш реакцияларига қараганда қисқа бўлади (1-расм (б), (с), (д)). Умумий энергия E_{tot} , ишқаланиш коэффициенти ва нуқтали чизик билан тақдим этилган $V(t)$ ўзаро таъсир потенциали туфайли камаяди. Айланиш энергияси орбитал момент L қиймати ортиши билан ортиб боради ва система потенциал тўсиқдан ўта олмайди, шу сабабли $L = 50\hbar$ дан бошлаб биз фақат чуқур ноэластик тўқнашувларни кузатамиз.

Диссертациянинг “Реакция маҳсулотларининг заряд ва масса тақсимооти” деб номланган иккинчи боби, қамрашдан кейин ҚЯС эволюцияси

пайтида мумкин бўлган каналларни тавсифлашга бағишланган. Бошқарувчи потенциални ҳисоблаш, масса ва заряд тақсимоти, квазибўлиниш билан рақобатланувчи кўшилиш эҳтимоллигини баҳолашда муҳим роль ўйнайди.

Ўзаро таъсир доирасидаги ядролар орасидаги нейтрон ва протон алмашинуви жараёни системадаги масса тақсимотини ўзгаришига олиб келади. Реакция маҳсулотлари масса тақсимотининг характеристикалари, кўшалок ядро системасининг потенциал энергия юзаси (ПЭЮ), протонлар ва нейтронларнинг қобик тузилиши ва ҚЯС нинг уйғониш энергияси билан белгиланади. ПЭЮ ўзаро таъсир қилувчи ядролар орасидаги энергия баланси (Q_{gg}) ва ядро-ядро потенциал ($V(R)$) йиғиндиси орқали ҳисобланади:

$$U(Z, A, \ell, R, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2) = Q_{gg} + V(Z, A, R, \ell, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2), \quad (4)$$

бу ерда $Z = Z_1$ ва $A = A_1$ ҚЯС фрагментларининг заряд ва масса рақамлари, бошқа фрагментлар $Z_2 = Z_{tot} - Z_1$ ва $A_2 = A_{tot} - A_1$, бу ерда Z_{tot} ва A_{tot} реакциянинг умумий заряд ва масса сонлари; β_i - ядроларнинг деформация параметрлари ва α_i - снаряд йўналишига нисбатан ядроларнинг бурчаклари; Q_{gg} - таркибий ядронинг уйғониш энергиясини аниқлаш учун ишлатиладиган реакция энергия баланси: $Q_{gg} = B_1 + B_2 - B_{CN}$.

$U_{dr}(Z, A, \ell, R_m, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2) \equiv U_{dr}(Z, A, \ell)$ бошқарувчи потенциал бўлиб, у ҳар бир заряд қиймати Z учун, потенциал қудуқларнинг минимал қийматлари билан аниқланади. Ўзаро таъсир потенциалининг минимал қийматига мос келадиган нисбий масофа R_m билан белгиланади. $U_{dr}(Z, A, \ell)$ қийматлари орбитал моментнинг функцияси сифатида бўлиб, ПЭЮ ҳисоб маълумотларидан қуйидагича топилади:

$$U_{dr}(Z, A, \ell) = Q_{gg} + V(Z, A, \ell, R_m, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2). \quad (5)$$

Ядролардан биттасининг заряди Z ва масса сони A бўлган ҚЯС нинг уйғониш энергияси реакцияда қатнашувчи снаряд энергияси $E_{c.m.}$ ва реакция заряд-ассиметрия конфигурацияси $(Z, Z_{tot} - Z)$ орқали қуйидагича ҳисобланади:

$$E_Z^* = E_{c.m.} - V(Z, R_m) + \Delta Q_{gg}(Z), \quad (6)$$

бу ерда $Z_{tot} = Z_1 + Z_2$; $E_{c.m.}$ - масса маркази системасидаги тўқнашув энергияси; $V(Z, R_m)$ - ядро-ядро потенциал қудуғининг $R = R_m$ даги минимал қиймати; $\Delta Q_{gg}(Z)$ - ҚЯС заряд ассиметриясининг ўзгаришида Q_{gg} - қийматининг ўзгариши. Масса ва заряд рақамлари A ва Z бўлган ядроларнинг, ҚЯС нинг t_{int} яшаш вақтидан кейин чиқиш эҳтимоллиги қуйидагича ҳисобланади.

$$Y_{A,Z}(E_Z^*(A), \ell, t_{int}) = \int_0^{t_{int}} P_{A,Z}(E_Z^*(A), \ell, t) \Lambda_{A,Z}^{qf} dt, \quad (7)$$

бу ерда $P_{A,Z}(E_Z^*(A), \ell, t)$ - (Z, A) конфигурацияли ҚЯСнинг уйғониш энергияси E_Z^* , орбитал моменти ℓ билан вақтнинг берилган t қийматида ҳосил бўлиш эҳтимоллиги. Λ_Z^{qf} - ҚЯСнинг заряд рақамлари Z ва $Z_{CN} - Z$ бўлган иккита бўлакка парчаланиш эҳтимолиги. Бу катталиқ ўзаро таъсир потенциалидаги квазибўлиниш тўсиғига тескари боғланган бўлиб, B_{qf} квазибўлиниш тўсиғини камайтириш билан ортади; $P_{A,Z}(E_Z^*(A), \ell, t)$ эса, транспорт мастер тенгламасини ечиш билан ҳисобланади,

$$\frac{\partial}{\partial t} P_K(E_K^*, \ell, t) = \Delta_{K+1}^{(-)} P_{K+1}(E_{K+1}^*, \ell, t) + \Delta_{K-1}^{(+)} P_{K-1}(E_{K-1}^*, \ell, t) - \quad (8)$$

$$\left(\Delta_K^{(-)} + \Delta_K^{(+)} + \Lambda_K^{qf} \right) P_K(E_K^*, \ell, t)$$

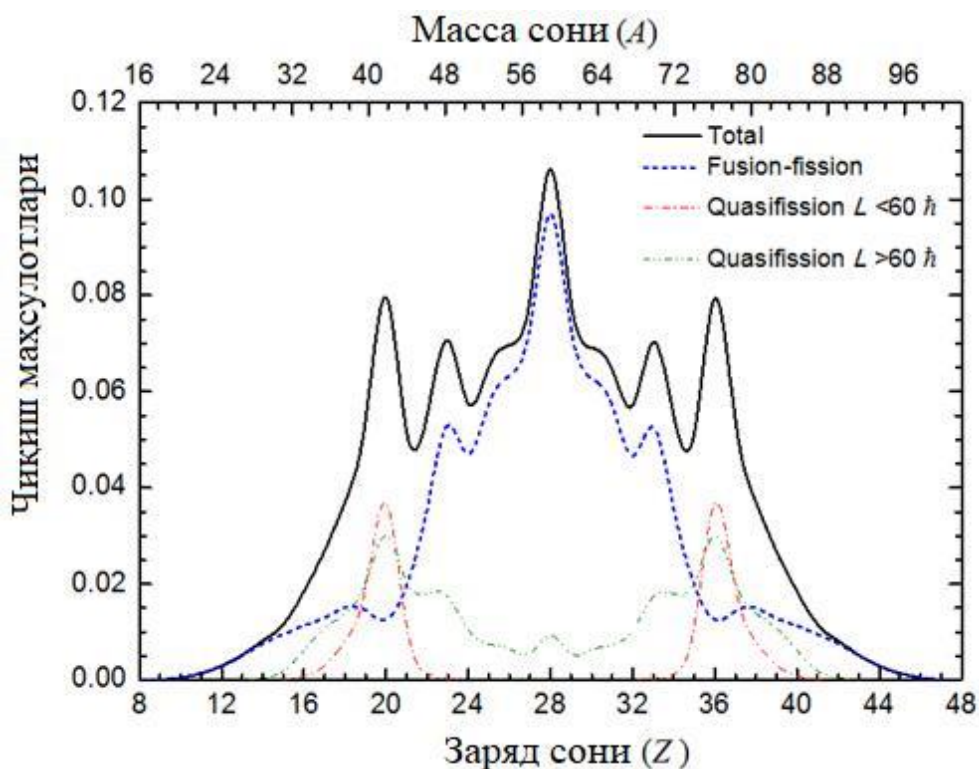
Кўп нуклонли ўтиш коэффициентлари қуйидагича ҳисобланади:

$$\Delta_K^{(\pm)}(A) = \frac{4}{\Delta t} \sum_{i_P, j_T} |g_{i_P j_T}^{(K)}(A)|^2 \times n_{j_T, i_P}^{(K)}(A, t) (1 - n_{i_P, j_T}^{(K)}(A, t)) \quad (9)$$

$$\times \frac{\sin^2[\Delta t(\tilde{\varepsilon}_{i_P}^{(K)}(A) - \tilde{\varepsilon}_{j_T}^{(K)}(A))/2\hbar]}{(\tilde{\varepsilon}_{i_P}^{(K)}(A) - \tilde{\varepsilon}_{j_T}^{(K)}(A))^2},$$

бу ерда $g_{i_P j_T}^{(K)}(A)$ матрица элементи бўлиб, битта нуклонни ҚЯС ташкил этувчи "P" ядронинг "i_P" сатҳи билан "T" ядронинг "j_T" сатҳи орасида алмашинувини тавсифлайди (протон алмашинуви учун $K = P$ ва нейтрон алмашинуви учун $K = N$) ва уларнинг қийматлари микроскопик усул билан ҳисобланади. $\tilde{\varepsilon}_{i_P}^{(K)}$ ва $n_{i_P}^{(K)}$ "P" ядронинг ўртача майдони учун ҳисобланган бир заррали энергия схемасининг мос равишда "i_P" сатҳи энергияси ва унинг бандлик сони. $\Delta_K^{(-)}$ ва $\Delta_K^{(+)}$ ўтиш коэффициентларининг ядролар массаси ва заряд сонларига боғлиқлиги туфайли, нейтрон ва протон тақсимотлари P_Z ва P_N ҳам ўзаро боғлиқ бўлиб, уларнинг асосий тенгламалари параллел равишда Δt вақт қадами билан ечилган. Протон ва нейтронларнинг бир ядродан бошқа ядрога ўтиши бир вақтнинг ўзида, аммо ҳар хил эҳтимолликлар билан амалга ошиши аниқ. "P" ва "T" ҳарфлари ҚЯС-нинг мос равишда снарядга (энгил) ва нишон (оғир) бўлаклардаги нуклонларнинг битта заррача ҳолатларини кўрсатиш учун ишлатилади.

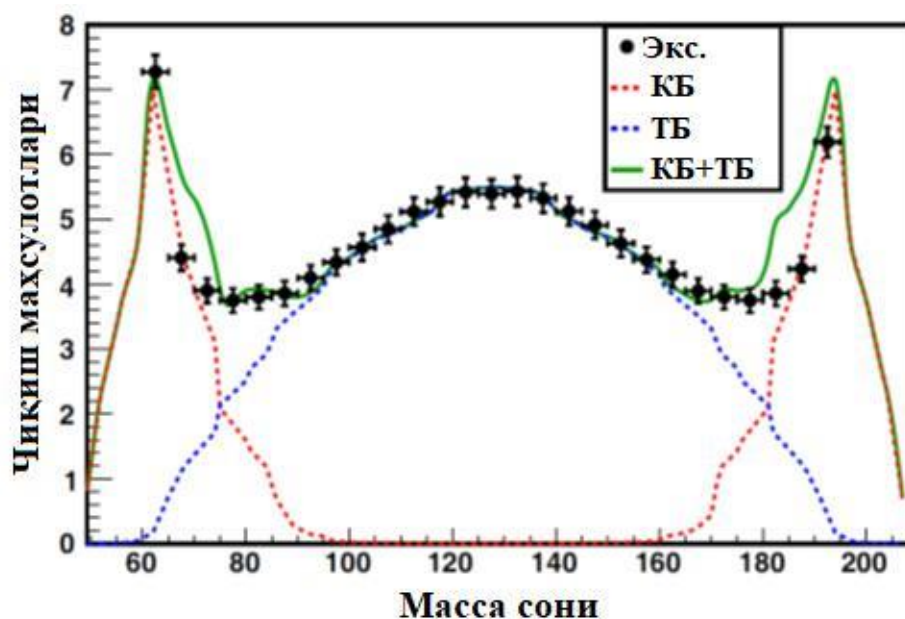
Квазибўлиниш маҳсулотларининг $^{78}\text{Kr} (E/A = 10 \text{ MeV}) + ^{40}\text{Ca}$ реакция маҳсулотларини ҳосил бўлишига қўшган ҳиссаси (7) тенгламани рақамли усул ёрадида ечиш билан баҳоланди.



2-расм. $E_{lab} = 10$ MeV/A энергияда $^{78}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ реакцияси учун ҳисобланган квазибўлиниш ва қўшилиш-бўлиниш маҳсулотларида масса (заряд) тақсимооти

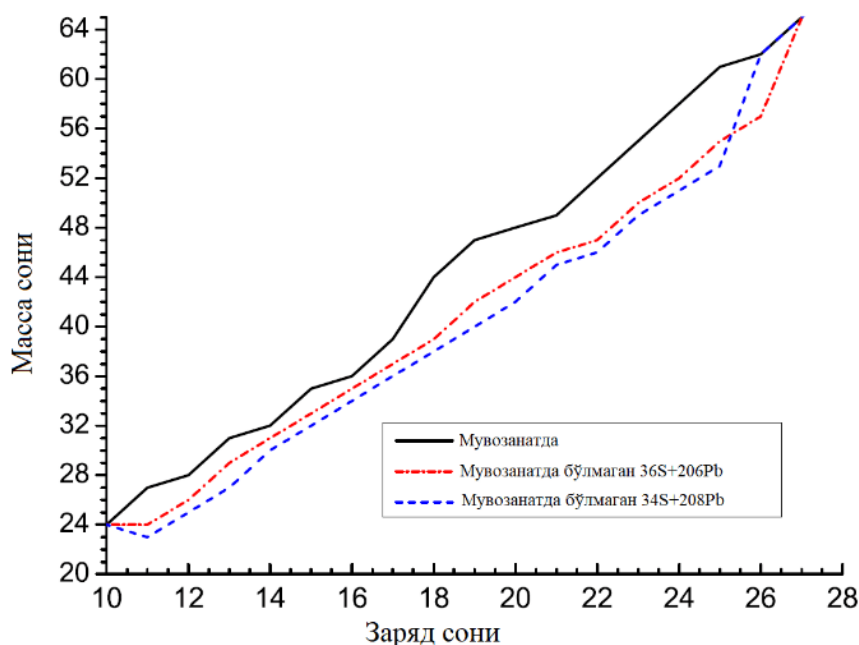
2-расмда орбитал моментнинг $L < 60\hbar$ қиймати билан тўқнашувларда квазибўлиниш маҳсулотларида заряд ва масса тақсимооти энгил ядро учун $Z_L = 18$ ва $A_L = 38$ атрофида, оғир ядро учун эса $Z_H = 38$ ва $A_L = 78$ атрофида йиғилганлиги аниқ кўриниб турибди. Заряд тақсимоотининг шакли, нейтронлар сони $N = 20$ ва 40 га тенг бўлган ядро ёпиқ қобиғининг таъсирининг намоён этади. Нуклонларнинг ўтиш коэффициентларининг ҚЯС ядроларидаги битта заррачали энергияларга бевосита боғлиқлиги ва тўқнашув энергиясининг анча қисмини (тахминан 40 МэВ) ҚЯС айланиш энергияси кўринишида қолиши бирламчи маҳсулотларнинг заряд тақсимоотини тасвирловчи чизиқлардаги қобиқ эффектларининг сақланиб қолишининг сабабларидир. Энгил ядролардаги энергия сатҳлари орасидаги бўшлиқлар катта ядроларга қараганда катта ва бу қобиқ эффектлари пайдо бўлишига ёрдам беради. Квазибўлиниш жараёнларида заряд ва масса тақсимоотларининг шакли орбитал моментга боғлиқдир. $60\hbar < L < 70\hbar$ оралиқда бўлган тўқнашувларда, квазибўлиниш маҳсулотларининг тақсимооти қўшилиш-бўлиниш маҳсулотлари заряд ва масса тақсимоотларига ўхшаб спектрнинг симметрик массали қисмига қараб чўзилади.

3-расмда назарий ҳисобланган масса тақсимоотини экспериментал натижалар билан таққосланиши кўрсатилган [Meenu Thakur, *et.al.*, EPJA 53:133 (2017)].



3-расм. ^{48}Ti ($E = 273.1$ МэВ) + ^{208}Pb реакцияси учун квазибўлиниш (қизил чизик) ва қўшилиш-бўлиниш (кўк чизик) маҳсулотларини назарий баҳолаш натижалари

Назарий ҳисобланган реакция маҳсулотларининг чиқиши шуни кўрсатадики, 64-сонли масса яқинида квазибўлиниш ва қўшилиш-бўлиниш маҳсулотларининг масса тақсимотлари устма-уст тушган. Ушбу пик Fe ва Ni изотопларининг $N = 38$ ва 40 нейтрон рақамлари билан ҳосил бўлишига боғлиқ.



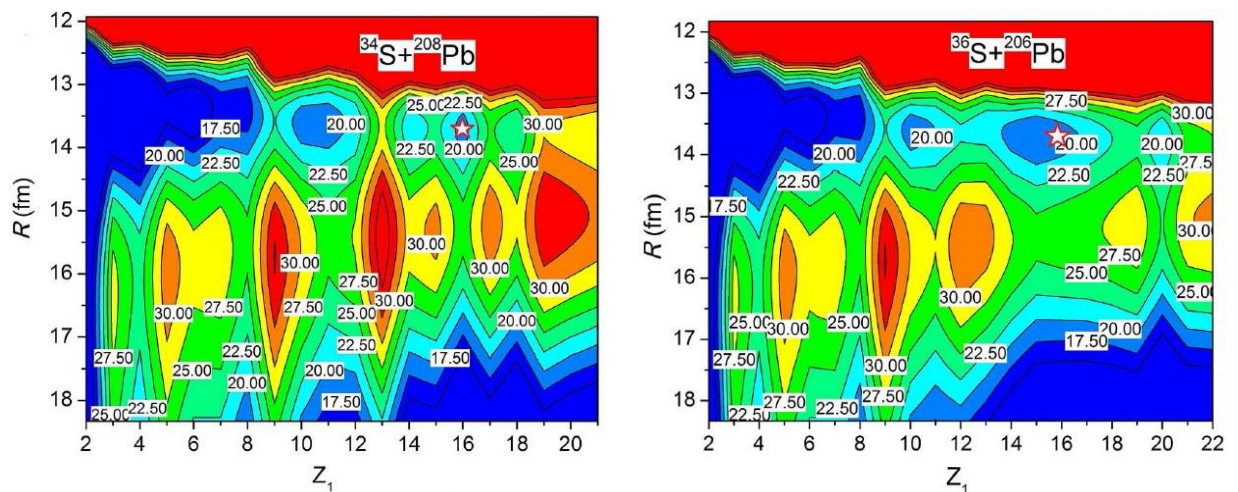
4-расм. ҚЯС эволюциясининг мувозанатда бўлмаган бошланғич босқичи учун $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ (қизил) ва $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ (кўк) реакцияларига протон сонининг функцияси сифатида ҳисобланган снаряд ядродаги масса тақсимоти. Система мувозанат ҳолатига келганда, иккала реакциянинг масса тақсимотлари устма-уст тушади

ҚЯС эволюциясининг маълум яшаш вақтидаги масса ва заряд тақсимотлари орасидаги фарқ, тўқнашувда қатнашувчи ядроларнинг нейтрон ва протонлар сонининг бошланғич N/Z - нисбатига боғлиқ, чунки нуклон алмашилишини келтириб чиқарадиган ўтиш коэффициентлари бир хил зарядга эга ядроларнинг нейтронлар билан фарқланадиган изотоплар учун ҳар хилдир. Ҳар хил бошланғич нейтрон рақамларига эга $N = 18$ (^{34}S) ва $N = 20$ (^{36}S) бўлган ядролар қатнашган реакцияларда қамраб олиш пайтида ҳосил бўлган ҚЯС бўлаклари орасидаги протон ва нейтронлар нисбати N/Z нинг вақт бўйича ўзгариши транспорт мастер тенгламаларини ечиш йўли билан аниқланган.

Натижада, ҚЯС фрагментларининг ўзаро таъсир давомидаги дастлабки мувозанатда бўлмаган босқичида $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ реакциясидаги снарядга ўхшаш қисмда N/Z – нисбат қиймати энг каттадир. Бу эса, ушбу иккита реакция учун ҳисобланган потенциал энергия юзасидан олинувчи ҳаракатлантирувчи потенциал ва ландшафт шаклини таққослашда сезилади. $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ реакциясида ҳосил бўлган снарядга ўхшаш нейтронга бой бўлакка эга бўлган ҚЯСда ички қўшилиш тўсиқ катталиги пастроқдир. $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ ва $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ реакциялари учун масса ва заряд алмашинувидаги фарқ, бу реакцияларда қўшилиш эҳтимоллигидаги фарқни пайдо бўлишига олиб келади.

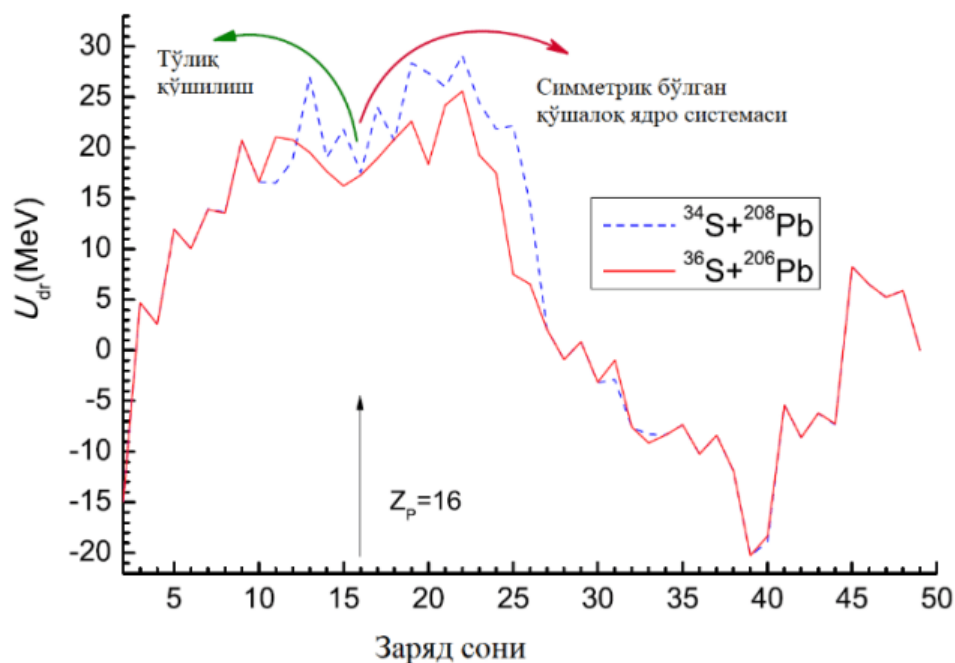
$^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ реакциясида ҳосил бўлган ҚЯС нинг снарядга ўхшаш қисми, $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ реакциянинг шундай қисми билан таққосланганда, кўпроқ нейтронга эга эканлиги 4-расмдан кўриниб турибди. Натижада биринчи реакцияда ядроларнинг қўшилиш эҳтимоллиги катта бўлади. Бўлаклар орасидаги нейтронларнинг мувозанат ҳолатдаги тақсимоли, ҚЯС қисмларига масса сонларининг функцияси сифатида ПЭЮнинг минимал қийматларига мос келувчи масса катталиклари олинган (4-расмдаги қора чизиқ). ҚЯС мувозанатда бўлмаган ҳолат учун ҳисобланган снарядга ўхшаш қисмдаги нейтрон тақсимоли шу системанинг $t_{int} = 6 \cdot 10^{-22}$ яшаш вақти учун олинган.

ПЭЮни ҳисоблаш учун заряд рақами Z ва унга мос келадиган масса A натижаларидан фойдаланилади, бу эса бизга P_{CN} қўшилиш эҳтимоллигини ҚЯС ядроларининг масса ва заряд асимметрияси функцияси сифатида ҳисоблаш имконини беради. $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ реакциясида $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ реакциясига нисбатан тўлиқ қўшилиш тўсиғи ортиши, ядро марказлараро масофаси функцияси ва уларнинг масса-зарядлари орасидаги ўзгаришга боғлиқ равишда ҳисобланган ПЭЮни таққослаш натижасида кўринади. 5-расмдаги иккала ПЭЮ орасидаги фарқ (7) тенгламани ечишда, иккала система учун олинган ҳар хил масса сонларидан фойдаланиш туфайли пайдо бўлади. 5-расмдан кўриниб турибдики, потенциал юза $Z = 13$ ва $R = 13.5$ фм га мос келувчи қийматларда ички қўшилиш тўсиқ B_{fus}^* га тўғри келувчи максимал қийматга эга.



5-расм. $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ ва $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ реакцияларидаги ҚЯС бўлаклари орасидаги нейтронлар тақсимотининг мувозанатга етмаган ҳолати учун ҳисобланган ПЭЮнинг контур кўриниши. ПЭЮдаги юлдузлар бошланғич заряд рақамини ва ядролараро масофани тавсифлайди

Ушбу тўсиқ $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ реакция ҳолатида тўлиқ қўшилиш тўсиғи бўлиб кўринади ва унинг қиймати $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ реакцияси учун ҳисобланган ички қўшилиш тўсиқ катталигидан анча юқори. 6-расмдан кўриниб турибдики,



6-расм. Битта ^{242}Cf таркибий ядрога олиб келувчи икки реакция учун заряд сони функцияси сифатида ҳисобланган бошқарув потенциали

$^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ реакцияси учун ҳисобланган бошқарув потенциали (кўк чизик) заряд рақами $Z = 13$ бўлган бўлак учун кескин кўтарилади. $Z = 16$ кириш каналига мос келадиган ҳаракатланиш потенциалнинг қиймати $Z \rightarrow 0$ қўшилиш йўналишидаги $Z = 13$ бўлган максимал қийматдан пастроқдир. Ички қўшилиш тўсиғи $B_{fus}^*(Z, A, \ell)$, ҳаракатланиш потенциалнинг $Z = 0$ ва

$Z = Z_P$ орасидаги бошланғич заряд қиймати ўртасидаги фарқ орқали аниқланади,

$$B_{fus}^*(Z, A, \ell) = U_{dr}(Z_{max}, A_{max}, \ell) - U_{dr}(Z_P, A_P, \ell). \quad (10)$$

Диссертациянинг **“Оғир ионларнинг тўқнашувларидаги қамраб олиш, тўлиқ қўшилиш, квазибўлиниш ва бўғланиш қолдиқлари жараёнларининг кесимлари”** деб номланган учинчи боби, ҳар бир канал учун тўқнашувлар пайтида рақобатлашадиган каналлар эҳтимолликларини ҳисоблаш усулини акс эттиради. $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ ва $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ реакциялари учун олинган натижалар, GSI (Дармштадт, Германия) ва JAEA (Токай, Япония) да олинган экспериментал маълумотлар билан таққосланган.

Қамраб олиш кесим катталигининг назарий қийматлари кириш каналини тавсифловчи катталиклар билан ҳисобланади:

$$\sigma_{cap}(E_{c.m.}) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \sum_{\ell=0}^{\ell_d} (2\ell + 1) \mathcal{P}_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}), \quad (11)$$

бу ерда $\mathcal{P}_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.})$ - $E_{c.m.}$ тўқнашув энергияси ва $L = \hbar\ell$ орбитал момент эга снаряд ядрони нишон ядро томонидан қамраб олиш эҳтимоллиги; $\lambda = \hbar/\sqrt{2\mu E_{c.m.}}$; $\mu = A_1 A_2 / (A_1 + A_2)$ – ҚЯСнинг келтирилган массаси.

Парциал қамраб олиш кесими $\sigma_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\})$ қамраб олиш $\mathcal{P}_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\})$ эҳтимоллиги, яъни нисбий кинетик энергиянинг ютилиб кетишини тасвирловчи эгри чизигининг ядро-ядро ўзаро таъсир потенциал кудуғига тушиб қолишини ҳисоблаш йўли билан аниқланади:

$$\sigma_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}) = \frac{\lambda^2}{4\pi} (2\ell + 1) \mathcal{P}_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}). \quad (12)$$

Бу ерда λ - кириш каналининг де-Бройл тўлқин узунлиги. Классик ҳаракат тенгламаси билан ҳисобланган $\mathcal{P}_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\})$, қамраб олиш эҳтимоли берилган бошланғич энергия ва орбитал момент учун 1 ёки 0 га тенг бўлиши мумкин. $E_{c.m.}$ энергиясига боғлиқ равишда, орбитал момент функцияси сифатида қамраб олиш учун ℓ -оралиқ ($\ell_m < \ell < \ell_d$) мавжуддир:

$$\mathcal{P}_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}) = \begin{cases} 1, & \text{if } \ell_m < \ell < \ell_d \text{ and} \\ & E_{c.m.} > V_B, \\ 0, & \text{if } \ell < \ell_m \text{ or } \ell > \ell_d \text{ and} \\ & E_{c.m.} > V_B, \\ \mathcal{P}_{WKB}^{(\ell)}, & \text{for all } \ell \text{ if } E_{c.m.} \leq V_B, \end{cases} \quad (13)$$

бу ерда, ℓ_m ва ℓ_d - бу тўқнашув энергиясида қамраб олишга олиб келадиган орбитал моментнинг минимал ва максимал қийматлари; V_B - кириш каналидаги ядро-ядро потенциалнинг тўсиқ қиймати; $\mathcal{P}_{WKB}^{(\ell)}$ - тўсиқ орқали қамраш эҳтимоли. Унинг қиймати, ВКБ яқинлашуvidан фойдаланиб олинган формула бўйича ҳисобланади:

$$\mathcal{P}_{WKB}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}) = \exp \left[-2 \int_{R_{in}}^{R_{out}} k(R, \ell, \{\beta_i\}) dR \right], \quad (14)$$

бу ерда

$$k(R, \ell, \{\beta_i\}) = \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2} (V(R, \ell, \{\beta_i\}) - E_{c.m.})}. \quad (15)$$

R_{in} ва R_{out} ички ва ташқи бурилиш нуқталари бўлиб, улар $V(R) = E_{c.m.}$ билан баҳоланган. $\ell < \ell_m$ оралиқда қамрашнинг йўқлиги, $E_{c.m.}$ дан бошланган нисбий энергия эгри чизиғини потенциал қудуққа тушиб қолмаганлигини англатади. Қамрашга ҳисса қўшадиган парциал тўлқинлар сони бир вақтнинг ўзида радиал ва орбитал ҳаракатлар учун (3) тенглама системасини ечиш билан ҳисобланади.

Уйғонган ҳолатдаги ҚЯС яшаш вақти давомида шу системани ташкил этувчи иккита ядро ўртасида нуклонлар алмашинуви билан ривожланади. Ҳар бир ҳолат учун реакциянинг ушбу босқичида ҚЯС деформацияланган моноядро шаклига ўтиши ёки тўлиқ қамраш босқичига ўтгунча икки бўлакка (квазибўлиниш) ажралиши мумкин. Биринчи ҳолда, ядро тизими таркибий ядронинг статистик мувозанат шаклига етиши керак, аммо барқарорликни таъминлаш учун тўсиқ бўлмагани учун ($B_f = 0$, $\ell > \ell_f$ учун), деформацияланган моноядрога мос келадиган ҳодисалар таркибий ядро шаклига ета олмайди ва деформацияланган моноядро дарҳол иккита бўлакка ажралади (тез бўлиниш жараёни). Шунинг учун парциал қамраш кесимида куйидаги ҳадлар ўз ҳиссасини қўшади:

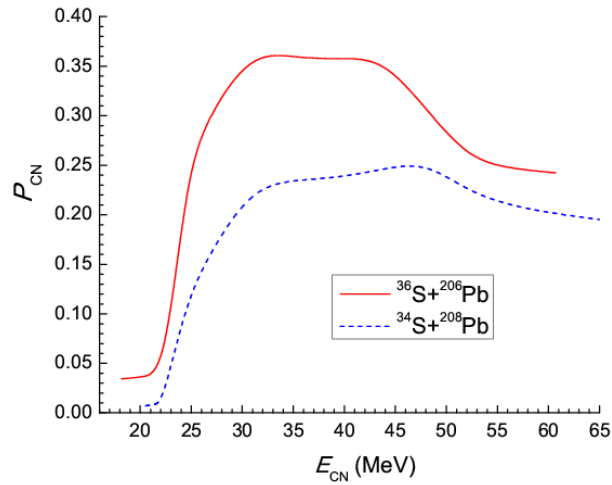
$$\sigma_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}) = \sigma_{qf}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}) + \sigma_{fus}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}) + \sigma_{ff}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}). \quad (16)$$

Турли хил уйғониш энергиялари учун парциал қўшилиш кесими, $\sigma_{cap}^{(\ell)}(E_{CN}^*, \{\beta_i\})$ қамраш кесим ва ҚЯС нинг қўшилиш эҳтимолиги P_{CN} кўпайтмаси билан куйидагича аниқланади:

$$\sigma_{fus}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}) = P_{CN}(E_{c.m.}, \ell, \{\beta_i\}) \sigma_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}), \quad (17)$$

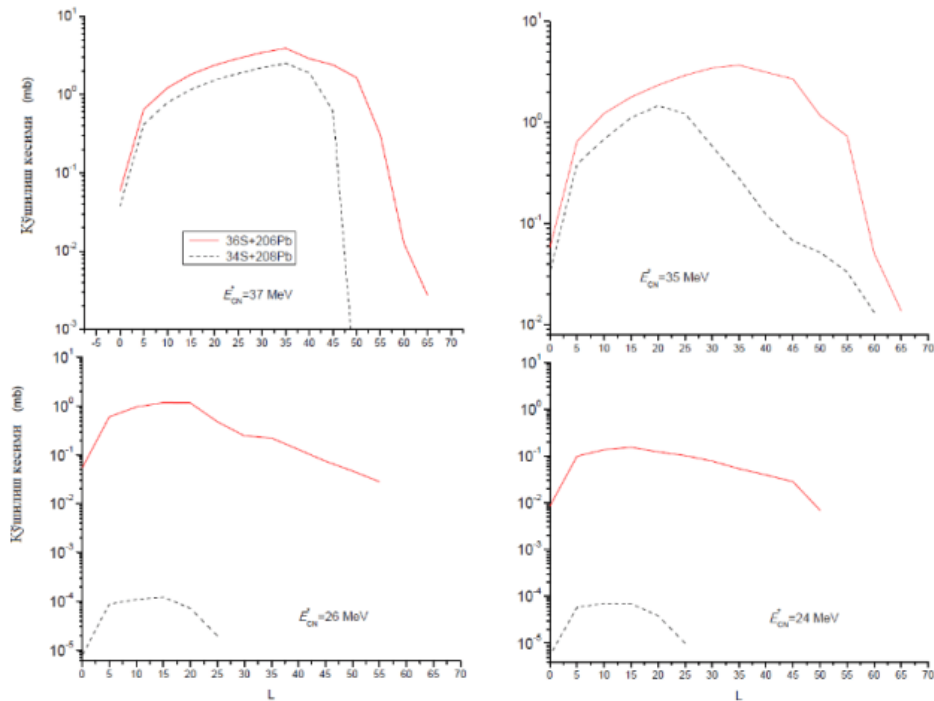
$P_{CN}(E_{c.m.}, \ell, \{\beta_i\})$ қўшилиш эҳтимолиги, ҚЯС нинг Z_{sym} заряд симметрик конфигурациясидан Z_{max} ҳаракатланув потенциалнинг максимал қийматига мос келадиган конфигурацияга қадар тўлиқ қўшилиш эҳтимоликларининг йиғиндиси сифатида ҳисобланади:

$$P_{CN}(E_{c.m.}, \ell, \{\beta_i\}) = \sum_{Z_{sym}}^{Z_{max}} P_Z(E_Z^*, \ell) P_{CN}^{(Z)}(E_Z^*, \ell, \{\beta_i\}). \quad (18)$$



7-расм. $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ (қизил чизик) ва $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ (кўк узук чизик) реакциялари учун ҳисобланган қўшилиш эҳтимоллиги P_{CN}

$^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ ва $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ реакциялари учун ҳисобланган қўшилиш эҳтимолликларини P_{CN} натижалари 7-расмда келтирилган. $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ реакциясининг тўлиқ қўшилиш эҳтимоллиги $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ реакциясидагидан катта эканлиги кўриниб турибди.



8-расм. Таркибий ядронинг турли хил уйғониш энергияларида $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ (қизил) ва $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ (қора) реакциялар учун ҳисобланган бурчак моментига боғлиқ равишда ҳисобланган қўшилишнинг парциал кесимлари

8-расмда турли хил уйғониш энергияси учун ҳисобланган қўшилишнинг парциал кесим натижалари акс эттирилган. Кўриниб турибдики, тўқнашув энергиясининг пасайиши натижасида $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ реакциянинг $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ реакцияга нисбатан қўшилиш эҳтимоллиги камроқ бўлади. Шунингдек, қўшилиш жараёнлари $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ реакцияси учун бурчак моментининг барча қийматларидан содир бўлади. $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ реакцияси учун $E_{CN}^* = 24,26 \text{ MeV}$ энергетик ораликда, Кулон тўсиғининг $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ реакцияга нисбатан юқори қиймати туфайли чуқур ноэластик тўқнашув ва квазибўлиниш ҳиссаси ортиб бормоқда.

Тўла қўшилиш кесими барча парциал тўлқинлар қўшимчаларини ҳиссаларини жамлаш йўли билан ҳисобланади (бурчак моменти бўйича):

$$\sigma_{fus}(E_{c.m.}) = \sum_{\ell=0}^{\ell=\ell_f} (2\ell + 1) \cdot \sigma_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}) \cdot P_{CN}^{(\ell)}(E_{c.m.}). \quad (19)$$

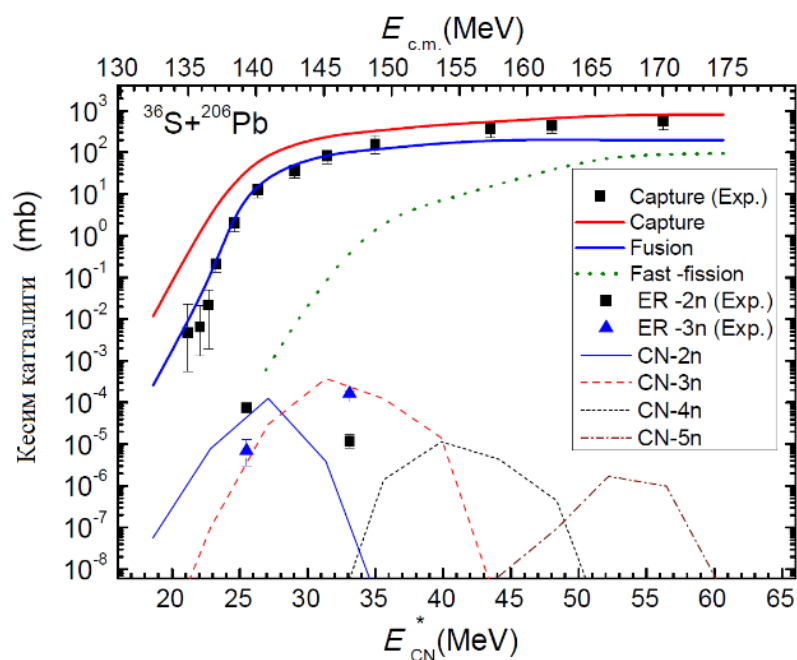
$\ell > \ell_f$ ораликдаги парциал қўшилиш кесими тез бўлинишнинг парциал кесими сифатида қаралади. Тез бўлиниш кесими, моноядро ҳосил бўлишига олиб келувчи, $\ell_f \leq \ell \leq \ell_d$ ораликқа тўғри келадиган парциал тўлқинларнинг ҳиссаларини йиғиш орқали ҳисобланади,

$$\sigma_{ff}(E_{c.m.}) = \sum_{\ell=\ell_f}^{\ell=\ell_d} (2\ell + 1) \cdot \sigma_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}) \cdot P_{CN}^{(\ell)}(E_{c.m.}). \quad (20)$$

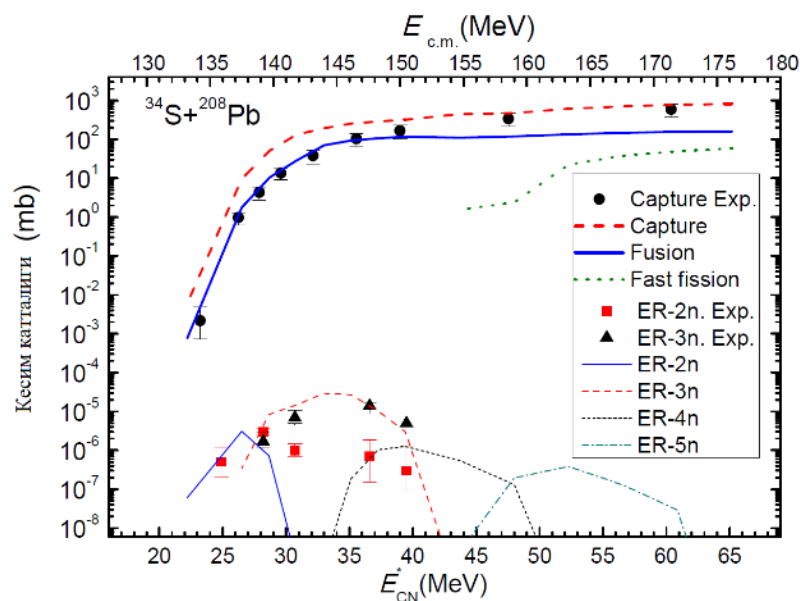
ҚЯС модели доирасидаги камраш кесими квазибўлиниш, бўлиниш ва тез бўлиниш кесимларининг йиғиндисига тенг (16). Маълумки, қўшилиш кесими буғланиш қолдиғи ва қўшилиш-бўлиниш кесимларини ўз ичига олади. Шубҳасиз, квазибўлиниш кесими қуйидагича аниқланади:

$$\sigma_{qf}(E_{c.m.}) = \sum_{\ell=0}^{\ell=\ell_d} (2\ell + 1) \cdot \sigma_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}) \cdot [1 - P_{CN}^{(\ell)}(E_{c.m.})]. \quad (21)$$

ҚЯС доирасида ТЯ нинг уйғонган энергияси E_{CN}^* ва бурчак моменти ℓ нинг берилган қийматларида қўшилиш парциал кесим натижаларидан фойдаланиб, ривожланган статистик модел бўйича буғланиш қолдиғи (БҚ) кесимлари ҳисобланди. $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ ва $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ реакциялар учун камраш, тўлиқ қўшилиш ва БҚ кесимларининг назарий қийматлари 9- ва 10- расмларда камраш ва БҚ кесимларининг экспериментал қийматлари билан таққосланди. Ушбу натижалардан кўриниб турибдики, 3n-буғланиш канали учун олинган назарий натижалар экспериментал қийматлар билан яхши мос келади [J. Khuuagbaatar, *et.al.*, Phys. Rev. C 86, 064602 (2012)], 2n -буғланиш канали учун олинган назарий натижалар эса, $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ ва $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ реакциялар учун $E_{CN}^* = 30 \text{ MeV}$ ва 28 MeV энергиягача бўлган қийматлар билан яхши мос келади.



9-расм. $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ реакцияси учун назарий ҳисобланган қамраш, тўлик қўшилиш ва БҚ (2n, 3n, 4n, 5n каналлар учун) кесим қийматларини экспериментал олинган қамраш ва БҚ кесим натижалари билан таққослаш



10-расм. $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ реакция учун 9-расмда келтирилгандек натижалар

Диссертациянинг "Реакция маҳсулотларини бурчак тақсимоти" деб номланган тўртинчи бобида, биринчи ва иккинчи бобларда олинган маълумотлар ёрдамида $^{78}\text{Kr}(10 \text{ MeV/A}) + ^{40}\text{Ca}$ реакцияси натижасида ҳосил бўлувчи маҳсулотларнинг бурчак тақсимоти натижалари келтирилган. Биринчи маротаба, бундай назарий ҳисоб-китобнинг янги усули ишлаб чиқилиб, энергиянинг камайиш реакцияларида, олд ярим шарда снарядга ўхшаш маҳсулотларнинг кузатилиши тушунтирилди. Квазибўлиниш

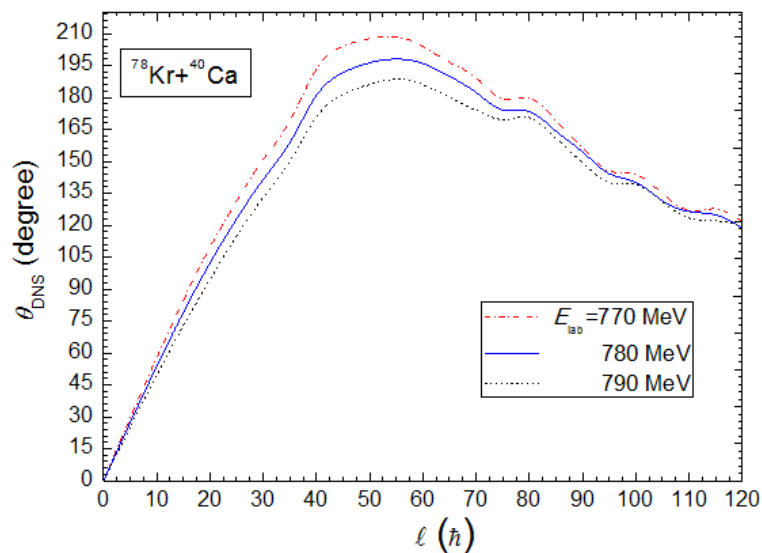
маҳсулотларининг бурчак тақсимотини топиш учун, системанинг парчаланишида айланиш бурчаги θ_{DNS} қуйидагича баҳоланади:

$$\theta_{DNS} = \theta_{in} + \Omega_{DNS} \cdot \tau_{DNS}, \quad (22)$$

бу ерда θ_{in} реакциянинг кириш канали учун (3) тенгламаларнинг динамик ҳисоб-китоблари билан аниқланади. θ_{in} нинг қиймати, берилган $E_{c.m.}$ да тўқнашаётган ядроларнинг бурчак моментига ва йўналиш ўқиға нисбатан ядроларнинг α_1 ва α_2 бурчакларига боғлиқдир. $Z = Z_1$ ва $Z_2 = Z_{CN} - Z$ бўлган ҚЯС конфигурациясининг яшаш вақти τ_{DNS} бўлиб, квазибўлиниш тўсиғи B_{qf} нинг қиймати ва уйғониш энергиясининг берилган қийматлари учун E_Z^* қуйидагича аниқланади:

$$\tau_{DNS} = \frac{\hbar}{\Lambda_Z^{qf}}. \quad (23)$$

11-расмда $^{78}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ реакциясида ҳосил бўлган ҚЯСнинг бурилиш бурчаги натижаларини дастлабки энергиянинг бир нечта қийматлари учун орбитал момент функцияси сифатида келтирилган. Натижалардан кўриниб турибдики, орбитал моментининг ўртача ($40\hbar$ - $70\hbar$) қийматларида ҚЯСнинг бурилиш бурчаги катта ва айланиш бурчагининг максимал қиймати 180° га яқин. Бу шуни англатадики, ҚЯСнинг яшаш муддати ва бурчак тезлиги снарядга ўхшаш бўлакни нишон бўлаги олдиға ўтишиға имкон беради.



11-расм. Дастлабки энергиянинг бир нечта қийматлари учун орбитал момент функцияси сифатида $^{78}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ реакциясида ҚЯСнинг бурилиш бурчаги

$^{78}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ реакцияси учун квазибўлиниш маҳсулотларининг бурчак ва масса тақсимотлари учун олиб борилган назарий тадқиқотларга асосан, ядро системаси орбитал моментнинг $40\hbar$ - $60\hbar$ қийматларида 180° гача бурилиши

мумкинлиги кўрсатилган (11-расмда кўриш мумкин). Натижада, снарядга ўхшаш маҳсулотлар олд ярим шарда 2,4-2,7 см/нс тезликда кузатилиши мумкин, бу эса [W.U.Schröder *et.al.*, Pramana Jour. Phys., 85, (2015)] да келтирилган экспериментал кузатувларга мос келади.

ХУЛОСА

"Кулон тўсиғига яқин бўлган энергияларда оғир ионлар ўртасидаги ўзаро таъсир динамикаси" мавзусидаги физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертация ишининг натижалари асосида қуйидаги хулосалар келтирилади:

1. Келтирилган снаряд ядросининг нишон-ядроси билан қамралиши уларнинг тўлиқ қўшилиши учун зарур шарт эканлиги кўрсатилди. Қамраш эҳтимоллиги Кулон потенциали ва ядровий потенциал йиғиндисидан ҳосил бўлган потенциалнинг қудуқ ҳажмига боғлиқ. Потенциал қудуқнинг чуқурлиги, орбитал бурчак моментининг ортиб бориши билан камайиб бориши аниқ кўриниб турибди. Нишон ва снаряд бўлакларида иккита қўшимча нейтронларнинг мавжудлиги, $^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ реакциясида ўзаро таъсир потенциалини чуқурроқ ва пастроқ бўлишига олиб келади. Шунинг учун, ушбу реакцияда қамраш кесимининг қиймати $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ реакциясидан каттароқдир, яъни таркибий ядрога ўтиши керак бўлган ҚЯС $^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ реакциясида кўпроқ ҳосил бўлади. Бу ўз навбатида, реакциянинг тўлиқ қўшилиш эҳтимоллигини оширади.
2. ҚЯС эволюцияси натижасидаги тўлиқ қўшилиш эҳтимоллиги, ҳаракат потенциалнинг тузилиши билан белгиланадиган B_{fus}^* ички қўшилиш тўсиғига боғлиқ. Оғир системалар учун юқори қўшилиш тўсиғи пайдо бўлади, бу эса қўшилиш эҳтимоллигини пасайтиради. Қамрашдан сўнг ҳосил бўлган ҚЯС ядролари ўртасида нуклонлар алмашинуви давомида, қўшилиш траекториясида пайдо бўладиган B_{fus}^* ички қўшилиш тўсиғининг $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ реакцияси учун ҳисобланган қиймати $^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ реакцияси учун олинган қийматдан каттадир. Бу, ушбу иккита реакция учун ҳисобланган ПЭЮдан олинувчи, ҳаракат потенциали ва ландшафт шаклини таққослашда кўринади. Бу фарқ кўриб чиқилган реакцияларда қамраш жараёнида ҳосил бўлган ҚЯСнинг енгил қисмларидаги N/Z -нисбатлари ўртасидаги фарқ туфайли юзага келади.
3. $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ ва $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ реакциялари учун, 2n ва 3n каналларида ҳосил бўлган буғланиш қолдиғининг экспериментда олинган қийматлари орасидаги фарқ, ушбу реакцияларнинг кириш каналининг хусусиятларига боғлиқ бўлган иккита сабаб билан изоҳланди. Биринчи сабаб - бу реакциялар учун ҳисобланган ядро-ядро ўзаро таъсирининг потенциал қудуқларининг ўлчамлари ва жойлашувидаги фарқ. Иккинчи сабаб - қамрашдан сўнг ҳосил бўлган ҚЯС ядролари ўртасида нуклон алмашуви натижасида қўшилиш траекториясида пайдо бўладиган B_{fus}^* ички қўшилиш тўсиғининг баландликларидаги фарқдир. Шунингдек, ^{34}S ядро қатнашган

реакцияда тўлиқ қўшилишда катта тўсиқнинг пайдо бўлишини снарядга ўхшаш ядро маҳсулотларининг чиқиш тақсимотини таҳлил қилишда кузатиш мумкин. Снарядга ўхшаш маҳсулотларнинг чиқиш тақсимотининг интенсив бўлишлиги, ядроларнинг қўшилиш жараёнини камайтиради. Ушбу сабаблар туфайли, нейтронга бой ^{36}S изотопидан фойдаланиш, $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ реакция билан таққослаганда, $^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ реакция учун катта буғланиш қолдиқ кесимини оширишга олиб келади.

4. $^{78}\text{Kr}(10 \text{ A/MeV}) + ^{40}\text{Ca}$ реакциясида кузатилган чиқиш маҳсулотлари квазибўлиниш ва қўшилиш-бўлиниш жараёнларидан ҳосил бўлганлиги аниқланди. Натижалардан кўриниб турибдики, квазибўлиниш жараёнининг заряд ва масса тақсимооти орбитал моментга боғлиқдир. $L < 60\hbar$ билан тўқнашувлар учун бу ишда олинган назарий натижалар, тажриба натижаларига яқин бўлиб, заряд ва масса тақсимоотларининг ўртача қийматлари енгил маҳсулот учун ($Z_L = 18$, $A_L = 38$) атрофида ва оғир ядролар учун эса ($Z_H = 38$, $A_H = 78$) атрофида зич жойлашган. $60\hbar < L < 80\hbar$ ораликдаги тўқнашувларда, заряд ва масса тақсимоотлари ядроларнинг носимметрик массалар чиқиш жойигача қадар чўзилади.
5. Бундан ташқари, ядро системасининг айланиш бурчагини ўлчаш, ҚЯСнинг яшаш вақтини белгилашга имкон беради. $^{78}\text{Kr}(10 \text{ A/MeV}) + ^{40}\text{Ca}$ реакцияси учун, квазибўлиниш бўлакларининг бурчак тақсимоотлари бўйича назарий тадқиқотлар, бу ядро системасининг бурилиш бурчаги орбитал моментнинг $L = (40-60) \hbar$ қийматида 180° га етиши мумкинлигини кўрсатади. Натижада, снарядга ўхшаш маҳсулотлар экспериментал кузатувларга мос равишда 2.4-2.7 см/нс тезликда олдинга ярим шарда кузатилиши мумкин.

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

INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS

KAYUMOV BAKHODIR MAKSUDJANOVICH

**DYNAMICS OF INTERACTION IN HEAVY IONS COLLISIONS AT THE
ENERGY NEAR TO COULOMB BARRIER**

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 – 2021

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.B2018.2.PhD/FM252.

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, English, Russian (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.inp.uz and on the website of "Ziyonet" Information and Educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific supervisor:

Nasirov Avazbek Karimovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Researcher

Official opponents:

Artemov Sergey Viktorovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor

Olimov Khusniddin Kosimovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor

Leading organization:

National University of Uzbekistan

The defense of the dissertation will be held on "____" _____ 2021, at ____ at the meeting of the Scientific Council No.DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-41; fax (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through at 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 "____" _____ 2021.
(Registry record No. ____ dated "____" _____ 2021.)

M.Yu. Tashmetov

Chairman of the Scientific Council on award
of Scientific degrees, D.Ph-M.S., Professor

O.R.Tojiboev

Scientific secretary of the Scientific Council on award
of Scientific degrees, PhD ph.-m.s.

I. Nuritdinov

Chairman of the Scientific seminar of the Scientific Council
on award of Scientific Degrees, D.Ph-M.S., Professor

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

Topicality and relevance of the theme of the dissertation. At present, the world successes in appearance of the precise modern experimental facilities stimulate theoretical studies of nuclear structure and its role in reaction mechanism at heavy ion collision reactions. The study of reaction mechanisms based on the experimental data shows a decisive role of the entrance channel (initial stage) in the yield of products at energies of the around and above Coulomb barrier. The effect of entrance channel can be studied by analysis of products of reactions with different mass asymmetries of projectile-target pair, leading to the same compound nucleus. The study of the dynamics and mass (charge) distribution in collisions is one of the urgent tasks of modern experimenters and theorists.

To date, research centers around the world with heavy ion accelerators are conducting research to produce new isotopes of transuranic and superheavy elements. A significant difficulty in producing the heaviest elements in fusion evaporation reactions is exceedingly small cross sections, which can be attributed to the hindrance at the complete fusion of colliding nuclei and/or to instability of the being formed compound nucleus against fission. In addition, there is ambiguity in the estimate of the cross section for pure complete fusion, from the measured data, since the contribution of the products of the competing reaction channel, as quasifission is included in the fusion-fission cross section. The high accuracy of measurements of the ER cross section stimulates studies of the peculiarities of the reaction mechanism in experiments producing transuranic elements. However, one of the most interesting results of recent experiments in heavy ion physics is the discovery of a new type of reaction.

During the years of independence of our country, the science has been developed by providing theoretical and experimental investigations on nuclei fission and events to solve fundamental problems in the world, and defined results have been reached. Increasing the efficiency of nuclear technology area through the application of innovative technologies of theoretical and applied investigations in the area of nuclear reactions with heavy nuclei has significant meaning in the Strategy of Actions on Further Development of Uzbekistan.

This research corresponds to the tasks stipulated in governmental regulatory documents and Decree of the President of the Republic of Uzbekistan No.PD-4512 “On works of further development of alternative energy sources” of 1 March 2013, Decree No.PD-4958 “On further improvement of the post-university education system” of 16 February 2017, Resolution No.PR-2789 “On measures of further improvement of the activities of the Academy of Sciences, organization, management and financing of scientific research works” of 17 February 2017 and Decree No.PD-4947 “On the Strategy of Actions on Further Development of the Republic of Uzbekistan for 2017-2021” of 7 February 2017.

Relevance of the research to the priority areas of science and technology development of the Republic of Uzbekistan. The dissertation research was carried out in accordance with the priority areas of science and technology development of the Republic of Uzbekistan: II. “Power, energy and resource saving”.

Degree of study of the problem. Nowadays, many scientific groups in the world, such as Russian scientists (G.G. Adamian, N.V. Antonenko, R. V. Jolos, E. M. Kozulin), German scientists (J. Khuyagbaatar, S. Hofmann, W. Scheid), Italian scientists (G. Fazio, G. Giardina, G. Mandaglio), Korean scientists (K. Kim, Y. Kim, Yongseok O.), Chinese scientists (F. Zhang, P. Wen, L. Zhu), US scientists (E. Henry, W. U. Schröder), Indian scientists (M. Thakur, A. Shamlath) and others, make theoretical and experimental investigations to study the dynamics of collisions between heavy ions. However, such Uzbek scientists as V.P. Pikul, Yu.N. Koblik, A.K. Nasirov, R. B. Tashkhodjaev and others have many works on researching of properties of heavy ion, fission products, yield, kinetic energy and angular distribution of the reaction.

As a result of these studies, to obtain more accurate theoretical calculations in reactions between heavy ions, the dinuclear system (DNS) model have been developed by scientists from the Joint Institute for Nuclear Research (Russia) and the Institute of Nuclear Physics (Uzbekistan). One of the advantages of dinuclear system model as compared with other models is that, it allows take into account the effect of the nuclear shell structure in theoretical studies of processes in collisions of heavy ions. There is a phenomenological model developed by Chinese theorists for calculating the fusion of massive nuclei, where the parameters are found by fitting the theoretical fusion cross sections to known experimental data.

Unfortunately, these methods are less informative for understanding the physics of nuclear fusion mechanisms. In addition, the contribution of the entrance channel to the reaction mechanisms and multi-nucleon transfer during the formation of a compound nucleus has not been studied until now.

Connection of the theme of dissertation with the scientific researches of the higher educational institution, where the dissertation was conducted. The dissertation was carried out within the framework of the scientific projects of the Institute of Nuclear Physics: FA-F2-F055 “A study of the reaction yield with heavy ions and nuclear fission” (2007-2011), FA-F2-F115 “Investigation of reaction mechanisms of multinucleon transmissions and fusion-fission of nuclei” (2012-2016), OT-F2-14 “Investigation of collective and microscopic properties of strongly interacting many-particle quantum systems” (2017-2020).

The aim of the research is devoted to the estimation of contribution of various reaction mechanisms to the observed yield of reaction products at different initial values of energy and orbital angular momentum.

The tasks of the research:

calculation of total interaction potential of dinuclear system for different initial condition of angular momentum and orientation angles of colliding nuclei;

solving the equation of motion and obtaining an equation for estimating the contribution of subbarrier capture processes with different initial conditions for reactions $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ and $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$;

calculating mass and charge distribution of reaction products for non-equilibrium initial stage of the dinuclear system evolution for $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ and $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ reactions;

computing the fusion, quasifission, fast fission and evaporation residue cross sections in evolution of dinuclear system for the reactions $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ and $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$;

estimation of the contribution of the products of quasifission, fast fission, and fusion-fission to the mass distribution for the reaction $^{48}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb}$

studying the dependence of charge distribution (yield of products) on different values of angular momentum for the reaction $^{78}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$;

analysing results of the angular distribution of deep inelastic collision and quasifission products for $^{78}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ reaction.

estimating the life-time of dinuclear system for various initial values of energy and angular momentum;

The objects of the research are the reaction products in heavy ion collisions and their angular, mass and charge distributions.

The subjects of the research are total interaction potential between two nuclei, the formation of the dinuclear system at the capture of the projectile-nucleus by the target-nucleus; the evolution of dinuclear system as the dynamics of two interacting nuclei, its lifetime and yield of the reaction products at decay of dinuclear system.

The methods of research. The research methods are mathematical apparatus of phenomenological potential of strong interaction and macroscopic statistical mechanics, analytical and numerical methods for solving differential equations.

The scientific novelty of the research is as follows:

the subbarrier cross sections for the capture of the projectile nucleus with the target nucleus in the $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ and $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ reactions were calculated for various energies below the potential barrier;

the reasons for the strong difference in the values of the cross sections for evaporation residues in the reactions $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ and $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ for channels $2n$ and $3n$, which are associated with the difference in the interactions potentials and in the fusion barrier of these reactions, were revealed;

new approach is proposed based on the assumption that the dinuclear system decays after a 180° rotation which are explaining the results of observation of the projectile-like products in the forward hemisphere in the reaction ^{78}Kr (10 MeV/nuc.) + ^{40}Ca ;

it was shown that, quasifission products during the decay of the dinuclear system in the $^{48}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb}$ reaction, are similar in mass distribution to the fission products of a compound nucleus and responsible for an increase in the width of the mass distribution of fusion-fission products.

Practical results of research consist of the following:

for the first time, the mass and charge distributions were obtained for the nonequilibrium stage of the evolution of the dinuclear system formed during capture before complete fusion;

new calculation method has been developed for an alternative interpretation of experimental data with the emission of a projectile like products in the forward

hemisphere, as the yield of quasifission products formed during collisions with a large value of the orbital angular momentum.

The reliability of the research results is substantiated by the use of modern methods of nuclear and theoretical physics and highly effective numerical methods and algorithms; careful check of a consistence of the received theoretical results with experimental data and results of other authors; consistency of conclusions with the main provisions of the nuclear reactions at low energy.

Scientific and practical significance of the research results

The scientific significance of the research results lies in the elucidation of the mechanism of the fusion of massive nuclei in heavy ion collisions at different energies near the Coulomb barrier. The theoretical method improved in the dissertation makes it possible to assess the contribution of each reaction mechanism to the observed reaction products.

The practical significance of the research results lies in the fact that the results obtained make it possible to investigate the role of shell effects, the ratio of the neutron and proton numbers in the formation of reaction products in the production of transuranic elements. Also, it interprets the appearance of a projectile nucleus in the forward hemisphere outside the target nucleus after dissipation of a sufficient part of its kinetic energy.

Implementation of the research results. Based on the obtained scientific results on the study of the dynamics of interaction in heavy ions collisions at energy near the Coulomb barrier:

calculated subbarrier cross sections for the capture of an incident projectile nucleus with a target nucleus in the reactions $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ and $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$, for various values of energy below the potential barrier were used by international researchers (references in foreign scientific journals Nuclear Physics A 994, 121662, 2020; Physical Review C 101, 014616, 2020; Physical Review C 101, 064604, 2020; Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 47, 075106, 2020). The use of scientific results made it possible to calculate and evaluate the values of the subbarrier capture cross section for different reactions;

the obtained reasons for the strong difference in the values of the cross sections for evaporation residues in the reactions $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ and $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ are recognized by international researchers (references in foreign scientific journals Nuclear Physics A 994, 121662, 2020; Physical Review C 101, 014616, 2020; Physical Review C 101, 064604, 2020; Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 47, 075106, 2020) as a promising new theoretical approach to studying the evolution of the dinuclear system in reactions leading to the same compound nucleus. The use of scientific results made it possible to interpret the role of the entrance channel in the evolution of the dinuclear system;

the proposed method explaining the observation of projectile-like products in the front hemisphere in the reaction $^{78}\text{Kr} (10 \text{ MeV/nuc.}) + ^{40}\text{Ca}$, was used by foreign researchers (references in foreign scientific journals The European Physical Journal A 55, 29, 2019; Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 47, 045115, 2020; Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 47, 075106, 2020). The

use of scientific results made it possible to investigate the yield of products similar to a projectile and to estimate the lifetime of the dinuclear system;

results on the determination of quasifission products in the decay of the dinuclear system in the $^{48}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb}$ reaction were used by foreign scientists (references in international scientific journals Physical Review C 98, 034601, 2018; Physical Review C 98, 014606, 2018; Physical Letters B 803, 135297, 2020) when studying the mass distribution in the other reactions. The use of scientific results has made it possible to distinguish the products of different reaction mechanisms that compete during heavy ion collisions at low projectile energies.

Testing of the research results. The research results were reported and tested at 7 international and local scientific conferences.

Publication of the research results. On the theme of the dissertation, 12 scientific works were published, including 4 scientific papers in international scientific journals recommended by the Supreme Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publishing basic scientific results of PhD dissertations.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation is presented on 102 pages consisting of an introduction, four chapters, a conclusion and a bibliography.

THE MAIN CONTENT OF THE DISSERTATION

The introduction presents the topicality and relevance of the topic of dissertation, formulates the goal and objectives, identifies the tasks, subjects and methods of research, determines the correspondence of the research to the priority directions of development of science and technology in the Republic of Uzbekistan, gives the scientific novelty of the research, substantiates the reliability of the results obtained, discloses their theoretical and practical significance, provides brief information on the implementation of the results and approbation of the work, as well as on the structure of the dissertation.

The first chapter “**Dynamics of initial stages of heavy ion collisions**” of the dissertation consists the calculations of nucleus-nucleus interaction potential, reduced mass and friction coefficient to describe the relative motion of colliding nuclei. Taking into account that, the friction forces are related with nucleon exchange between nuclei and their particle-hole excitations, the friction coefficient is calculated microscopically. The equations of the relative motion was derived for studying the dynamics of colliding nuclei. By using these, the trajectories for capture and deep inelastic collision at various initial energies and angular orbital momentums were calculated, for $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$, $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ and $^{78}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ reactions.

In the framework of the dinuclear system (DNS) model, the interaction potential calculated as follow:

$$V(R) = V_C(R) + V_N(R) + V_{rot}(R), \quad (1)$$

where $V_C(R)$, $V_N(R)$ and $V_{rot}(R)$ are the Coulomb, nuclear, and rotational potentials, respectively. The nuclear shape is important in the calculation of the Coulomb and nuclear interactions between colliding nuclei with orbital angular momentum at the internuclear distance R . The nuclear part of the nucleus-nucleus potential is calculated using the folding procedure between the effective nucleon-nucleon forces $f_{eff}[\rho(x)]$ suggested by Migdal and the nucleon density of the projectile and target nuclei, $\rho_1^{(0)}$ and $\rho_2^{(0)}$, respectively:

$$\begin{aligned} V_{nucl}(R) &= \int \rho_1^{(0)}(r - r_1) f_{eff}[\rho] \rho_2^{(0)}(r - r_2) d^3r, \\ f_{eff}[\rho] &= C_0 \left(f_{in} + (f_{ex} - f_{in}) \frac{\rho(0) - \rho(r)}{\rho(0)} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Here $C_0 = 300 \text{ MeV fm}^3$, $f_{in} = 0.09$, $f_{ex} = -2.59$ are the constants of the effective nucleon-nucleon interaction; $\rho = \rho_1^{(0)} + \rho_2^{(0)}$. The effective values of the constants f_{in} and f_{ex} were fixed from the description of the interaction of the Fermi system by the Grin function method and, therefore, the effect of the exchange term of the nucleon-nucleon interactions was taken into account.

The relative motion of colliding nuclei is calculated by the following equations:

$$\begin{aligned} \mu(R) \frac{d\dot{R}}{dt} + \gamma_R(R) \dot{R}(t) &= F(R), \\ F(R, \alpha_1, \alpha_2) &= - \frac{\partial V(R, \alpha_1, \alpha_2)}{\partial R} - \dot{R}^2 \frac{\partial \mu(R)}{\partial R}, \\ \frac{dL}{dt} &= \gamma_\theta(R) R(t) (\dot{\theta} R(t) - \dot{\theta}_1 R_{1eff} - \dot{\theta}_2 R_{2eff}), \\ L_0 &= J_R(R, \alpha_1, \alpha_2) \dot{\theta} + J_1 \dot{\theta}_1 + J_2 \dot{\theta}_2, \\ E_{rot} &= \frac{J_R(R, \alpha_1, \alpha_2) \dot{\theta}^2}{2} + \frac{J_1 \dot{\theta}_1^2}{2} + \frac{J_2 \dot{\theta}_2^2}{2}, \end{aligned} \quad (3)$$

The difference between capture and deep-inelastic collision is, does the full momentum transfer take place or does not. In both cases the DNS will be formed. Two conditions must be satisfied for capture: 1) the initial energy $E_{c.m.}$ of projectile in the center-of-mass system should be sufficiently large to overcome the interaction barrier (Coulomb barrier + rotational energy of the entrance channel), 2) some part of the relative kinetic energy has to be dissipated in order that DNS would be trapped in the well of the nucleus-nucleus interaction potential. If there is not a potential well the deep-inelastic collision takes place only.

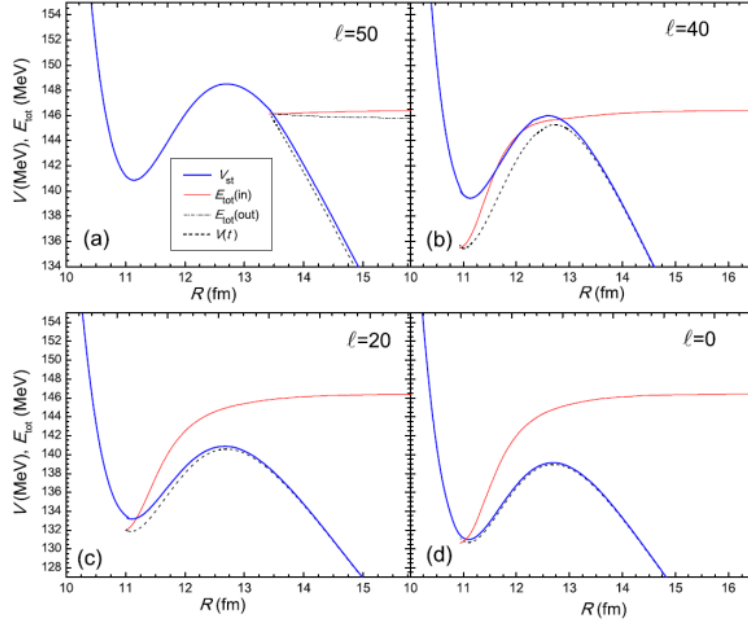


Fig. 1. Deep inelastic collision (a) and capture (b), (c), (d) trajectories at collision energy $E_{c.m.} = 146.41$ MeV for the $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ reaction

In the first case (see Fig. 1.(a)) the system is not trapped into potential well of nucleus-nucleus interaction and, therefore, the duration of deep-inelastic collisions is shorter than the one of capture reactions when the full momentum of relative motion is transferred into intrinsic degrees freedom and the system is trapped into potential well (Fig. 1. (b), (c), (d)). The total energy E_{tot} decreases due to dissipation by the radial friction coefficient and the dynamical interaction potential $V(t)$ presented by the dotted line while the nucleus-nucleus potential including the DNS rotational energy calculated with the undamped values of L is shown by the thick solid line. The rotational energy is increased by rising L and the system can not overcome potential well, therefore, starting from $L = 50\hbar$ we observe the deep inelastic collisions only.

Second chapter “**The charge and mass distributions of reaction products**”, is devoted to the description of possible channels during evolution of DNS after capture. Calculation of driving potential, mass and charge distribution are playing an important role in estimation of the complete fusion probability in competition with quasifission.

The neutron and proton exchanges between the interacting nuclei lead to the change in the mass distribution of the system. The characteristics of the mass distribution of the reaction products are defined by the potential energy surface (PES) of nuclear system, shell structure of protons and neutrons in nuclei and excitation energy of the DNS. PES calculated as a sum of the reaction energy balance (Q_{gg}) and the nucleus-nucleus potential ($V(R)$) between interacting nuclei:

$$U(Z, A, \ell, R, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2) = Q_{gg} + V(Z, A, R, \ell, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2), \quad (4)$$

where $Z = Z_1$ and $A = A_1$ are charge and mass numbers of a DNS fragment while the ones of another fragment are $Z_2 = Z_{tot} - Z_1$ and $A_2 = A_{tot} - A_1$, where Z_{tot} and A_{tot} are the total charge and mass numbers of a reaction, respectively; β_i are the fragment deformation parameters and α_i are the orientations relative to the beam direction; Q_{gg} is the reaction energy balance used to determine the excitation energy of CN: $Q_{gg} = B_1 + B_2 - B_{CN}$.

The driving potential $U_{dr}(Z, A, \ell, R_m, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2) \equiv U_{dr}(Z, A, \ell)$ is determined by the minimum values of the potential wells for each charge value Z . The position of the minimum value of interaction potential on the relative distance is denoted as R_m . The values of $U_{dr}(Z, A, \ell)$ as a function of angular momentum ℓ are found from the data of PES calculated by formula

$$U_{dr}(Z, A, \ell) = Q_{gg} + V(Z, A, \ell, R_m, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2). \quad (5)$$

The excitation energy of DNS formed in collision of heavy-ions with the energy $E_{c.m.}$ and its charge-asymmetry configuration $(Z, Z_{tot} - Z)$ is calculated by formula:

$$E_Z^* = E_{c.m.} - V(Z, R_m) + \Delta Q_{gg}(Z), \quad (6)$$

where $Z_{tot} = Z_1 + Z_2$; $E_{c.m.}$ is the collision energy in the center-of-mass system; $V(Z, R_m)$ is the minimum value of the nucleus-nucleus potential well, calculated at $R = R_m$; $\Delta Q_{gg}(Z)$ is the change of Q_{gg} -value by changing of the DNS charge asymmetry. For the first time the probability of the yield of the quasifission fragment with the mass and charge numbers, A and Z , respectively, after interaction time t_{int} of DNS is estimated by

$$Y_{A,Z}(E_Z^*(A), \ell, t_{int}) = \int_0^{t_{int}} P_{A,Z}(E_Z^*(A), \ell, t) \Lambda_{A,Z}^{qf} dt, \quad (7)$$

where $P_{A,Z}(E_{A,Z}^*, \ell, t)$ is the probability of population of the configuration (Z, A) of the DNS at the given values of the excitation energy $E_Z^*(A)$, angular momentum ℓ and interaction time t . Λ_Z^{qf} is the Kramer's rate for the decay probability of the DNS into two fragments with charge numbers Z and $Z_{CN} - Z$. The decay probability increases by decreasing the quasifission barrier B_{qf} , which is taken as equal to the depth of the potential well $V(Z, A, R, \ell)$; $P_Z(E_Z^*, \ell, t)$ is the probability of population of the configuration $(Z, Z_{tot} - Z)$ at E_Z^* and ℓ , and it is calculated by solving the transport master equation,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} P_K(E_K^*, \ell, t) = & \Delta_{K+1}^{(-)} P_{K+1}(E_{K+1}^*, \ell, t) + \Delta_{K-1}^{(+)} P_{K-1}(E_{K-1}^*, \ell, t) - \\ & \left(\Delta_K^{(-)} + \Delta_K^{(+)} + \Lambda_K^{qf} \right) P_K(E_K^*, \ell, t) \end{aligned} \quad (8)$$

The transition coefficients of multinucleon transfer are calculated as:

$$\begin{aligned} \Delta_K^{(\pm)}(A) = & \frac{4}{\Delta t} \sum_{i_P, j_T} |g_{i_P j_T}^{(K)}(A)|^2 \times n_{j_T, i_P}^{(K)}(A, t) (1 - n_{i_P, j_T}^{(K)}(A, t)) \\ & \times \frac{\sin^2[\Delta t (\tilde{\varepsilon}_{i_P}^{(K)}(A) - \tilde{\varepsilon}_{j_T}^{(K)}(A))/2\hbar]}{(\tilde{\varepsilon}_{i_P}^{(K)}(A) - \tilde{\varepsilon}_{j_T}^{(K)}(A))^2}, \end{aligned} \quad (9)$$

where the matrix elements $g_{i_P j_T}^{(K)}(A)$ describe one-nucleon exchange between the DNS nuclei “P” and “T” (for the proton exchange $K = Z$ and for the neutron exchange $K = N$) and their values are calculated microscopically. Due to dependence of the transition coefficients $\Delta_K^{(-)}$ and $\Delta_K^{(+)}$ on the mass and charge numbers of nuclei, the neutron and proton distributions P_Z and P_N are correlated since their master equations are solved parallel way but consequently with the time step Δt . It is clear that the proton and neutron transfers takes place simultaneously but with the different probabilities. The letters “P” and “T” are used to indicate the single-particle states of nucleons in projectile-like (light) and target-like (heavy) fragments, respectively, of DNS.

The contribution of the quasifission products to the yield of ^{78}Kr ($E/A = 10 \text{ MeV}$) + ^{40}Ca reactions products have been estimated by the numerical solution of Eq. (7).

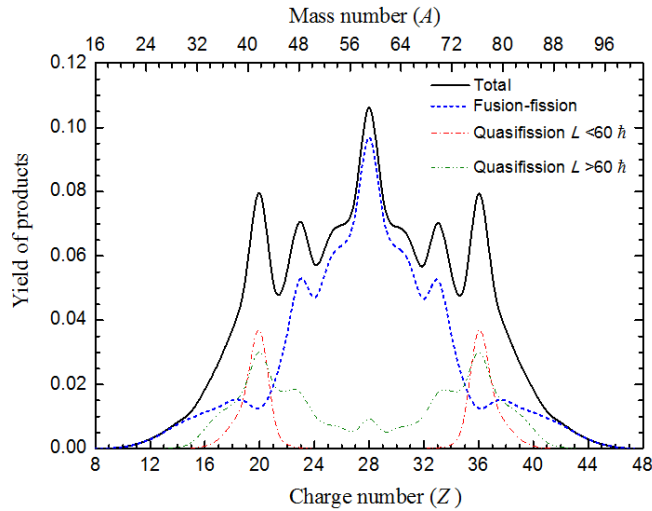


Fig. 2. The charge (mass) distribution of the quasifission (dot-dashed and dot-dot-dashed curves) and fusion-fission (dashed curve) products calculated for the $^{78}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ reaction at the beam energy of $E_{lab} = 10 \text{ MeV}/A$

It is clearly seen in Fig. 2 that in collisions with $L < 60\hbar$ the centroids of the charge and mass distributions of the quasifission products concentrate at around $Z_L = 18$ and $A_L = 38$ for the light product and around $Z_H = 38$ and $A_L = 78$ for the heavy product. The shape of the charge distribution is the manifestation of nuclear shell effects related with the closed shells with the neutron numbers $N = 20$ and 40 . The shell effects in the theoretical curves of the the charge distribution of primary products survive due to accumulation of the part of the collision energy in the rotational degrees of freedom (about 40 MeV) and direct dependence of the transition coefficients on the single-particle energies of nucleons in the DNS nuclei. The gaps between energy levels in light nuclei are larger than those in massive nuclei and this promotes the appearance of the shell effects. The shape of the charge and mass distributions of the quasifission process depends on the orbital angular momentum. In collisions with $60\hbar < L < 70\hbar$ the charge and mass distributions extend up to the mass symmetric region by overlapping with those of the fusion-fission products.

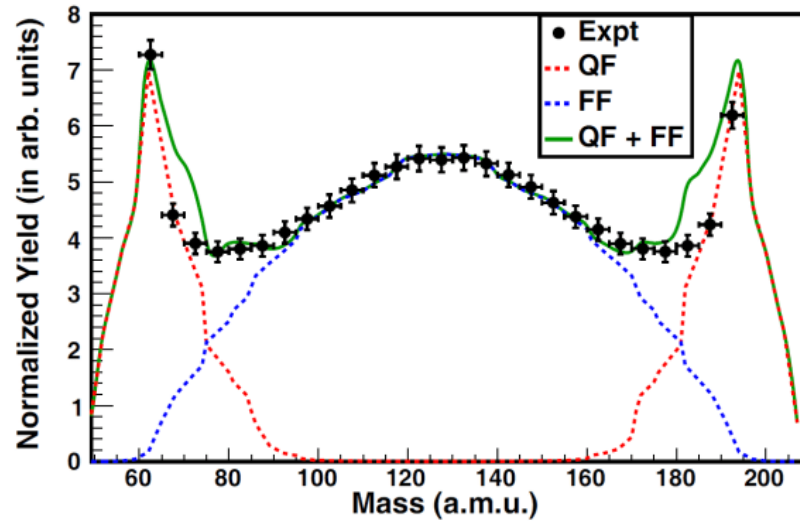


Fig. 3. The results of the theoretical estimations of the QF (red dashed curve) and FF (blue dashed curve) products for the ^{48}Ti ($E = 273.1$ MeV) + ^{208}Pb reaction

Figure 3 represents the comparison of the theoretical predicted mass yield with the experimental ones [Meenu Thakur, *et.al.*, EPJA 53:133 (2017)]. Theoretical yield of the reaction products shows that there is the overlap of the mass distributions of the quasifission and fusion-fission products near mass numbers 64. This peak is related to the formation of the isotopes of Fe and Ni with the neutron numbers $N = 38$ and 40 .

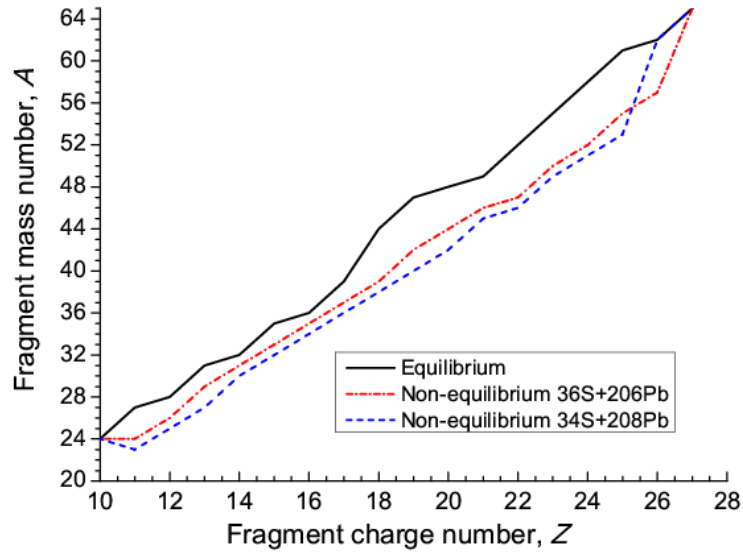


Fig. 4. The mass number in the projectile nucleus as a function of its proton number calculated for $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ (dot-dashed line) and $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ (dashed line) reactions for non-equilibrium initial stage of the DNS evolution. The equilibrium distribution of neutrons between fragments corresponds to the minimum values of the PES as a function of mass numbers one of the DNS fragments (solid line)

The difference between the mass and charge distributions at the given time of the DNS evolution depends on the initial N/Z - ratio in colliding nuclei since transition coefficients causing nucleon transfer are different for the isotopes with different neutron numbers of the nucleus with the same charge numbers. The N/Z -ratio has been found by solution of the transport master equations for the proton and neutron distributions between fragments of the DNS formed at capture with the different initial neutron numbers $N = 18$ and $N = 20$ for the reactions with the ^{34}S and ^{36}S , respectively.

From the results of calculation, the largest of the N/Z -ratio in the projectile-like fragments correspond to the $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ reaction at the initial non-equilibrium stage of the interaction of the DNS fragments. This is seen from the comparison of the shape of the driving potentials and landscape of PES, which are calculated for these two reactions. In the DNS with the neutron-rich projectile-like fragments formed in the $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ reaction the intrinsic fusion barrier is lower. The difference in the mass and charge evolutions for the $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ and $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ reactions leads to the difference in fusion probabilities in these reactions.

It is obvious from Fig. 4 that the projectile-like fragments of the DNS formed in the $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ reaction are more neutron rich in comparison with the ones of the $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ reaction. As a result the fusion probability is larger in the first reaction. Neutron numbers N corresponding to the given charge numbers presented in Fig. 4 are found from the analysis of the parallel solutions of the transport-master equations (8): the neutron number N corresponding to the maximum value of the neutron distribution function $P_N(A, t)$, ($K = N$) for the given Z is used in calculation of PES. The equilibrium distribution of neutrons between fragments corresponds to the

minimum values of the PES as a function of mass numbers one of the DNS fragments (solid line in Fig. 4). Result for non-equilibrium distribution has been obtained from the neutron distributions in the light fragment of DNS as a function of its charge number at interaction time $t_{int} = 6 \cdot 10^{-22}$ s after capture.

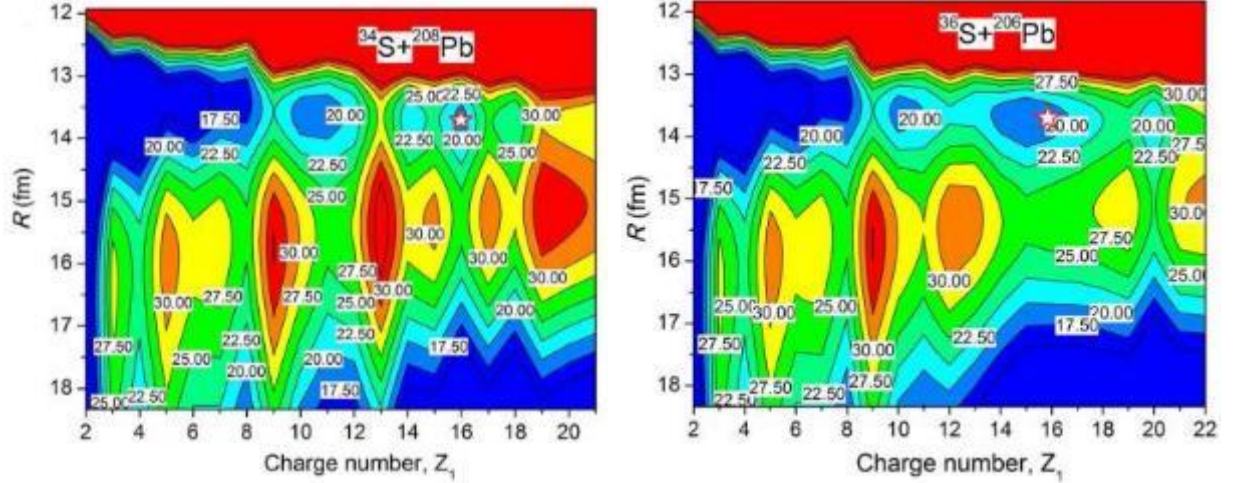


Fig. 5. Contour maps of the PES calculated for the $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ and $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ reaction with the non-equilibrium distribution of neutrons between the DNS fragments as a function of the radial distance between their mass centres and charge numbers. The star on the PES shows the initial charge numbers and internuclear distance

The results of the charge number Z and corresponding mass number A are used to calculate PES which allows us to calculate the fusion probability P_{CN} as a function of the mass and charge asymmetry of the DNS nuclei.

The increase of the hindrance to complete fusion in the $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ reaction in comparison with the $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ reaction is seen from the comparison of PES in Fig. 5 which are calculated as functions of the intercentre distance between nuclei and their charge-mass asymmetry. The difference between the two PES(s) in Fig. 5 appears due to the use of the different mass numbers obtained in the solution of the Eqs. (7) by the different initial neutron numbers. As it is seen from Fig. 7 the potential surface has higher bump corresponding to the intrinsic fusion barrier, B_{fus}^* , in the region $Z = 13$ and $R = 13.5$ fm. This bump appears as the hindrance in complete fusion in the case of the $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ reaction. This bump is significantly higher than the one on the potential energy surface presented for the $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ reaction.

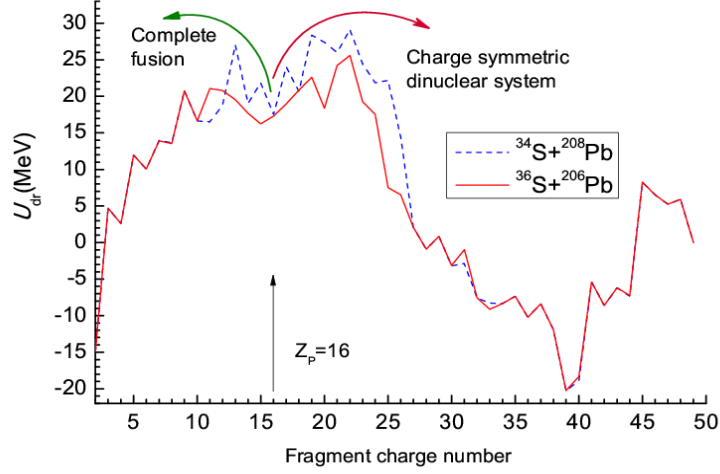


Fig. 6. Driving potential calculated for the compound nuclei ^{242}Cf as a function of the fragment charge number

It can be seen from Fig. 6 that, the driving potential (blue dashed line) calculated for the $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ reaction increases abruptly for the fragment with charge number $Z = 13$. The value of the driving potential corresponding to the entrance channel $Z = 16$ is lower than its maximum value at $Z = 13$ in the fusion direction $Z \rightarrow 0$. The intrinsic fusion barrier, $B_{fus}^*(Z, A, \ell)$ is determined as the difference between the maximum value of the driving potential between $Z = 0$ and $Z = Z_p$ and the initial charge value,

$$B_{fus}^*(Z, A, \ell) = U_{dr}(Z_{max}, A_{max}, \ell) - U_{dr}(Z_p, A_p, \ell). \quad (10)$$

The third chapter “**Cross sections of capture, complete fusion, quasifission and evaporation residue processes in heavy ion collisions**” represents method of calculations of cross sections for each channel, which are in competition during collisions. Obtained results was compared with experimental data obtained in GSI (Darmstadt, Germany) and JAEA (Tokai, Japan) for the $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ and $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ reactions.

Theoretical values of the capture cross sections are calculated with the quantities characterizing the entrance channel by formula

$$\sigma_{cap}(E_{c.m.}) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \sum_{\ell=0}^{\ell_d} (2\ell + 1) \mathcal{P}_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}), \quad (11)$$

where $\mathcal{P}_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.})$ is the capture probability of the projectile-nucleus by the target-nucleus in collision with energy $E_{c.m.}$ and orbital angular momentum $L = \hbar\ell$; $\lambda = \hbar/\sqrt{2\mu E_{c.m.}}$. All partial waves corresponding to the full momentum transfer events are included into the summation in Eq.(11).

The partial capture cross-section $\sigma_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\})$ is determined by calculation of the capture probability $\mathcal{P}_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\})$ of trapping the curve presenting the dependence of total kinetic energy on the time dependent internuclear distance into the potential well of the nucleus-nucleus interaction:

$$\sigma_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}) = \frac{\lambda^2}{4\pi} (2\ell + 1) \mathcal{P}_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}). \quad (12)$$

Here λ is the de Broglie wavelength of the entrance channel. The capture probability $\mathcal{P}_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\})$, which is calculated by classical equation of motion, is equal to 1 or 0 for given beam energy and orbital angular momentum. In dependence on the beam energy, $E_{c.m.}$, there is a ℓ -window ($\ell_m < \ell < \ell_d$) for capture as a function of orbital angular momentum:

$$\mathcal{P}_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}) = \begin{cases} 1, & \text{if } \ell_m < \ell < \ell_d \text{ and} \\ & E_{c.m.} > V_B, \\ 0, & \text{if } \ell < \ell_m \text{ or } \ell > \ell_d \text{ and} \\ & E_{c.m.} > V_B, \\ \mathcal{P}_{WKB}^{(\ell)}, & \text{for all } \ell \text{ if } E_{c.m.} \leq V_B, \end{cases} \quad (13)$$

where ℓ_m and ℓ_d are the minimum and maximum values of the orbital angular momentum ℓ leading to capture at the given collision energy; V_B is the barrier of the nucleus-nucleus potential in the entrance channel; $\mathcal{P}_{WKB}^{(\ell)}$ is probability of the barrier penetrability. It has been calculated by the formula which is derived from the WKB approximation:

$$\mathcal{P}_{WKB}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}) = \exp \left[-2 \int_{R_{in}}^{R_{out}} k(R, \ell, \{\beta_i\}) dR \right], \quad (14)$$

where

$$k(R, \ell, \{\beta_i\}) = \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2} (V(R, \ell, \{\beta_i\}) - E_{c.m.})}. \quad (15)$$

R_{in} and R_{out} are inner and outer turning points which were estimated by $V(R) = E_{c.m.}$.

The absence of capture at $\ell < \ell_m$ means that the total energy curve as a function of $E_{c.m.}$ is not trapped into potential well: dissipation of the initial kinetic energy is not enough to cause the total energy of DNS to be trapped due to the restricted value of the radial friction coefficient. The number of partial waves giving a contribution to the capture is calculated by the solution of Eq. (3) for the radial and orbital motions simultaneously.

During the lifetime of the excited DNS the composite system evolves by exchanging nucleons between the two nuclei constituting the DNS. For each event, during this stage of reaction, the DNS can reach the shape of a deformed

mononucleus or it can decay into two fragments (quasifission) before to reach the complete fusion stage. In the first case the nuclear system has to reach the statistical equilibrate shape of the CN, but the events which correspond to deformed mononucleus without barrier to provide stability ($B_f = 0$ for $\ell > \ell_f$, where the ℓ_f is characteristic of each CN with its structure of nucleons) cannot reach the shape of CN because the deformed complete fusion system immediately decays into two fragments (fast fission process). Therefore, the partial capture cross section is contributed by the following terms:

$$\sigma_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}) = \sigma_{qf}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}) + \sigma_{fus}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}) + \sigma_{ff}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}). \quad (16)$$

The partial fusion cross section is determined by the product of capture cross section $\sigma_{cap}^{(\ell)}(E_{CN}^*, \{\beta_i\})$ and the fusion probability P_{CN} of DNS for the various excitation energies by the use of formula:

$$\sigma_{fus}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}) = P_{CN}(E_{c.m.}, \ell, \{\beta_i\}) \sigma_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}, \{\beta_i\}), \quad (17)$$

The fusion probability $P_{CN}(E_{c.m.}, \ell, \{\beta_i\})$ is calculated as the sum of contributions to complete fusion from the charge symmetric configuration Z_{sym} of DNS up to configuration corresponding to the maximum value of the driving potential Z_{max} :

$$P_{CN}(E_{c.m.}, \ell, \{\beta_i\}) = \sum_{Z_{sym}}^{Z_{max}} P_Z(E_Z^*, \ell) P_{CN}^{(Z)}(E_Z^*, \ell, \{\beta_i\}), \quad (18)$$

where E_Z^* is calculated by formula (6) and the weight function $P_Z(E_Z^*, \ell)$ is the mass and charge distributions probability $P_Z(E_Z^*, \ell, t)$ in the DNS fragments is determined by solution of the transport master equation (8).

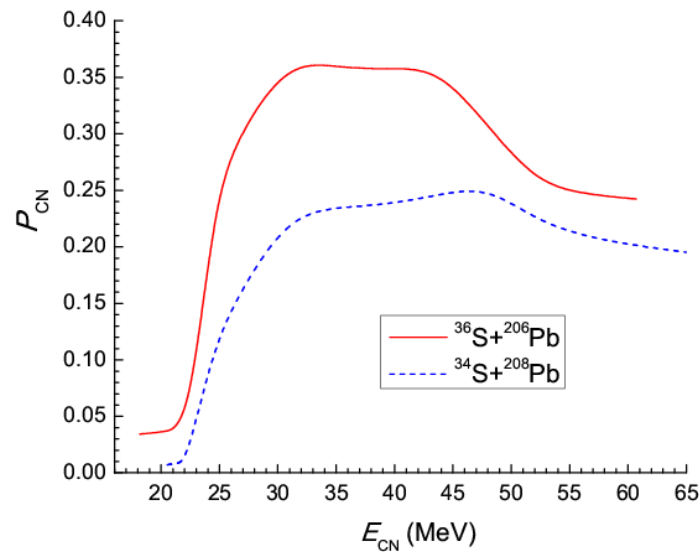


Fig. 7. Fusion probability P_{CN} calculated for the $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ (red solid line) and $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ (blue dashed line) reactions

Comparison of the fusion probabilities P_{CN} calculated for the $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ and $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ reactions is presented in Fig. 7. It is seen that the complete fusion probability of the $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ reaction is about one and half times larger than that of the $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ reaction.

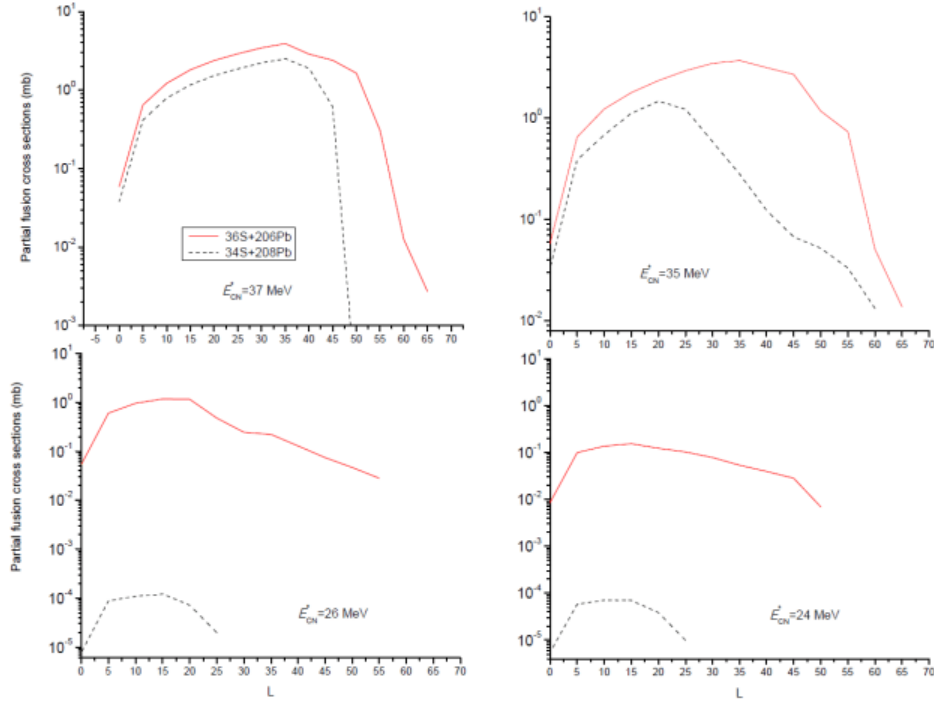


Fig. 8. Partial fusion cross sections calculated for $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ (red solid curves) and $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ reactions (black dashed curves) as a function of the angular momentum, for different CN excitation energy

Fig. 8 represents results for partial fusion cross section for different excitation energy. It can be seen, that, by decreasing energy of collision reaction $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ has less probability of fusion comparing to $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ reaction. Also fusion processes take places in all values of angular momentum for the $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ reaction. For the $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ reaction, in the energy region $E_{CN}^* = 24, 26 \text{ MeV}$, contribution of deep inelastic collision and quasifission are increasing due to higher value of the Coulomb barrier comparing to $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ reaction.

The fusion cross section is calculated by summarizing contributions of all partial waves (angular momentum):

$$\sigma_{fus}(E_{c.m.}) = \sum_{\ell=0}^{\ell=\ell_f} (2\ell + 1) \cdot \sigma_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}) \cdot P_{CN}^{(\ell)}(E_{c.m.}). \quad (19)$$

The partial fusion cross section with $\ell > \ell_f$ is considered as a partial fast fission cross section. We should stress that for the superheavy elements ℓ_f is not relevant quantity because there is no barrier connected with the liquid-drop model. The fast fission cross section is calculated by summing the contributions of the partial waves corresponding to the range $\ell_f \leq \ell \leq \ell_d$ leading to the formation of the mononucleus,

$$\sigma_{ff}(E_{c.m.}) = \sum_{\ell=\ell_f}^{\ell=\ell_d} (2\ell + 1) \cdot \sigma_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}) \cdot P_{CN}^{(\ell)}(E_{c.m.}). \quad (20)$$

The capture cross section in the framework of the DNS model is equal to the sum of the quasifission, fission, and fast fission cross sections, see Eq. (16). It is clear that the fusion cross section includes the cross sections of ERs and fusion fission products. Obviously, the quasifission cross section is defined by

$$\sigma_{qf}(E_{c.m.}) = \sum_{\ell=0}^{\ell=\ell_d} (2\ell + 1) \cdot \sigma_{cap}^{(\ell)}(E_{c.m.}) \cdot [1 - P_{CN}^{(\ell)}(E_{c.m.})]. \quad (21)$$

In the DNS framework the partial cross sections of the CN formation are used to calculate evaporation residue (ER) cross sections at given values of the CN excitation energy E_{CN}^* and angular momentum ℓ by the advanced statistical model. The theoretical values of capture, complete fusion and ER cross sections are compared with the experimental values of the capture and ER cross sections of the $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ and $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ reactions in Figs. 9 and 10, respectively. The partial fusion cross sections are used as the input data in calculations of the ER cross sections by the advanced statistical model. It is seen from these figures that the theoretical results for the 3n-evaporation channel are in good agreement with the experimental data [J. Khuyagbaatar, *et.al.*, Phys. Rev. C 86, 064602 (2012)] while the theoretical curve obtained for the 2n-evaporation channel is in good agreement with the data up to energies $E_{CN}^* = 30$ MeV and 28 MeV for the $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ and $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ reactions, respectively.

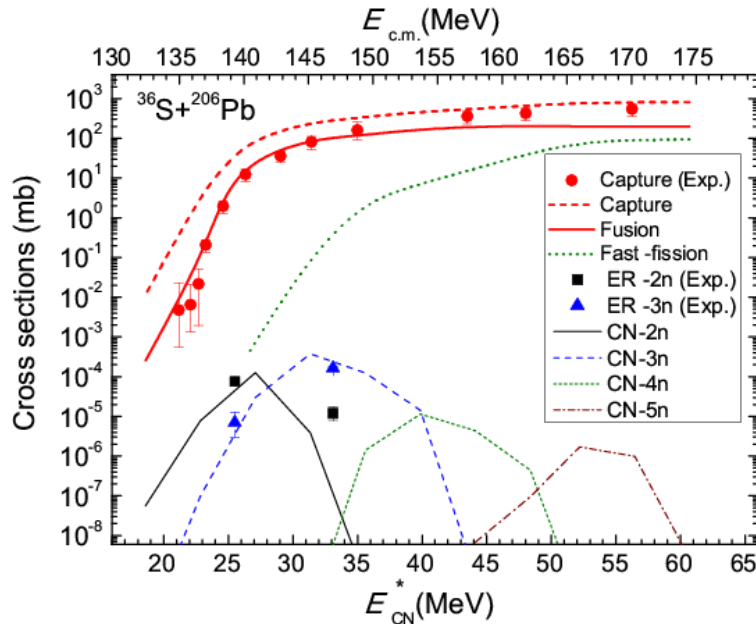


Fig. 9. The theoretical values of capture (red thick dashed curve), complete fusion (solid thick curve) and ER (thin solid-2n, thin dashed-3n, thin dotted-4n and thin dot-dashed-5n channels) cross sections are compared with the experimental values of the capture (red circles) and ER (black squares-2n and red triangles-3n channels) cross sections of the $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$

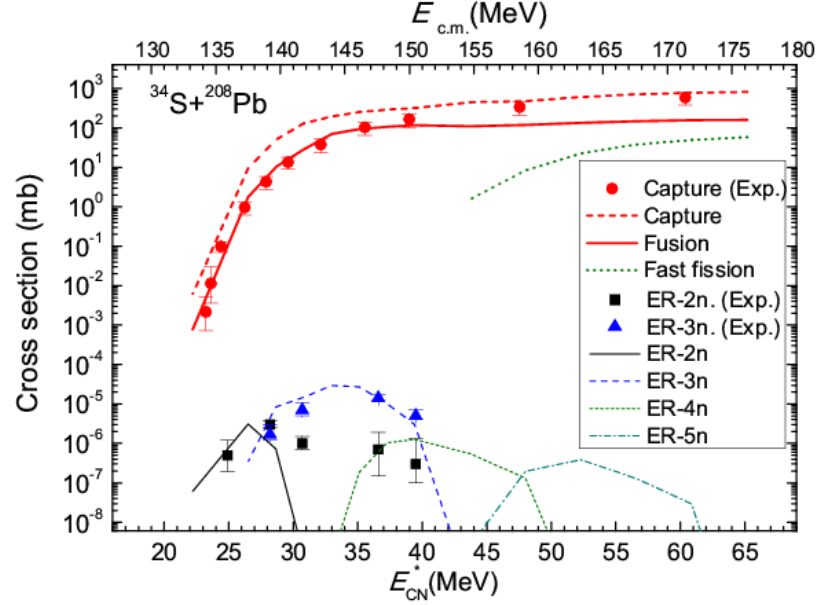


Fig. 10. The same as in Fig. 9 but for the $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ reaction

The fourth chapter “**Angular distribution of reaction products**” presents the results of calculation of angular distribution for $^{78}\text{Kr}(10 \text{ MeV/A}) + ^{40}\text{Ca}$ reaction by using output data of first and second chapters. The first time the new method of calculation has been developed to explain the observation of the projectile-like products in the forward hemisphere in the energy damped reaction. To find the angular distribution of the quasifission fragments, we estimate the rotational angle θ_{DNS} at the break-up of the system as

$$\theta_{\text{DNS}} = \theta_{in} + \Omega_{\text{DNS}} \cdot \tau_{\text{DNS}}, \quad (22)$$

where θ_{in} is determined by the dynamical calculations of Eqs. (3) for the entrance channel of the reaction, i.e., at the capture stage. The value of θ_{in} depends on the angular momentum and orientation angles α_1 and α_2 of the symmetric axis of the colliding nuclei at a given $E_{c.m.}$. The lifetime of the DNS configuration τ_{DNS} with $Z = Z_1$ and $Z_2 = Z_{CN} - Z$, where Z_{CN} is the charge number of the compound nucleus, is determined by the quasifission barrier B_{qf} and the excitation energy E_Z^* for given values of beam energy and angular momentum ℓ through

$$\tau_{\text{DNS}} = \frac{\hbar}{\Lambda_Z^{qf}}. \quad (23)$$

In Fig. 11 we present the results for the rotational angle of the DNS formed in the reaction of $^{78}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ as a function of orbital angular momentum for several values of the initial energy. It can be seen that, in the middle values ($40\hbar - 70\hbar$) of orbital angular momentum, the rotational angle of the DNS is larger and the maximum value of the rotational angle is close to 180° . This means that the lifetime

and rotational velocity of the DNS allow the projectile-like fragment to go beyond the target fragment.

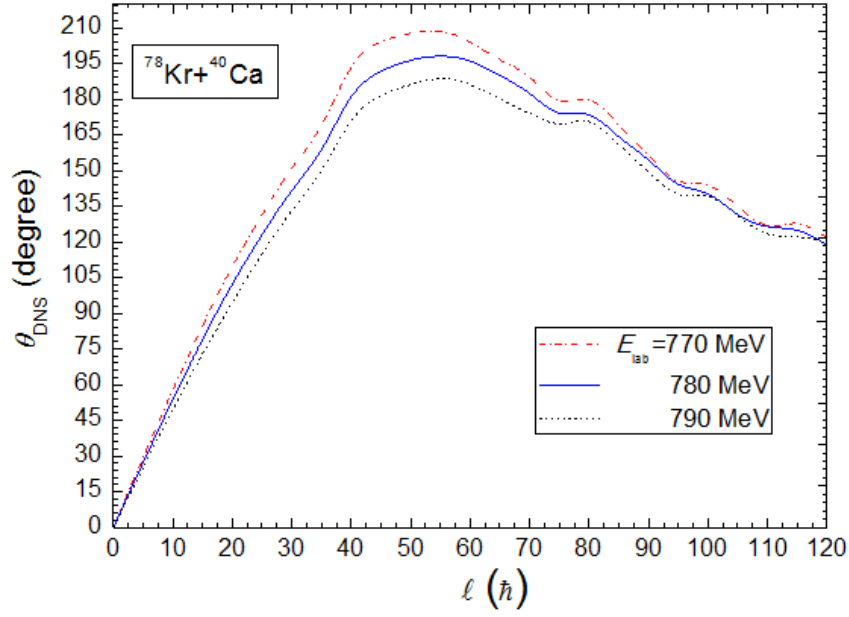


Fig. 11. The rotational angle of the DNS formed in the $^{78}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ reaction as a function of orbital angular momentum ℓ for a given E_{lab}

Performed theoretical study on the angular and mass distributions of quasifission fragments in the reaction of $^{78}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ indicates that the rotational angle of the dinuclear system can reach 180° at collisions with relative angular momentum of $L = (40-60)\hbar$ (can be seen in fig. 11). As a result, the projectile-like products can be observed in the forward hemisphere with a velocity in the range of 2.4–2.7 cm/ns, which is consistent with the experimental observations reported in Refs.[W.U.Schröder *et.al.*, *Pramana Jour. Phys.*, 85, (2015)].

CONCLUSION

The main results of the theoretical research, which was carried out on the theme of the PhD dissertation “Dynamics of interaction in heavy ions collisions at the energy near to coulomb barrier” has led to the following conclusions:

1. It was shown that, the capture of incoming projectile-nucleus by target-nucleus is necessary condition for their complete fusion. The probability of capture depends on the size of the potential well formed by the sum of the Coulomb potential and nuclear attraction. It is clearly seen that the size of the potential well decreases with increasing values of the orbital angular momentum of a collision. The presence of two extra neutrons in isotope ^{36}S and projectile-like fragments makes the potential well deeper and lower for the $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ reaction. Therefore, the capture cross section for this reaction is larger than the one of the $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ reaction, i.e. the larger number of DNS being to be transformed into compound nucleus is formed in the $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ reaction. This increases the probability of complete fusion.

2. By the evolution of the DNS, the probability of the complete fusion depends on the internal fusion barrier B_{fus}^* , which is determined by the structure of the driving potential. For heavy systems appears high fusion barrier, which reduces the probability of fusion. The difference in the heights of the intrinsic fusion barrier B_{fus}^* appearing on the fusion trajectory by nucleon transfer between nuclei of the DNS formed after capture. The value of B_{fus}^* calculated for the $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ reaction is higher than the one obtained for the $^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ reaction. This is seen from the comparison of the shape of the driving potentials and landscape of PES, which are calculated for these two reactions. This fact is caused by the difference between the N/Z -ratios in the light fragments of the DNS formed during the capture in these reactions.
3. It was reached that, the difference between observed cross sections of the evaporation residue of the $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ and $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ reactions formed in the 2n and 3n channels has been explained by two reasons related to the entrance channel characteristics of these reactions. The first reason is the difference in the sizes and position of the potential wells of the nucleus-nucleus interaction calculated for these reactions. The second reason is the difference in the heights of the intrinsic fusion barrier B_{fus}^* appearing on the fusion trajectory by nucleon transfer between nuclei of the DNS formed after capture. Also, a larger hindrance to complete fusion in the reaction with ^{34}S can be observed from the analysis of the yield of the projectile-like products. The intense yield of the projectile-like products decreases the number of events going to complete fusion which produces fusion-fission products and evaporation residues after emission neutrons and light charged particles. Due to these consequences, the use of the neutron rich isotope ^{36}S makes the ER cross section larger in the $^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ reaction at the de-excitation of compound nucleus in comparison with the ones of the $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ reaction.
4. It was obtained that, the observed yields of the binary products in ^{78}Kr (10 A/MeV) $+^{40}\text{Ca}$ reaction are related quasifission and fusion-fission processes. It can be seen from the results, that the shape of the charge and mass distributions of the quasifission process depends on the orbital angular momentum. In collisions with $L < 60\hbar$ the average values of the charge and mass distributions are rather concentrated near the projectile/target masses and charges at around ($Z_L = 18$, $A_L = 38$) for the lighter product and at around ($Z_H = 38$, $A_H = 78$) for the heavier product, which has a good agreement with the experimental results. In collisions with $60\hbar < L < 80\hbar$ the charge and mass distributions extend up to the mass symmetric region overlapping with those of the fusion-fission products.
5. Moreover, measuring the rotational angle of the dinuclear system in the experiment allow us to establish a life time of DNS. From theoretical study on the angular distributions of quasifission fragments in the reaction of ^{78}Kr (10 A/MeV) $+^{40}\text{Ca}$, which indicates that the rotational angle of the dinuclear system can reach 180° at collisions with relative angular momentum of $L = (40-60)\hbar$. As a result, the projectile-like products can be observed in the forward hemisphere

with a velocity in the range of 2.4–2.7cm/ns, which is consistent with the experimental observations.

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

КАЮМОВ БАХОДИР МАКСУДЖАНОВИЧ

**ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ТЯЖЕЛЫХ
ИОНОВ ПРИ ЭНЕРГИИ ОКОЛО КУЛОНОВСКОГО БАРЬЕРА**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Ташкент–2021

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2018.2.PhD/FM252.

Докторская диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

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

Научный руководитель:	Насиров Авазбек Каримович доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Официальные оппоненты:	Артемьев Сергей Викторович доктор физико-математических наук, Профессор Олимов Хусниддин Косимович доктор физико-математических наук, Профессор
Ведущая организация:	Национальный Университет Узбекистана

Защита диссертации состоится «___» _____ 2021 года в ____ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (Адрес: 100174, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ АН РУз. Тел.: (+99871) 289–31-41; факс: (+99871)289–36–65; e-mail: info@inp.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики(регистрационный номер _____) (Адрес: 100214, г. Ташкент, поселок Улугбек, ИЯФ АН РУз. Тел. (+99871) 289–31–19).

Аннотация диссертации разослана «___» _____ 2021 г.
(Протокол рассылки № _____ от _____ 2021 г.).

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

О.Р.Тожибоев
ученый секретарь научного совета
по присуждению ученых степеней, PhD ф.-м.н.

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Целью исследования является оценка вклада различных механизмов реакции в наблюдаемый выход продуктов реакции при различных начальных значениях энергии и орбитального момента.

Задачи исследования:

расчет полного потенциала взаимодействия двойной ядерной системы для различных начальных условий углового момента и углов ориентации сталкивающихся ядер;

решение уравнения движения и получение уравнения для оценки вклада процессов подбарьерного захвата с разными начальными условиями для реакций $^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ и $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$;

расчет массового и зарядового распределения продуктов реакций для неравновесной начальной стадии эволюции двойной ядерной системы в реакциях $^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ и $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$;

расчет сечений слияния, квазиделения, быстрого деления и остатка испарения в эволюции двойной ядерной системы для реакций $^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ и $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$;

оценка вклада продуктов квазиделения, быстрого деления и слияния-деления в массовое распределение для реакции $^{48}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$;

изучение зависимости распределения заряда (выхода продуктов) от различных значений углового момента для реакции $^{78}\text{Kr}+^{40}\text{Ca}$;

анализ результатов углового распределения продуктов глубоко неупругого столкновения и квазиделения для реакции $^{78}\text{Kr}+^{40}\text{Ca}$.

оценка времени жизни двойной ядерной системы при различных начальных значениях энергии и углового момента.

Объектом исследования являются продукты реакции при столкновении тяжелых ионов, их угловое, массовое и зарядовое распределение.

Предметом исследования являются потенциал взаимодействия между двумя ядрами, образование двойной ядерной системы при захвате ядра-снаряда ядром-мишенью; эволюция двойной ядерной системы как динамика двух взаимодействующих ядер, время ее жизни и выход продуктов реакции при распаде двойной ядерной системы.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

определены подбарьерные сечения захвата налетающего ядра снаряда с ядром мишени в реакциях $^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ и $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ для различных значений энергии ниже потенциального барьера;

теоретическим методом показано, что разницы в потенциалах взаимодействия и в барьерах слияния в реакциях $^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ и $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ для каналов $2n$ и $3n$ ответственны за большую разницу в значениях сечений остатков испарения;

предложен новый подход для объяснения результатов наблюдения продуктов снаряда, образующихся в реакции $^{78}\text{Kr}(10 \text{ МэВ/нук.})+^{40}\text{Ca}$ в

передней полусфере, подразумевающий, что двойная ядерная система распадается после поворота на 180° ;

показано, что продукты квазиделения во время распада двойной ядерной системы в реакции $^{48}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$, подобные по массовому распределению продуктам деления составного ядра, ответственны за увеличение ширины распределения масс продуктов слияния-деления.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных научных результатов по исследованию динамики взаимодействия в столкновениях тяжелых ионов при энергиях около кулоновского барьера:

рассчитанные подбарьерные сечения захвата налетающего ядра снаряда с ядром мишени в реакциях $^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ и $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$, для различных значений энергии ниже потенциального барьера использованы международными исследователями (ссылки в зарубежных научных журналах Nuclear Physics A 994, 121662, 2020; Physical Review C 101, 014616, 2020; Physical Review C 101, 064604, 2020; Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 47, 075106, 2020). Использование научных результатов позволило рассчитать и оценить значения подбарьерного сечения захвата для разных реакций;

показанные причины сильной разницы в значениях сечений остатков испарения в реакциях $^{36}\text{S}+^{206}\text{Pb}$ и $^{34}\text{S}+^{208}\text{Pb}$ признаны международными исследователями как перспективный новый теоретический подход в изучении эволюции двойной ядерной системы в реакциях, приводящих к одинаковому составному ядру (ссылки в зарубежных научных журналах Nuclear Physics A 994, 121662, 2020; Physical Review C 101, 014616, 2020; Physical Review C 101, 064604, 2020; Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 47, 075106, 2020). Использование научных результатов позволило интерпретировать роль входящего канала в эволюцию двойной ядерной системы;

предложенный подход, объясняющий наблюдение продуктов, подобных снаряду в переднем полушарии в реакции $^{78}\text{Kr}(10 \text{ МэВ/нук.})+^{40}\text{Ca}$, использован зарубежными исследователями (ссылки в зарубежных научных журналах The European Physical Journal A 55, 29, 2019; Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 47, 045115, 2020; Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 47, 075106, 2020). Использование научных результатов позволило исследовать выход продуктов подобных снаряду и оценить время жизни двойной ядерной системы;

результаты по определению продуктов квазиделения при распаде двойной ядерной системы в реакции $^{48}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ использовались зарубежными учеными (ссылки в международных научных журналах Physical Review C 98, 034601, 2018; Physical Review C 98, 014606, 2018; Physical Letters B 803, 135297, 2020) при изучении массового распределения в исследуемых реакциях. Использование научных результатов позволило различать механизмы реакции, которые конкурируют во время столкновений тяжелых ионов при низких энергиях снаряда.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Текст диссертации изложен на 102 страницах.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; Part I)

1. Kayumov B.M., Nasirov A.K. Dynamics of capture mechanism in heavy ion collisions at Coulomb barrier energies // Bulletin of the National University of Uzbekistan. – Tashkent (Uzbekistan), 2013. – Vol. 1, №2 – pp. 169 – 172. (01.00.00. №8)
2. Nasirov A.K., Kayumov B.M., Yongseok Oh. Peculiarities of quasifission reactions in heavy ion collisions // Nuclear Physics A. – Elsevier (Netherland), 2016. – Vol. 946. - pp. 89 –103 (№4. Journal Citation Reports; IF=1.928).
3. Meenu Thakur, Behera B.R., Ruchi Mahajan, Saneesh N., Gurpreet Kaur, Priya Sharma, Dubey R., Kushal Kapoor, Yadav A., Neeraj Kumar, Kumar S., Kavita Rani, Sugathan P., Jhingan A., Chatterjee A., Chatterjee M.B., Mandal S., Saxena A., Santanu Pal, Kailas S., Nasirov A.K., Kayumov B.M. Binary fragmentation based studies for the near super-heavy compound nucleus ^{256}Rf // European Physical Journal A. – Springer-SIF (Germany), 2017. – Vol. 53 – pp. 133 (№4. Journal Citation Reports; IF=3.167).
4. Nasirov A.K., Giardina G., Mandaglio G., Kayumov B.M., Tashkhodjaev R.B. Mass and angular distributions of the reaction products in heavy ion collisions // IOP Conference Series: Journal of Physics. – IOP Publishing (United Kingdom), 2018. – Vol. 1014 –id. 012009 – 12 p. (№4. Journal Citation Reports; IF=0.563)
5. Nasirov A.K., Kayumov B.M., Mandaglio G., Giardina G., Kim K., Kim Y. The effect of the neutron and proton numbers ratio in colliding nuclei on the formation of the evaporation residues in the $^{34}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ and $^{36}\text{S} + ^{206}\text{Pb}$ reactions // European Physical Journal A. – Springer-SIF (Germany), 2019. – Vol. 55 – pp. 29 (№4. Journal Citation Reports; IF=2.297).

II бўлим (II часть; Part II)

6. Kayumov B.M., Nasirov A.K., Tashkhodjaev R.B. Capture mechanism at different collision energies and orbital momentum // “Nuclear science and its application”: International conference, September 25-28, Samarkand. - Tashkent, 2012. – pp. 102-103.
7. Kayumov B.M., Nasirov A.K. Identification of reaction mechanisms in heavy ion collisions by lifetime of intermediate dinuclear system // “Актуальные проблемы теоретической и ядерной физики”: Республиканская научная конференция, 25-26 октября. – Ташкент (Узбекистан), 2013. – pp. 136-139.
8. Nasirov A.K., Giardina G., Mandaglio G., Kayumov B.M. Entrance channel effect in characteristics of the heavy ion reaction products // 62nd DAE-BRNS Symposium on Nuclear Physics, December 20-24. – Patiala (India), 2017 – pp. 11-12.

9. Kayumov B.M., Nasirov A.K. The role of the N/Z - ratio in colliding nuclei during the fusion of sulfur and lead // “II International Scientific Forum Nuclear Science and technologies”, June 24-27. – Almaty (Kazakhstan), 2019. – pp. 30-31.
10. Nasirov A.K., Kayumov B.M., Mandaglio G., Giardina G., Kim K., Kim Y., The Hindrance to Complete Fusion of Nuclei Related with the Nucleon Transfer Mechanism // LXIX International Conference “NUCLEUS-2019” on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure, July 1-5. – Dubna (Russia), 2019. – pp. 276.
11. Nasirov A.K., Kayumov B.M., Yuldasheva G.A., Giardina G., Mandaglio G., Kim K., Kim Y. Different Views of Complete Fusion in Heavy Ion Collisions: Difficulties in Synthesis of Superheavy Elements // “Modern Problems of Nuclear Physics and Nuclear Technologies”: the 9th International Conference, September 24-27. – Tashkent (Uzbekistan), 2019.– pp. 17-19.
12. Kayumov B.M., Nasirov A.K., Giardina G., Mandaglio G., Kim K., Kim Y. Mass and Charge Distribution in Heavy Ions Collision // “Modern Problems of Nuclear Physics and Nuclear Technologies”: the 9th International Conference, September 24-27. – Tashkent (Uzbekistan), 2019.– pp. 83-85.