

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

---

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ**

**ТАШХОДЖАЕВ РУСТАМ БАХОДИРХОДЖАЕВИЧ**

**УЧ КЛАСТЕРЛИ КОЛЛИНЕАР БЎЛИНИШ МЕХАНИЗМЛАРИ**

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

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

**Тошкент – 2017**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)  
диссертацияси автореферати мундарижаси  
Content of the dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD) on  
physical and mathematical sciences  
Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по  
физико-математическим наукам**

Ташходжаев Рустам Баходирходжаевич Уч кластерли коллинеар бўлиниш механизмлари.....	3
Tashkhodjaev Rustam Bakhodirkhodjaevich Mechanisms of collinear cluster tripartition.....	21
Ташходжаев Рустам Баходирходжаевич Механизмы коллинеарного кластерного тройного деления.....	39
Эълон қилинган ишлар рўйхати List of published works Список опубликованных работ.....	45

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

---

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ**

**ТАШХОДЖАЕВ РУСТАМ БАХОДИРХОДЖАЕВИЧ**

**УЧ КЛАСТЕРЛИ КОЛЛИНЕАР БЎЛИНИШ МЕХАНИЗМЛАРИ**

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

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

**Тошкент – 2017**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (Doctor of Philosophy) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси хузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.1.PhD/FM28 рақами билан рўйхатга олинган.**

Диссертацияси Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, инглиз, рус (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси ([www.inp.uz](http://www.inp.uz)) ва «Ziyonet» ахборот-таълим порталида ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) жойлаштирилган.

**Илмий раҳбар:**

**Насиров Авазбек Каримович,**

физика-математика фанлари доктори, катта илмий ҳодим

**Расмий оппонентлар:**

**Усманов Пазлиддин Нуритдинович,**

физика-математика фанлари доктори, доцент

**Хугаев Авас Васильевич,**

физика-математика фанлари номзоди

**Етакчи ташкилот:**

**Ўзбекистон Республикаси фанлар академияси Физика-**

**техника институти**

Диссертация химояси Ядро физикаси институти, Астрономия институти, Ўзбекистон Миллий университети хузуридаги DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2017 йил \_\_\_\_\_ соат \_\_\_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100174, Тошкент шаҳри, Улуғбек қўргони, Ядро физикаси институти. Тел. (+99871) 289-31-60; факс (+99871) 289-31-19; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

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

Диссертация автореферати 2017 йил « » \_\_\_\_\_ куни тарқатилди.

(2017 йил “ ” \_\_\_\_\_ даги \_\_\_\_\_ рақамли реестр баённомаси)

**М. Ю. Ташметов**

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

**Р. Ярмуҳамедов**

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

**И. Нуритдинов**

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

## **КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)**

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Бугунги кунда дунёда оғир ионлар билан боғлиқ ядро реакциялари физикаси соҳасида кўплаб экспериментал маълумотлар йиғилиб қолган. Буларнинг кўп қисмини мос ва бир-бирига зид келмайдиган тахминларга асосланган моделлар ёрдамида тушунтиришлар мавжуд. Оғир ядроларнинг ўз-ўзидан ва қўзғатилган ҳолатдан бўлинишларини назарий тадқиқ этишнинг долзарблиги бўлиниш жараёнини тўлиқ тушуниб етилмаганлиги билан боғлиқ. Бу эса бўлиниш маҳсулотлари ҳақидаги маълум экспериментал маълумотларни таҳлил қилиш учун янги назарий методлар ишлаб чиқилишини тақозо этади. Таҳлилларнинг ва универсал қонуниятлар ўрнатилишининг тизимлашуви массив ядролар бўлиниш жараёнининг реалистик механизмларни яратади.

Мустақиллик йилларида мамлакатимизда ядронинг бўлинишига доир экспериментал ва назарий ишларни ривожлантириш ҳамда дунё миқёсида фундаментал муаммоларни ҳал этиш бўйича кенг қамровли чора-тадбирлар амалга оширилиб, муайян натижаларга эришилди. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида оғир ядролар билан кечадиган реакциялар, хусусан, ядроларнинг иккига ва учга бўлиниши соҳасидаги назарий ва амалий изланишлар натижасида инновацион технологияларни жорий этиш орқали ядро технологиялари соҳасининг самарадорлигини ошириш муҳим вазифа этиб белгиланди.

Хозирги кунда жаҳоннинг турли илмий марказларида яратилган ҳар хил назарий моделлар мавжуд, аммо биронта модель деярли бир хил маҳсулотли учга бўлиниши тўлиқлигича ифодалаб бера олмайди. Бу жараёнлар тўла бўлиниш ҳодисаларининг кичик фоизини ташкил этишига қарамасдан, уларнинг табиатини билиш ядроларнинг оддий иккига бўлиниш жараёнини билишга катта ҳисса қўшади. Бўлиниш жараёнида кўп кластерли тизим ҳосил бўлишига ядро моддасининг қобиқ тузилишига эгалиги турли хил ядроларнинг бўлинишида кўп кластерлар ҳосил бўлиш табиатини назарий ва экспериментал билиш бўлинишнинг тўлиқ тасвирини қуришга имкон яратади. Мазкур тадқиқот ядронинг уч ва ундан кўп кластерларга бўлинишини тадқиқ қилишнинг бошланиши бўлгани билан ҳам муҳим аҳамиятга эга.

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

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

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Бугунги кунгача оғир ядроларнинг учга бўлинишинг статистик ва динамик ҳоссаларини назарий ҳамда экспериментал ўрганиш учун дунёнинг етакчи олимлари, жумладан, германиялик A.R. Degheidy, J.A. Maruhn, H. Diehl, W. Greiner, F. Gonenwein, W. von Oertzen, J.P. Theobald, P. Heeg ва M. Mutterer; россиялик Ю.В. Пятков, Д.В. Каманин, А.В. Карпов, В.А. Рубченя ва С.Г. Явшиц; америкалик M.L. Muga ва C.R. Rice, швециялик P. Holmvall ва U. Köster, хиндистонлик K. Manimaran, K.R. Vijayaraghavan ва M. Balasubramaniam сингари олимлар томонидан катта ҳажмда илмий тадқиқотлар олиб борилган.

Оғир ионлар (U, Cf, Th, Pu ва ҳаказо) бўлиниш маҳсулотларининг чиқиши, кинетик энергияси ва бурчак тақсимоти характеристикалари В.П. Пикуль, Ю.Н. Коблик, А.К. Насиров сингари ўзбекистонлик олимлар томонидан экспериментал ва назарий ўрганилган. Оғир ионлар иштирокида кечадиган ядро реакцияларини тавсифлаш учун Бирлашган ядро тадқиқотлари институти (Россия) ва Ядро физикаси институти (Ўзбекистон) олимлари томонидан қўшалоқ ядро системаси модели ишлаб чиқилган.

Аввалги тадқиқотлар учга бўлинишнинг фақатгина енгил ядроларнинг (He, Li, Be ва бошқалар) учиб чиқишига ўрганишга қаратилган. Учга бўлинишнинг бу тоифасида ўртадаги фрагмент (енгил ядро) бўлиниш маҳсулотларининг марказларини бирлаштирувчи чизиққа перпендикуляр йўналишда учиб чиқиши тадқиқ қилинган ва бунда чиққан энг оғир ядро олtingугурт эканлиги аниқланган. Кейинги пайтда Бирлашган ядро тадқиқотлар институтидаги Фобос экспериментал гурӯҳи (Ю.В. Пятков, Д.В. Каманин ва бошқалар) бошқа типдаги учга бўлинишни – уч кластерга коллинеар бўлинишни (кейинчалик УККБ) ўргана бошлади. Бу учга бўлиниш маҳсулотлари (кластерлари) деярли бир чизиқда учиб чиқади ва уларнинг массалари солишириб бўладиган қийматларга эга, яъни ўртадаги фрагмент катта масса сонига (<100) эга бўлиши мумкин.

Фобос экспериментал гурӯҳи ўз экспериментининг натижаларини эълон қилгандан кейин ҳинд олимлари (K.R. Vijayaraghavan, K. Manimaran ва M. Balasubramaniam) томонидан бу мавзуда ўтказилган назарий тадқиқотларда, асосан, тўлик потенциал хисоблаш орқали фрагментларнинг заряд ва масса сони баҳоланганд. Бу назариянинг асосий камчилиги шундан иборатки, битта барьер учта ядрони боғловчи иккита бўйиннинг (кешишувчи ҳажмларнинг) узилишини ўрганиш учун ишлатилган. Бу эса фрагментлар фақатгина бир вақтда ажralиши мумкинлигини англатади. Муаллифлар бундай чегараланишнинг сабабини муҳокама қилмаганлар.

Оғир ядроларнинг, асосан, уран ва калифорний ядроларининг турли хил учга бўлиниш механизmlари ҳозиргача тадқиқ қилинмаган.

**Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги.** Диссертация

тадқиқоти Ядро физикаси институти илмий-тадқиқотлар режасининг ФА-Ф2-Ф055 «Оғир ядролар билан кечувчи реакция маҳсулотларининг чиқишини ва ядронинг бўлинишини тадқиқ этиш» (2007–2011); ФА-Ф2-Ф115 «Кўп нуклонли ўтиш ва қўшилиш-бўлиниш реакция механизmlарини тадқиқ этиш» (2012–2016) мавзусидаги илмий лойиҳалар доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** уч кластерга коллинеар бўлиниш механизмларини тавсифловчи назарий формализмни ривожлантириш ва бўлинишнинг коллинеарликка олиб келувчи сабабни аниқлашдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

$^{235}\text{U}(\text{n}_{\text{th}}, \text{f})$  реакцияда кетма-кет коллинеар (параллел йўналишда) учга бўлиниши тавсифлаш учун қўшалоқ ядро системасининг тўлиқ ўзаро таъсир потенциалини ҳисоблаш;

$^{235}\text{U}(\text{n}_{\text{th}}, \text{f})$  реакцияда кетма-кет коллинеар учга бўлинишда чиқсан маҳсулотларнинг заряд тақсимотини баҳолаш;

$^{252}\text{Cf}$  ядросининг спонтан учга бўлинишида коллинеар конфигурацияда ўзаро таъсир потенциални энг оғир ( $^{132}\text{Sn}$ ) ва ўртадаги ( $^{50}\text{Ca}$ ) ядролар орасидаги масофага боғлиқлигини ўрганиш;

$^{252}\text{Cf}$  ядросининг деярли кетма-кет коллинеар ҳақиқий учга бўлиниши учун маҳсулотлар чиқиш эҳтимоллигини ва кинетик энергияларни ҳисоблаш;

$^{252}\text{Cf(sf)}$  реакцияда ноколлинеар (ёйилган) конфигурацияда чекка фрагментлар ( $^{70}\text{Ni}$  ва  $^{132}\text{Sn}$ ) орасидаги масофани тўлиқ ўзаро таъсир потенциал шаклидаги ролини ўрганиш;

$^{252}\text{Cf(sf)}$  реакцияда ҳақиқий учга бўлиниш учун Лагранж ҳаракат тенгламасини олиш;

ҳаракат тенгламасини турли хил бошланғич шартлар билан ечиш (Коши масаласи);

коллинеар учга бўлинишга олиб келувчи бошланғич шартларни топиш.

**Тадқиқотнинг обьекти** оғир ядролар, учга бўлиниш маҳсулотлари ва кластерлардан иборат.

**Тадқиқотнинг предмети** икки (ва уч) ядро орасидаги тўлиқ ўзаро таъсир, учга бўлиниш маҳсулотларининг чиқиши, учта ўзаро таъсиrlашувчи ядролар системасининг бошланғич ҳолати ҳисобланади.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Диссертацияда феноменологик кучли ўзаро таъсир потенциалининг ва макроскопик статистик механиканинг математик аппарати, дифференциал тенгламанинг аналитик ва сонли ечимлари сингари усуллардан фойдаланилди.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қўйидагилардан иборат:

ҳақиқий учга бўлиниш жараёнини тавсифлаш учун янги учталик ядро системаси модели ишлаб чиқилган ва айрим ҳолларда коллинеар учга бўлиниш табиатда мавжудлиги аниқланган;

$^{235}\text{U}(\text{n}_{\text{th}}, \text{f})$  реакцияда кетма-кет коллинеар учга бўлинишда  $^{82}\text{Ge} + ^{72}\text{Ni} + ^{82}\text{Ge}$  канали энг эҳтимолли эканлиги топилган;

$^{132}\text{Sn}$  ядросининг  $^{72}\text{Ni} + ^{50}\text{Ca}$  системасига яқин жойлашиши бир вақтда (ёки деярли кетма-кет) коллинеар учга бўлиниш учун жуда муҳимлиги кўрсатилган;

$^{72}\text{Ni}$  ва  $^{50}\text{Ca}$  орасидаги бўлиниш тўсиги  $^{50}\text{Ca}$  ва  $^{132}\text{Sn}$  орасидагига нисбатан баландроқлиги кўрсатилган;

учталик ядро системасининг коллинеар бўлинишига олиб келувчи узилиш арафасидаги бошланғич шартлар топилган ва уларнинг бўлиниши учун муҳимлиги кўрсатилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуидагилардан иборат:

кўзғатилган  $^{236}\text{U}$  ядросининг кетма-кет уч кластерга коллинеар бўлинишининг эксперимент натижаларига мос келадиган эҳтимоллиги каттароқ канали  $^{82}\text{Ge} + ^{72}\text{Ni} + ^{82}\text{Ge}$  эканлиги олинган;

$^{252}\text{Cf}$  ядросининг ўз-ўзидан бўлинишида  $^{70}\text{Ni} + ^{50}\text{Ca} + ^{132}\text{Sn}$  каналнинг уч кластерга коллинеар бўлиниш эҳтимоллиги бошқа каналларга нисбатан каттароқлиги ҳамда Ca ва Sn ядролари ўртасидаги бўйиннинг узилиши Ni ва Ca ядролари ўртасидагига (узилишлар орасидаги вақт фарқи жуда қисқа бўлиши керак) нисбатан эртароқ рўй беришлари кўрсатилган;

$^{252}\text{Cf}$  ядросининг спонтан бўлинишида ўртадаги ( $^{50}\text{Ca}$ ) ядронинг тезлиги жуда кичик ва кинетик энергияси детекторнинг қайд этиш чегара қийматидан кичиклиги топилган. Шу сабабли, экспериментда бу ядрони кузатишнинг иложи бўлмагани учун факат иккита четки фрагментлар қайд қилинган;

агар Ni ва Sn ядролар орасидаги нисбий масофа 21 фм дан кичик бўлса, у ҳолда коллинеарликдан оғиш кузатилган, чунки итарувчи Кулон кучи ўртадаги Ca ядрои тезлигининг йўналишини коллинеар ҳолатидан чиқаради. Бироқ бунда нисбий масофани ошиши билан Ca ядросининг минимал ҳолати коллинеар чизиқса силжиши олинган;

$^{252}\text{Cf}$  ядросининг ҳақиқий учга бўлинишининг динамик таҳлилидан коллинеар бўлинишга олиб келувчи фақатгина битта бошланғич шарт (хамма ядролар бир чизиқда жойлашган ва ўртадаги ядро тезлиги йўналишининг коллинеар чизиқса нисбатан перпендикуляр ташкил этувчиси нолга тенг) борлиги аниқланган. Узилиш арафасидаги қолган барча бошланғич шартлар ноколлинеар учга бўлинишга олиб келиши топилган;

$^{50}\text{Ca}$  ядросининг  $^{70}\text{Ni}$  ядросидан ажралиши  $^{132}\text{Sn}$  ядросининг  $^{70}\text{Ni} + ^{50}\text{Ca}$  системасидан ажралишига қараганда  $1,35 \times 10^{-21}\text{s}$  га кечроқ рўй бериши олинган. Бу вақт оддий иккига бўлиниш вақти ( $\sim 10^{-19}\text{s}$ ) билан солиштирганда жуда кичик эканлиги кўрсатилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** қаралаётган жараёнлар кетма-кетлигини ўрганишда олинган натижалар физика қонунларига бўйсуниши, таҳлил хulosаларининг ўзаро қарама-қаршиликдан холи бўлиши, замонавий назарий физика методлари, юқори самарали сонли методлар ва алгоритмлар ишлатилганлиги билан асосланади; назарий йўл билан олинган натижаларни экспериментал ва бошқа авторларнинг натижалари билан мос келиши синчковлик билан текширилди; хulosалар қуий энергиядаги ядро реакцияларининг асосий қоидалари билан мос келади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқотда яратилган усулларнинг ва шу усуллар ёрдамида олинган тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти янги экспериментал маълумотларда олинган маҳсулотлар ҳоссаларининг таҳлили ва ҳақиқий учга бўлиниш

механизмларини ўрнатиш учун уларнинг фойдалилиги ва турли ядервий жараёнларга татбиқ қилиш мумкинлиги билан изоҳланади. Махсулотларнинг коллинеарлигининг назарий таҳлили илк бор ўтказилиши оғир ядроларнинг учга бўлиниш табиатини тушунишда муҳим аҳамият касб этади. Диссертацияни ташкил қилган мақолаларга ҳаволалар буни тасдиқлайди.

Тадқиқот натижалариниг амалий аҳамияти шундан иборатки, улар энг эҳтимолли учталик ядро системасининг конфигурацияларини ва унинг бўлиниш каналларини аниқлаш учун ишлатилиши мумкин. Яратилган ҳисоблаш методи учга бўлиниш маҳсулотларининг заряд, масса, энергия ва бурчак тақсимоти каби учга бўлиниш турини кўрсатувчи ҳар-хил параметрларини баҳолаш учун қўлланилиши мумкин. Натижалар кластерларнинг ядервий реакциялардаги роли ва уларни идентификация қилиш учун экспериментал кузатиш шартларини ишлаб чиқиша ва реакциялар табиатини таҳлил қилишда фойдали бўлиши мумкин.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.**  $^{252}\text{Cf}$  ядросининг ўз-ўзидан бўлинишида  $^{70}\text{Ni} + ^{50}\text{Ca} + ^{132}\text{Sn}$  каналининг уч кластерга коллинеар бўлиниши эҳтимоллиги бошқа каналларга нисбатан каттароқлиги хорижий илмий журналларда (Journal of Physics G, 2017; Physical Review C, 2016; Physical Review C, 2017) коллинеар учга бўлиниш каналини аниқлашда фойдаланилган. Илмий натижанинг қўлланилиши оғир ядроларнинг коллинеар учга бўлиниш механизмини аниқлашга хизмат қилган.

$^{252}\text{Cf}$  ядросининг учга бўлинишида Ni ва Sn орасидаги нисбий масофа 24 фм дан катта бўлиши системанинг ноколлинеар парчаланишига олиб келиши мумкинлиги хорижий илмий журналларда (International Journal of Physics E, 2016; European Physical Journal A, 2017; Physical Review C, 2017) бўлинишни коллинеар ёҳуд ноколлинеарлигини аниқлашда ишлатилган. Илмий натижанинг қўлланилиши  $^{252}\text{Cf}$  ядросининг ноколлинеар учга бўлиниш холларини аниқлашга хизмат қилган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Мазкур тадқиқот натижалари 3 та халқаро ва 4 та республика илмий-амалий анжуманида муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши.** Диссертация мавзуси бўйича жами 17 та илмий иш нашр қилинган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг фалсафа доктори (PhD) диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 10 та мақола, жумладан, 8 таси хорижий журналларда нашр этилган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловадан иборат. Диссертациянинг ҳажми 103 бетни ташкил этади.

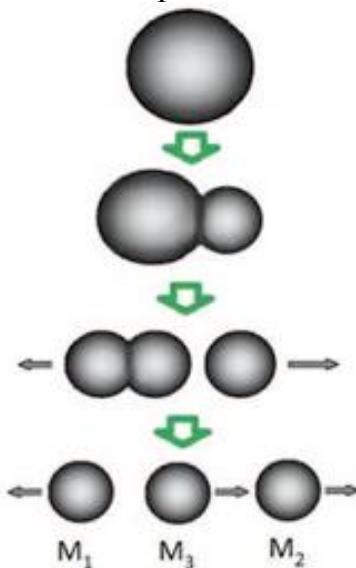
## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

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

Диссертациянинг « $^{235}\text{U}(\text{n}_{\text{th}}, \text{f})$  реакцияда кетма-кет иккига бўлиниш орқали уч кластерга коллинеар бўлиниш» деб номланган биринчи бобида иссиқ ( $E_{n_{th}} = 0.025$  eV энергияли) нейтроннинг  $^{235}\text{U}$  изотопида ютилишидан ҳосил бўлган  $^{236}\text{U}^*$  ядросининг ҳақиқий учга бўлиниши ўрганилган. Учга бўлиниш жараёни кетма-кет иккига бўлиниш жараёнлари тизими сифатида тасаввур қилинган. Массаларининг микдори деярли яқин бўлиниш маҳсулотларининг ҳаракат йўналиши бир ўқда, деб қаралган.

Оғир ядроларнинг бўлиниш маҳсулотлариниг масса ва заряд тақсимотини тавсифлаш учун қўшалоқ ядро системаси (ҚЯС) концепцияси қўлланилган. Ядро бўлиниши учун унинг энергияси асосий ҳолатдаги қийматидан баръер ажратиб турувчи эллипсоид шаклга тўғри келадиган энергиялар соҳасига ўтади. Ядро деформацияси ортиб бориб, унинг шакли гантелсимон кўринишга келади ва шунинг учун ҚЯС методларини бўлиниш жараёнининг сўнги қисмини ўрганиш учун қўллаш мумкин. Гантелсимон системанинг икки қисмини тасвирловчи масса (заряд) асимметрияси нуклон алмашинуви орқали ўзгаради. Диссертацияда бўлинишнинг бошланғич босқичи, яъни бўлинувчи ядронинг шакли компакт шаклдан қўшалоқ ядро системаси шаклига ўтиши қаралмайди.

Уч кластерга коллинеар бўлинишни 1-расмда кўрсатилганидек икки босқичли кетма-кет иккига бўлиниш сифатида келтириш мумкин.

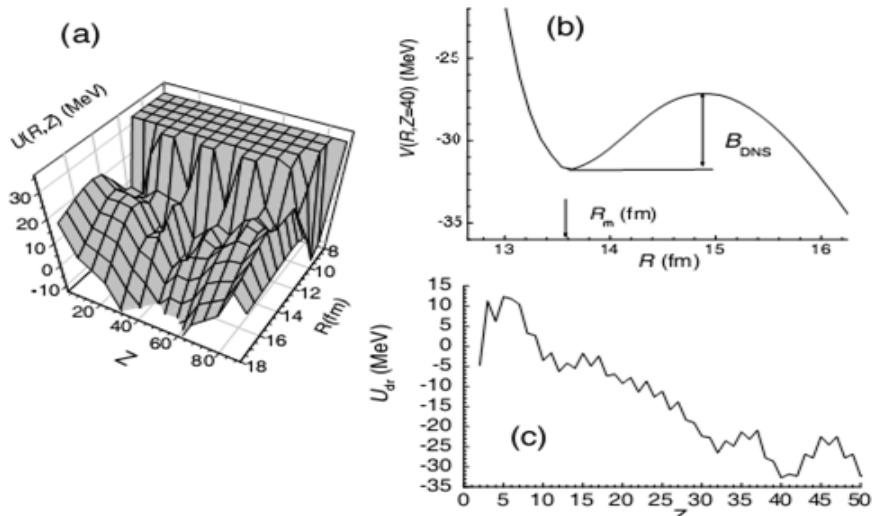


1-расм. Оғир ядроларнинг кетма-кет уч кластерга коллинеар бўлинишининг намойиши

ҚЯС түлиқ энергиясининг ўзгариши реакция баланс энергияси ( $Q_{gg}$ ) ва системанинг ташкил этувчилари орасидаги ядро-ядро ўзаро таъсир потенциалининг  $V_{int}(Z, A, R)$  йифиндисидан иборат:

$$V(Z, A, R) = V_{int}(Z, A, R) + Q_{gg}(Z, A) \quad (1)$$

$Q_{gg}$  реакция давомида ички энергиянинг ўзгаришини намойиш қиласи:  $Q_{gg} = B_1(Z, A) + B_2(Z_{CN} - Z, A_{CN} - A) - B_{CN}(Z_{CN}, A_{CN})$ , бу ерда  $B_1$  ва  $B_2$  ( $Z$  ва  $Z_{CN} - Z$ ) – ҚЯС ташкил этувчиларининг боғланиш энергиялари (заряд сонлари). 2(a)-расмда потенциал энергия сирти  $V(Z, R)$  фрагментлар орасидаги нисбий масофа  $R$  ва заряд сони  $Z$  функцияси сифатида келтирилган. 2(b)-расмда кўрсатилган  $V_{int}(R)$  ядро-ядро потенциали  $^{A_1}Z_1$  ва  $^{A_2}Z_2$  фрагментлар орасидаги ўзаро таъсирга мос келади.  $Z_1$  ва  $Z_2$  заряд сонларига мос келувчи  $A_1$  ва  $A_2$  масса сонлари потенциал энергия сиртининг минимал қийматини таъминлаб беради. Фрагментнинг берилган заряд  $Z$  сонига эга бўлинувчи системанинг түлиқ энергиясининг минимумидан масса  $A$  сони топилади.



2-расм. Фрагментлар орасидаги нисбий масофа  $R$  ва заряд сони  $Z$  функцияси сифатида  $^{236}\text{U}$  учун потенциал энергия сирти (а);  $^{102}\text{Zr}+^{134}\text{Te}$  ҚЯСнинг ўзаро таъсирига мос келувчи  $V(R)$  ядро-ядро потенциали; ҚЯСнинг бўлинишига қарши потенциал ўранинг чуқурлиги бу  $B_{DNS}$  (б);  $^{236}\text{U}$  учун бошқарув потенциали (с).

$V_{int}(Z, A, R)$  ўзаро таъсири нуклонлар ўртасидаги эффектив Мигдал кучлари билан иккала ядро нуклон зичлиги функцияларини икки ўрамли ҳисоблаш методи асосида топилади. Мигдал эффектив нуклон-нуклон потенциали ишлатилишининг афзаллиги – бу потенциалнинг ўзаро кесишувчи соҳалардаги нуклонлар зичлигига сезгирилигидадир. Потенциал ўранинг мавжудлиги ҚЯС ядроларига боғланган ҳолда қолишга ва иккита фрагментга ажралгунгача нуклонлар алмашинуви орқали ўзаро таъсиралишишга имкон беради. Потенциал ўранинг чуқурлиги ҚЯС фрагментларининг заряд ва масса асимметрияларига боғлик.

Бошқарув потенциали ҚЯСнинг заряд ва масса асимметрияларини аниқлайди ва ҚЯСнинг берилган заряд асимметрияси учун ҳисобланган ядро-ядро потенциал ( $V_{int}(R_m)$ ) ўраларининг минимумларини бирлаштириш

орқали топилади (2(b)-расмга қаранг). У  $Z-2 < Z < 90$  ўқи бўйлаб потенциал энергия сирти водийсининг тубида ётувчи эгри чизик орқали намойиш қилинади. Агар  $Z$  заряд асимметрияли ҚЯС учун потенциал ўранинг тубига мос келувчи  $R$  нинг қийматини  $R_m(Z)$  орқали ифодаланса, у ҳолда бошқарув потенциали куйидаги формула ёрдамида аниқланади:

$$U_{dr}(Z, A) = V_{int}(Z, A, R_m(Z)) + Q_{gg}(Z, A) \quad (2)$$

ҚЯСнинг бўлиниши статистик жараён сифатида таҳлил қилиниши мумкин. Унинг иккита фрагментга бўлинишига тўсқинлик қилувчи барьер баландлиги берилган ғалаёнланиш энергиясига боғлиқ эффектив  $T_{DNS}$  ҳароратли системанинг заряд (масса) тақсимотида статистик мувозанатнинг ўрнатилишига ёрдам беради. Бўлиниш маҳсулотларининг заряд (масса) тақсимоти  $Y(Z)$  фрагментларнинг бўлиниш арафасидаги ҚЯС ҳолатидаги заряд тақсимотига  $P(Z)$  ва берилган  $Z$  заряд асимметрия ҳолатидан ҚЯСнинг бўлиниш эҳтимоллигига  $W(Z)$  боғлиқ:

$$Y(Z) = Y_0 P(Z) W(Z) \quad (3)$$

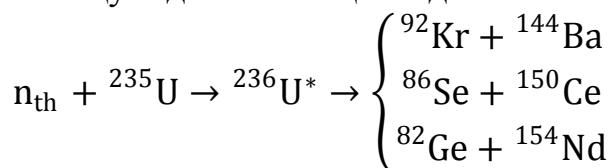
$$P(Z) = P_0 e^{-U_{dr}(Z)/T_{DNS}(Z)} \quad (4)$$

$$W(Z) = W_0 e^{-B_{DNS}(Z)/T_B(Z)} \quad (5)$$

Бу ерда  $T_{DNS}(Z) = \sqrt{\frac{E_{DNS}^*}{a}}$  ва  $T_B(Z) = \sqrt{\frac{B_{DNS}}{a}}$  – мос равища бўлиниш ўқи бўйлаб минимумдаги ва барьер устидаги (ёки бўлиниш нуктасидаги) системанинг эффектив ҳароратлари,  $a = \frac{A_{CN}}{12 \text{ МэВ}}$  – сатҳ зичлиги параметри.  $E_{DNS}^*$  – ҚЯСнинг ғалаёнланиш энергияси ва  $B_{DNS}(Z)$  эса ҚЯСнинг бўлиниши учун тўсиқ (2(b)-расмга қаранг).  $Y_0$ ,  $P_0$  ва  $W_0$  мос эҳтимоллик тақсимоти учун нормаллаштириш коэффициенти.

УККБнинг кетма-кет механизмга асосан (1-расмга қаранг), бирламчи иккига бўлиниш рўй берганда ҳосил бўлган маҳсулотлардан бирининг иккига бўлинишида иккинчи ва учинчи маҳсулотлар шаклланади. Экспериментда биринчи иккига бўлиниш маҳсулотларидан бири, албатта, детекторларнинг бирида қайд этилади, иккинчи бўлиниш маҳсулотларидан бири қарама-қарши тарафдаги иккинчи детекторда қайд этилади. Шундай қилиб, иккиласми бўлиниш маҳсулотларининг иккинчиси қайд қилинмай қолади.

Куи  $E_{n_{th}} = 0.025 \text{ eV}$  энергияли “иссиқ” нейтронлар билан ҳосил бўлган  $^{236}\text{U}^*$  ядросининг бирламчи иккига бўлиниши кўрилганда, асосий иккига бўлиниш каналлар маҳсулотлари чиқишидан ташқари айрим максимумлар гурухи мавжуд эканлиги куйидагича аниқланади:



Бу каналлар УККБ маҳсулотларига олиб келиши мумкин. Агар бўлиниши мумкин бўлган оғир ядролар сифатида Ba, Ce ва Nd ядролари олинса, у ҳолда, УККБ маҳсулотлари учун 1-жадвалда келтирилган натижалар олинади.

1-жадвал

$^{236}\text{U}^*$  ядросининг УККБ учун турли хил кетма-кет каналларнинг амалга ошиши учун ҳисобланган эҳтимолликлари

$^{236}\text{U}^* \rightarrow f_1 + f_2$ нинг бўлиниш каналлари	Бирламчи оғир ядроларнинг бўлиниш каналлари	УККБ чиқишилари
$^{82}\text{Ge} + ^{154}\text{Nd}^*$	$^{154}\text{Nd}^* \rightarrow ^{72}\text{Ni}^* + ^{82}\text{Ge}^*$ $^{154}\text{Nd}^* \rightarrow ^{76}\text{Zn}^* + ^{78}\text{Zn}^*$	$3 \cdot 10^{-4}$ $1.5 \cdot 10^{-4}$
$^{86}\text{Se}^* + ^{150}\text{Ce}^*$	$^{150}\text{Ce}^* \rightarrow ^{68}\text{Fe}^* + ^{82}\text{Ge}^*$ $^{150}\text{Ce}^* \rightarrow ^{72}\text{Ni}^* + ^{78}\text{Zn}^*$	$1.0 \cdot 10^{-5}$ $1.4 \cdot 10^{-5}$
$^{92}\text{Kr}^* + ^{144}\text{Ba}^*$	$^{144}\text{Ba}^* \rightarrow ^{62}\text{Cr}^* + ^{82}\text{Ge}^*$ $^{144}\text{Ba}^* \rightarrow ^{72}\text{Ni}^* + ^{72}\text{Ni}^*$	$9 \cdot 10^{-6}$ $1 \cdot 10^{-7}$

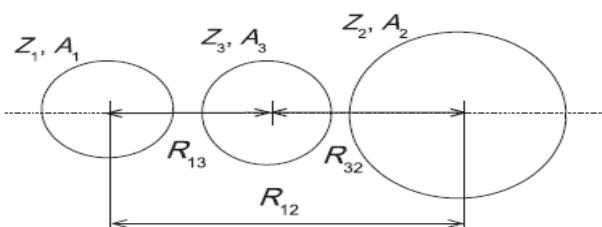
Жадвалдан кўринадики, УККБнинг энг эҳтимолли канали  $^{236}\text{U}^* \rightarrow ^{82}\text{Ge} + ^{72}\text{Ni} + ^{82}\text{Ge}$  ҳисобланади ва унинг чиқиши  $3 \cdot 10^{-4}$ .

Фалаёнланган бўлиниш маҳсулотларидан учиб чиқсан нейтронлар сони ҳисобга олинса, ҳар бир  $^{72}\text{Ni}^*$  ва  $^{82}\text{Ge}^*$  лардан учиб чиқсан нейтронлар сони иккига ва умумий нейтронлар сони тўртга тенглигини биламиз. Охир оқибатда, ҚЯС доирасида УККБнинг энг эҳтимолли канали  $^{236}\text{U}^* \rightarrow ^{82}\text{Ge} + ^{70}\text{Ni} + ^{80}\text{Ge} + 4\text{n}$  ҳисобланади.

Уч кластерга коллинеар бўлинишнинг каскад механизми доирасида ҳисобланган маҳсулот масса сонлари 84 дан катта эмас. Аммо экспериментда бундан катта массали ҳодисаларни кўришимиз мумкин. Бу камчилик учга бўлинишнинг бошқа турли хил механизмларини ўрганишга туртки бўлди. Шунинг учун учга бўлинишнинг бошқа механизми диссертациянинг иккинчи бобида муҳокама қилинади.

Диссертациянинг “Ҳақиқий учга бўлинишнинг деярли кетма-кет механизми” деб номланган иккинчи боби оғир ядронинг массалари яқин бўлган ҳақиқий учга бўлиниш механизмига бағишлиланган. Бу механизмнинг олдинги бобда тавсифланган механизмдан фарқи шундаки, деярли кетма-кет механизмда ядролар орасидаги иккита бўйиннинг (1-расмдаги 3-босқичга қаранг) узилишлари орасидаги вақт жуда кичик. Бу натижага эришиш учун бу бобда янги назарий модель – учталик ядро системаси (УЯС) модели ишлаб чиқилган. Бу модель қўшалоқ ядро системаси моделига асосланган.

Бўлинадиган УЯСнинг коллинеар конфигурацияси қўйидагича аниқланди: учта фрагмент битта бўлиниш ўқида жойлашган ва бунда УЯСнинг тўлиқ энергиясининг қиймати минимал бўлади. 3-расмда кўрсатилганидек, чекка ядролар “1” ва “2” ҳамда ўртадаги ядро эса “3” каби белгиланган. Бундай таҳлилда ишлатиладиган УЯСнинг ўзгарувчилари 3-расмда кўрсатилганидек аниқланган:



3-расм. УЯС фрагментларининг коллинеар жойлашуви

УЯСнинг потенциал энергия сирти (ПЭС) минимумлари унинг фрагментлари заряд ва масса сонларини ҳамда оғирлик марказлари орасидаги масофани ўзгартириб топилади. ПЭС коллинеар УЯСнинг иккита фрагментининг заряд сонига боғлиқ икки ўлчамли бошқарув потенциалини намойиш қиласи. УЯС ўртасидаги фрагмент билан четки фрагментлар масса марказлари орасидаги  $R_{13}$  ва  $R_{32}$  масофа ядро-ядро ўзаро таъсир потенциал энергияси қиймати минимумидан топилади.

ПЭС қуидаги ҳисобланилади:

$$\begin{aligned} U(Z_1, A_1, \beta^{(1)}, Z_2, A_2, \beta^{(2)}, Z_3, A_3, \beta^{(3)}, R_{13}, R_{32}) \\ = V_{int}(Z_1, A_1, \beta^{(1)}, Z_2, A_2, \beta^{(2)}, Z_3, A_3, \beta^{(3)}, R_{13}, R_{32}) \\ + Q_{ggg}(Z_1, A_1, Z_3, A_3) \end{aligned} \quad (6)$$

Бу ерда  $Z_i$  ва  $A_i$  УЯС  $i$ -чи ( $i=1,2,3$ ) фрагментининг мос равишида заряд ва масса сонлари ва  $R_{ij}$   $i$ -чи ва  $j$ -чи фрагментларнинг масса марказлари орасидаги масофа.  $\beta^{(i)} = \{\beta_2^{(i)}, \beta_3^{(i)}\}$  эса  $i$  фрагментнинг деформация параметрлари тўплами ва  $\beta_2^{(i)}$  ва  $\beta_3^{(i)}$  мос равишида деформациянинг квадруполь ва октуполь қисмларини намойиш қиласи. УЯСнинг фрагментлари орасидаги  $V_{int}$  биринчи бобда келтирилган каби икки, яъни  $V_{nuc}^{ij}$  ядро ва  $V_C^{ij}$  Кулон қисмларидан иборат. Кўринадики,  $V_{nuc}^{12} = 0$ , чунки 1 ва 2 фрагментлар 3 фрагмент орқали ажратилган ва шу сабабли уларнинг нуклон зичликлари тақсимоти кесишмайди, фақатгина улар орасида кулон ўзаро таъсири мавжуд. (6) тенгламадаги  $Q_{ggg}$  бу учга бўлинишнинг реакция энергияси балансидир.

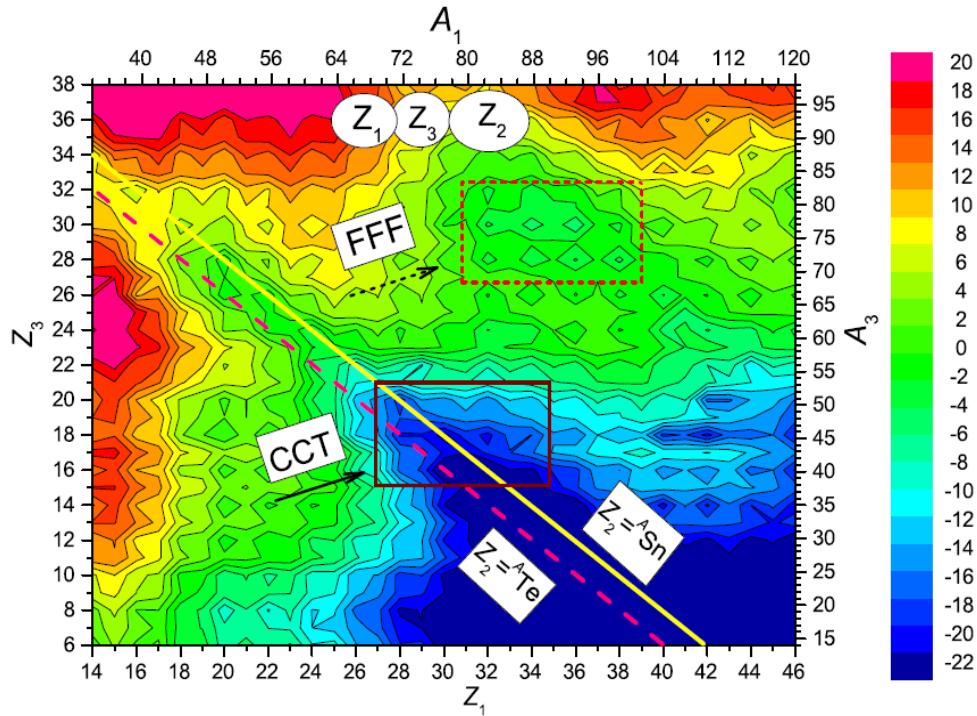
Бўлиниш арафаси ҳолатидаги УЯСнинг заряд ва масса тақсимотини ҳисоблаш учун ПЭСнинг водийси ва минимумлари ўзаро таъсир  $V_{int}$  потенциалини ( $Z_1, A_1, Z_3, A_3, R_{13}, R_{32}$ ) нинг функцияси сифатида ҳисоблаш орқали аниқланилади, чунки ( $Z_2, A_2$ ) ни ( $Z_1, A_1, Z_3, A_3$ ) орқали топса бўлади ва  $R_{12} = R_{13} + R_{32}$ . Буни ҳар бир  $\{Z_1, A_1; Z_3, A_3; Z_2, A_2\}$  конфигурация учун  $V_{int}$  ни  $R_{13}$  ва  $R_{32}$  функцияси сифатида ишлатиб топса бўлади (геометрия сифатида 3-расмга қаранг).

Икки ўлчовли бошқарув потенциали  $U_{dr}(Z_1, A_1; Z_3, A_3)$  фрагментлар масса марказлари орасидаги масофага боғлиқ  $V_{int}$  ядро-ядро ўзаро таъсир потенциалидаги ўра қийматининг минимум қийматига мос келувчи (6) ифодадаги ПЭСнинг қийматлари орқали топилади:

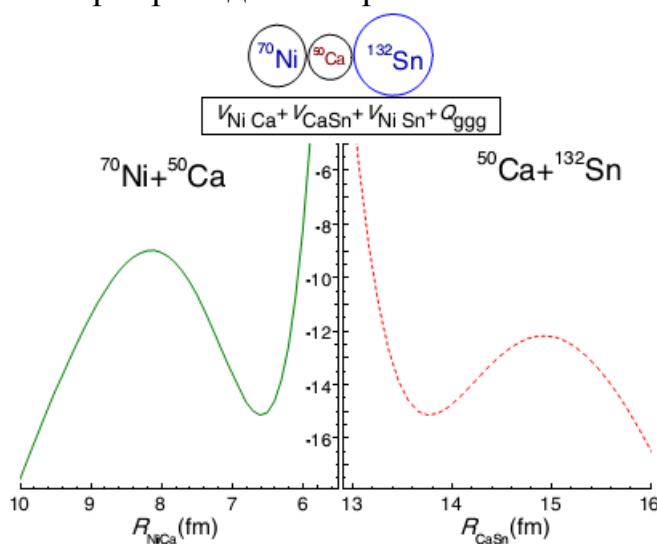
$$\begin{aligned} U_{dr}(Z_1, A_1, \beta^{(1)}, \beta^{(2)}, Z_3, A_3, \beta^{(3)}) \\ = U(Z_1, A_1, \beta^{(1)}, \beta^{(2)}, Z_3, A_3, \beta^{(3)}, R_{13}^{(min)}, R_{32}^{(min)}) \end{aligned} \quad (7)$$

$^{252}\text{Cf}$  ядроси учун (7) формула ёрдамида ҳисобланган бошқарув потенциали 4-расмда келтирилган. “ССТ” тўртбурчак ичида  $Z_1(A_1)$  ва  $Z_3(A_3)$  масса сонлари УККБ маҳсулотларига мос келади. “FFF” тўртбурчак эса деярли бир хил массали учта фрагментнинг шаклланишига тўғри келадиган УЯС конфигурацияларини кўрсатади. Узлуксиз ва пунктир чизиқлар четки  $Z_2$  ядро сифатида  $^{132}\text{Sn}$  ва  $^{134}\text{Te}$  га эга УЯС конфигурацияларини кўрсатади. Шундай қилиб, УЯСнинг четки ядроси

$Z_2=50$  ва  $Z_2=52$  заряд сонига тенг бўлса минимал энергияга эга водийни кўришимиз мумкин ва бу  $^{252}\text{Cf} \rightarrow f_1 + f_3 + ^{132}\text{Sn}$  ва  $^{252}\text{Cf} \rightarrow f_1 + f_3 + ^{134}\text{Te}$  бўлиниш каналларига мос келади. Водий деярли  $Z_3=28$  ли майдонгача чўзилади.  $\text{Ni}+\text{Ca}+\text{Sn}$  конфигурация  $\text{Ca}+\text{Ni}+\text{Sn}$  конфигурацияга қараганда кўпроқ эҳтимолликка эга, чунки ПЭСнинг қиймати  $\text{Ca}+\text{Ni}+\text{Sn}$  конфигурация учун олдинги конфигурацияга нисбатан 12 МэВ га каттароқ.



Бу УЯС фрагментлари потенциал ўрадан бўлиниши керак ва шунинг учун уларнинг чукурлигини баҳолаш жуда муҳим, яъни боғланган оғир кластерлар узоқ вақт бирга қолишлари мумкин. Ўзаро таъсир  $V_{\text{CaSn}}$  потенциалини ҳисоблаш учун  $R_{\text{NiCa}}$  масофа  $V_{\text{NiCa}}$  потенциалнинг минимумига тўғри келувчи қийматида фиксиранади, потенциал  $V_{\text{NiCa}}$  эса  $V_{\text{CaSn}}$  потенциалнинг минимумига мос келувчи фиксиранган  $R_{\text{CaSn}}$  қийматида ҳисобланади. Натижалар 5-расмда келтирилган.

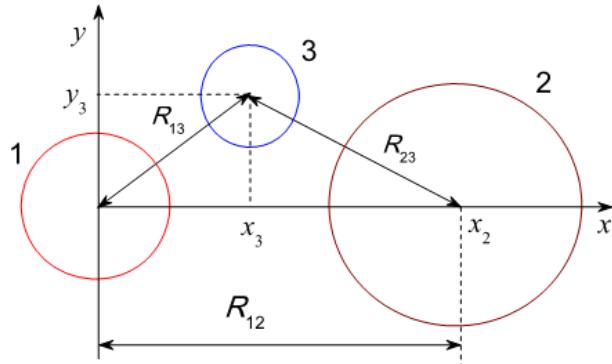


5-расм. УЯС фрагментларини бир жойда ушлаб турувчи бўлиниш арафасидаги  $B_{\text{NiCa}}$  ва  $B_{\text{CaSn}}$  тўсиқлар

Ni+Ca системанинг бўлиниш арафасидаги  $B_{\text{NiSn}}$  баръер  $V_{\text{NiSn}}$  потенциалининг чуқурлигига тенг бўлиб  $R_{32}$  га боғлиқ равища ўзгаради. Бу ҳодисани қўрсатиш учун (6) тенгламадаги  $V_{\text{int}}$  потенциалининг  $R_{13}$  функция сифатида максимум ва минимум қийматлари фарқи бўлган  $B_{13}$  баръернинг ўзгириши баҳоланди. Баҳолаш натижаси шуни қўрсатадики, учинчи фрагментнинг мавжудлиги Ni+Ca системасининг бўлинишини енгиллаштириш учун жуда муҳим. Учинчи массив Sn фрагментининг мавжудлиги бўлиниш арафасидаги тўсиқни 4 МэВ га камайтиради ва шу сабабли Ni+Ca системанинг бўлиниш эҳтимоллиги ортади.

Диссертациянинг “ $^{252}\text{Cf}$  ядросининг ўзидан-ўзи бўлинишида учталик ядро системасининг бўлиниш арафасидаги конфигурацияси” деб номланган учинчи боби учталик ядро системасининг мумкин бўлган конфигурацияларини баҳолашга бағишлиланган. Биринчи ва иккинчи бобларда маҳсулотларнинг заряд ва масса тақсимотлари мухокама қилинган, аммо уларнинг бўлинишдан кейинги импульсларининг коллинеарлиги мухокама қилинмаган эди. Учинчи бобда коллинеар бўлмаган конфигурациялар ҳам таҳлилга тортилди.

Назарий ёндашув УЯС моделига асосланган ва бунда иккинчи бобдаги каби ҚЯС учун ишлатилган қариндош моделга асосланган “учталик ядро системаси” термини ишлатилди. УЯСнинг физик хусусиятлари ҚЯС каби, бироқ ўзаро таъсирлашувчи ядролар учта.



**6-расм.  $V(R_{12}, x_3, y_3)$  потенциал энергияни ҳисоблашда ишлатиладиган ўзгарувчиларни қўрсатувчи схема**

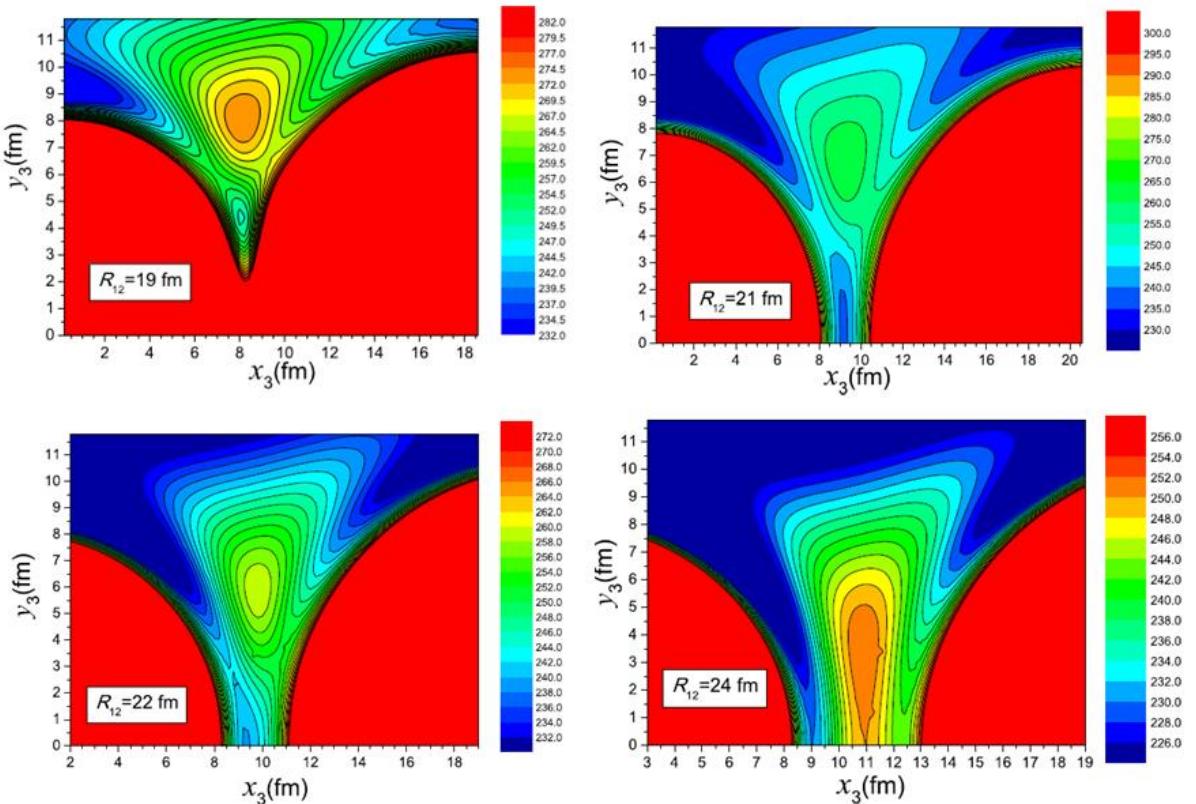
Потенциал энергия учта ядро орасидаги Кулон ва ядро ўзаро таъсирлари йиғиндисидан топилади:

$$V(R_{12}, x_3, y_3) = \sum_{i < j} V_{ij}(R_{12}, x_3, y_3) \quad (8)$$

$$V_{ij}(R_{12}, x_3, y_3) = V_{ij}^{(\text{nuc})}(R_{12}, x_3, y_3) + V_{ij}^{(\text{Coul})}(R_{12}, x_3, y_3) \quad (9)$$

Бу ерда  $i, j=1, 2, 3$  ва  $i < j$ . Ядро-ядро потенциаллари  $V_{ij}(R_{12}, x_3, y_3)$  “ $i$ ” ва “ $j$ ” фрагментлари орасидаги нисбий  $R_{ij}$  масофага боғлиқ (6-расмга қаранг). Ўзаро таъсир потенциалининг ҳисоблаш методи иккинчи бобда тавсифланганидек.  $R_{12}$  нинг фиксирулган қийматлари учун  $x_3$  ва  $y_3$  функция сифатида  $V$  ҳисоблаш натижалари 7-расмда кўрсатилган. Расмдан кўринадики,  $R_{12} < 21$  фм масофа учун учталик ядро системаси учбуручак шаклга эга ( $y_3 > 0$ ), чунки Кулон итарувчи кучлари Ca ядросини Ni ва Sn

марказларини туташтирувчи  $R_{12}$  ўқидаги коллинеар ҳолатдан чиқаради.



7-расм. “1” ва “2” фрагментларнинг масса марказлари орасидаги нисбий  $R_{12}$  масофанинг 19 дан 24 фм гача бўлган қиймати учун “3” ўртадаги фрагментнинг (Са) масса маркази ҳолатига ( $x_3$  ва  $y_3$ ) боғлиқ  $V(R_{12}, x_3, y_3)$  потенциал энергия сирти

Са учун потенциал ўранинг минимал қиймати катта,  $V_{min}(R_{12} = 19 \text{ fm}, x_3 = 8,2 \text{ fm}, y_3 = 4,4 \text{ fm}) = 248,83 \text{ МэВ}$ . Бу Са ядросининг  $R_{12}$  чизиқка нисбатан ҳолатининг биринчи ҳусусияти. Бу ҳолда Са ядросининг ҳолати оғир ядролар орасида жойлашадиган He, Li, Be, ..., Si енгил ядроларнинг бўлиниш арафасидаги ҳолатлари билан ўхшаш ва учга бўлинишда учиш траекториялари деярли  $R_{12}$  чизиқка перпендикуляр. Ўртадаги Са ядросининг  $R_{12}$  коллинеар ўқига нисбатан ҳолатининг иккинчи ҳусусияти бу  $V(R_{12}, x_3, y_3)$  да потенциал ўранинг минимуми  $R_{12}$  билан мос келишидир. Потенциал ўранинг минимуми  $R_{12}$  ортиши билан шу чизиқ томон ҳаракатланади.  $R_{12}=21\text{-}22$  фм қиймат учун УЯСнинг коллинеар конфигурацияси авфзалроқ, лекин  $V(R_{12}, x_3, y_3)$  да потенциал ўранинг 2 фм га кенгайиши ҳисобига ўртадаги Са ҳолатининг коллинеар ўқдан флуктуациясини кузатиш мумкин. 7-расмдан яна шуни хулоса қилиш мумкинки, агар УЯС  $R_{12}\geq 24$  фм да бўлинса, унда коллинеар бўлинишдан оғиши кузатилади. Бу очик саволга жавоб бериш учун кейинги бобда динамик ҳисоблар амалга оширилган.

Диссертациянинг “ $^{252}\text{Cf}$  ўзидан-ўзи бўлинишида учталик ядро системасининг динамикаси” деб номланган тўртинчли боби бўлинишнинг коллинеарлигини аниқлаш учун бўлинаётган учталик ядро системасининг Лагранж ҳаракат тенгламасини ечишга бағишиланган.

Классик Лагранж тенгламасини олиш ва уни ечиш асосий вазифа хисобланади. Лагранжиан бу  $L = T - V$ , бу ерда  $T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 m_i \dot{\mathbf{R}}_i^2$  – системанинг кинетик энергияси,  $V$  – фрагментлар орасидаги түлиқ ўзаро таъсир потенциали,  $m_i$  –  $i$ -чи ядронинг массаси.

Жараён  $x$  ва у текислигига бўлгани учун ҳаракат тенгламалари қуидагича:

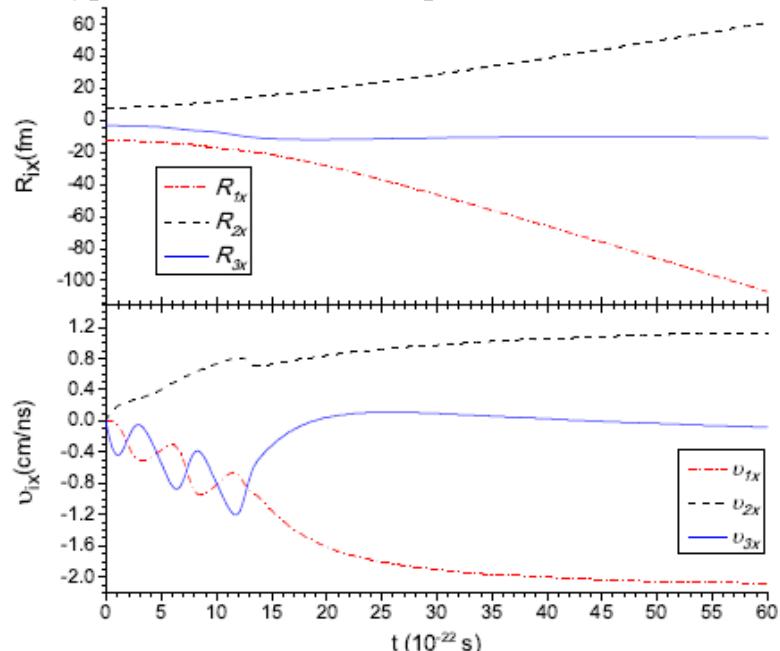
$$m_i \ddot{v}_{ix} = - \frac{\partial V}{\partial R_{ix}} \quad (10)$$

Потенциал энергия  $V$  факат  $R_{ij}$  нисбий масофага боғлиқ бўлгани учун (14) тенгламани қуидагича ёзиш мумкин:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{v}_{1x} = - \frac{R_{12x}}{R_{12}} \frac{\partial V}{\partial R_{12}} + \frac{R_{13x}}{R_{13}} \frac{\partial V}{\partial R_{13}} \\ m_2 \ddot{v}_{2x} = + \frac{R_{12x}}{R_{12}} \frac{\partial V}{\partial R_{12}} + \frac{R_{23x}}{R_{23}} \frac{\partial V}{\partial R_{23}} \\ m_3 \ddot{v}_{3x} = - \frac{R_{23x}}{R_{23}} \frac{\partial V}{\partial R_{23}} - \frac{R_{13x}}{R_{13}} \frac{\partial V}{\partial R_{13}} \end{cases} \quad (11)$$

$y$ -компонента учун симметрик 3 та тенглама олиш мумкин. Импулс сақланиш қонунини  $\sum_{i=1}^3 m_i v_{ix} = 0$  инобатга олиб (чунки  $^{252}\text{Cf}$  нинг спонтан бўлининиши учун  $\mathbf{P}_{c.m.} = 0$ ), (11) формулалардаги тенгламалар сони биттага қисқаради. (11) формулалардан кўринадики, ҳаракат динамикаси түлиқ ўзаро таъсир потенциали ҳосиласига кучли боғлиқ. Тўлиқ ўзаро таъсир потенциалининг хисоблаш методи учинчи бобда келтирилган.

Учинчи бобда қайд этилганидек,  $^{252}\text{Cf}$  ядросининг ўз-ўзидан учга бўлининида эҳтимоллиги энг катта канал – бу  $^{70}\text{Ni} + ^{50}\text{Ca} + ^{132}\text{Sn}$ . 6-расмда  $^{70}\text{Ni}$  – биринчи ядро (чапда жойлашган),  $^{132}\text{Sn}$  – иккинчи ядро (ўнгда жойлашган),  $^{50}\text{Ca}$  эса – учинчи (ўртада жойлашган) ядро.

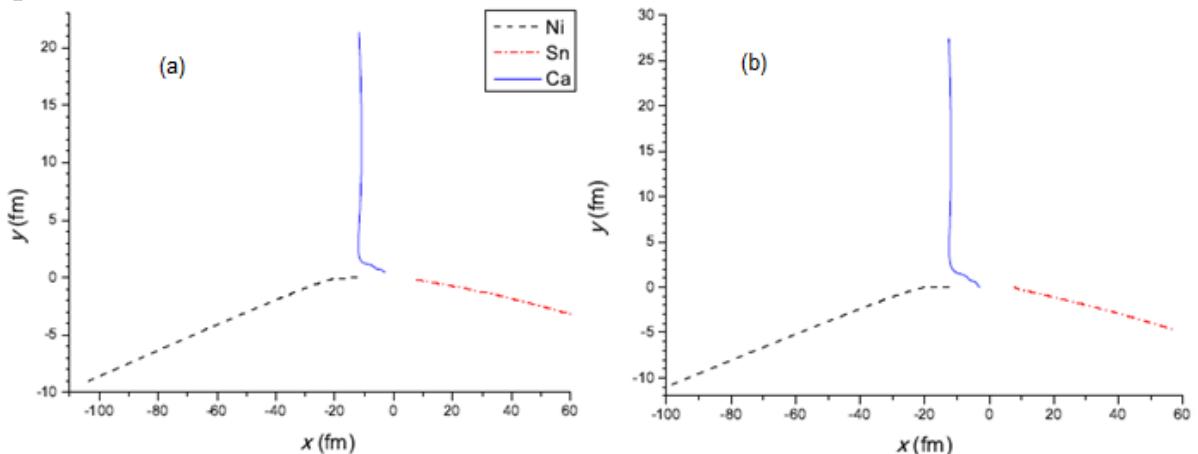


8-расм. Вакт функцияси сифатида учта ядро координаталарининг (юқоридаги) ва тезликларининг (пастдаги)  $x$  компонентаси

Коши масаласига мос келувчи бошланғич шартларнинг учта ҳолини күрамиз. Биринчи ҳол – бошида ҳамма ядролар бир чизиқда жойлашган. Чунки, УЯС коллинеар конфигурациянинг бўлиниш арафасидаги энергияси бошқа конфигурацияларга нисбатан кичик ва тўлиқ потенциалнинг ядролар орасидаги нисбий масофага боғлиқлигидаги локал минимумга мос келади. Учта ядронинг бошланғич тезликларининг иккала ( $x$  ва  $y$ ) компоненталари, яъни УЯС фрагментларининг шаклланиши шу даражада секинки, фрагментлар нол (ёки жуда кичик) тезликка эга. Юқорида айтилган бошланғич шартлар билан ечилган (11) ҳаракат тенгламасининг ечими 8-расмда кўрсатилган. Муҳим натижада сифатида шуни айтиш мумкинки, система бўлингандан кейин учинчи ядро ( $\text{Ca}$ )  $x$  ўқи бўйлаб координатасини деярли ўзгартирмаяпти, чунки унинг тезлиги нол. Бу дегани, ўртадаги ( $\text{Ca}$ ) ядрони экспериментда кузатишни деярли иложи йўқ. Бу холоса иккинчи бобда олинган натижани тасдиқлади.

Иккинчи ва учинчи ҳолларда барча бошланғич шартлар аввалгидек, аммо мос равишда ўртадаги ядро бироз юқорида жойлашган, яъни  $R_{3y}(t=0)=0,5$  фм ва ўртадаги ядро тезлигининг  $y$ -компоненти  $v_{3y}(t=0)=0,1$  см/нс. Ҳисоблаш натижалари 9-расмда келтирилган. Расмдан кўринадики, кальций ядроси жойлашувишининг координата бошидан у ўқида 0,5 фм га оғиши ёки унинг бошланғич тезлигининг  $y$ -компоненти нолга тенг бўлмаслиги ноколлинеар бўлиниш учун етарли ва иккала ҳолда ҳам траекториялар бир-бирига жуда ўхшаш.

Барча ҳолларда бўлиниш тартиби бир хил, яъни бошида ёк  $\text{Sn}$  ядроси  $\text{Ni}+\text{Ca}$  системадан ажралади, сўнгра  $\approx 1,4 \times 10^{-21}$  с вақтдан кейин  $\text{Ni}+\text{Ca}$  система парчаланади.



**9-расм. 8-расмдагидек бошланғич шартли, аммо  $R_{3y}(t=0)=0,5$  фм (а) ва  $v_{3y}(t=0)=0,1$  см/нс (б) ҳоллар учун учта бўлинувчи ядроларнинг траекториялари**

8 ва 9 расмлардан шуни холоса қилишимиз мумкинки, агар факат ҳамма ядролар бир ўқда жойлашса ( $R_{iy}=0$ ) ва ўртадаги ядро бошланғич тезлигининг  $y$ -компоненти бўлмаса ( $v_{3y}=0$ ), унда коллинеар бўлиниш рўй беради.

Иловада иккита деформацияланган ядроларнинг ядро ва Кулон қисмларидан иборат ўзаро таъсир потенциалининг аниқ кўриниши келтирилади. Кулон қисмини ҳисоблаш учун Вонг формуласи ва иккиталик

букилиш методи билан ҳисобланадиган ядро қисми учун формулалар келтирилган.

## ХУЛОСА

“Уч кластерли коллинеар бўлиниш механизмлари” мавзусидаги диссертация бўйича ўтказилган назарий тадқиқотлар натижасида қўйидаги хулосалар тақдим этилди:

1.  $^{235}\text{U}(\text{n}_{\text{th}}, \text{f})$  реакциясида ҳосил бўлган ғалаёнланган  $^{236}\text{U}^*$  компаунд ядро кетма-кет механизм бўйича уч кластерга коллинеар бўлинса, маҳсулотлар  $^{82}\text{Ge}^*$ ,  $^{72}\text{Ni}^*$  ва  $^{82}\text{Ge}$  бўлади. УККБ учун бу каналнинг эҳтимоллиги бошқа каналларга қараганда каттароқ ва унинг иккига бўлинишга эҳтимоллигига нисбати  $3 \cdot 10^{-4}$  га teng. Бу ҳисобланган натижа экспериментда олинган қийматга яқин. Аммо масса сони  $M=132-138$  га teng маҳсулотлар чиқишини бу механизмда ҳисоблаб бўлмайди.

2. УККБнинг “деярли кетма-кет механизм” деб номланган иккинчи механизммининг амалга ошиш эҳтимоллиги энг катта, чунки оғир фрагментнинг ( $^{132}\text{Sn}$  ядросининг) Кулон майдони сабабли  $^{70}\text{Ni}$  ва  $^{50}\text{Ca}$  орасидаги ўзаро таъсирдаги бўлиниш арафаси тўсиқни камайишини ҳисобга олади. Бу  $^{132}\text{Sn}$  ядросининг жойлашуви  $^{70}\text{Ni} + ^{50}\text{Ca}$  системанинг бўлиниши учун унга яқин бўлиши кераклигини англатади.

3. Энергия ва импульс сақланиш қонуни билан боғлиқ тенгламаларнинг ечими шуни кўрсатадики,  $^{252}\text{Cf} \rightarrow ^{70}\text{Ni} + ^{50}\text{Ca} + ^{132}\text{Sn}$  реакцияда ўртадаги ядронинг (Са) тезлиги деярли нолга teng. Шунинг учун Са ядросини экспериментда кузатиш қийин.

4.  $^{252}\text{Cf}$  ядросининг спонтан бўлиниши учун ҳисобланган тўлиқ ўзаро таъсир потенциали натижасидан шуни хулоса қилиш мумкинки, агар  $R_{12}$  (чекка Ni ва Sn фрагментларни боғлаб турувчи чизик) 21 fm дан кичик бўлса, чекка ядролар ўртадаги ядрони (Са) коллинеар ҳолдан чиқаради ва УЯС учбурчак конфигурацияга эга бўлади.  $R_{12}=21-22$  fm каби катта қийматларда потенциал ўранинг минимуми  $R_{12}$  чизиқка кўчади ва УЯС учун коллинеар конфигурация авфзал.

5. Агар бўлиниш арафаси босқичида УЯСнинг ҳамма ядролари потенциал энергия сирти минимумига мос келувчи коллинеар жойлашган бўлса ва у ўқида учинчи ядрога (Са) teng таъсир этувчи куч бўлмаса (ёки бошланғич тезлигининг у компоненти нолга teng бўлса), у ҳолда учталик ядро системаси коллинеар бўлиниши мумкин. Бошқа бошланғич шартлар ноколлинеар учга бўлинишга олиб келади.

6. Барча ҳолларда УЯСнинг ( $^{70}\text{Ni} + ^{50}\text{Ca} + ^{132}\text{Sn}$ ) бўлиниш вақти деярли бир хил  $1,4 \cdot 10^{-21}\text{s}$  атрофидаги қийматга эга. Бу эса вақт бошланғич шартга деярли боғлиқ эмаслигини англатади. Бунга бўлинишнинг кетма-кетлиги сабаб: олдин Sn ядроси Ni+Ca системадан ажралади, сўнгра Ni ядроси Са ядросидан ажралади.

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

---

**INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

**TASHKHODJAEV RUSTAM BAKHODIRKHODJAEVICH**

**MECHANISMS OF COLLINEAR CLUSTER TRIPARTITION**

**01.04.08 – Atomic nucleus and elementary particle physics.  
Acceleratory facilities**

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

**Tashkent – 2017**

**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.B2017.1.PhD/FM28.**

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](http://www.inp.uz) and on the website of “Ziyonet” informational and educational portal at www.ziyonet.uz.

**Scientific consultant:**

**Nasirov Avazbek Karimovich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher

**Official opponents:**

**Usmanov Pazliddin Nuritdinovich,**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor

**Khugaev Avas Vasilyevich**

Doctor of Philosophy (PhD) in Physics and Mathematics

**Leading organization:**

**Physical-Technical Institute of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan**

Tashkent

The defense of the dissertation will be held on “\_\_\_” 2017, at \_\_\_ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics, Astronomical Institute, National University of Uzbekistan (Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-60, fax (+99871) 289-31-18; e-mail: info@inp.uz).

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

The abstract of dissertation was distributed on “\_\_\_” 2017.

(Registry record No. \_\_\_ dated “\_\_\_” 2017.)

**M.Yu. Tashmetov**  
Chairman of the Scientific Council  
on Award of Scientific Degrees,  
D.Ph.-M.S.

**R. Yarmukhamedov**  
Scientific Secretary of the Scientific Council  
on Award of Scientific Degrees,  
D.Ph.-M.S., Professor

**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.** Today most experimental data have been collected on the physics of nuclear reactions in heavy ion collisions. These data require to be understood by suitable and non-contradictory models. The topicality of theoretical investigation of the spontaneous and induced fission of heavy nuclei is related to the absence of full understanding of fission processes. It requires new theoretical methods to analyze the known experimental data of fission products. Systematization of the obtained experimental results and establishment of analyses and regularities in them allow studying the realistic mechanisms of heavy nuclear fission. There are a lot of theoretical models created in various scientific centers, but no one of them can fully describe ternary fission with the yield of products with almost the same mass numbers.

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 and particular binary and ternary fission of nuclei has significant meaning in the Strategy of Actions on Further Development of Uzbekistan.

Now, in the world, there are different theoretical models created in various scientific centres, but no one model can explain ternary fission with almost the same fragments. The current dissertation work is the original investigation of the ternary and multicluster fission by the author. Of course, these processes constitute less than one percent out of all events of fission, but knowledge of their nature allows us to better understand the conventional nuclear fission process. Multicluster fission exists due to the shell structure of nuclear matter, so both theoretical and experimental knowledge of the nature of multicluster fission in different nuclei contribute to build a full fission mechanism that increases practical application of its regularity.

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, 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” of 7 February 2017 and others.

**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.** Until today leading scientists of the world, for example, German scientists (A.R. Degheidy, J.A. Maruhn, H. Diehl, W. Greiner, F. Gonenwein, W. von Oertzen, J.P. Theobald, P. Heeg and M. Mutterer), Russian scientists (Yu.V. Pyatkov, D.V. Kamanin, A.V. Karpov, V.A. Rubchenya and S.G. Yavshits), American scientists (M.L. Muga and C.R. Rice), Swedish scientists (P. Holmvall and U. Köster), Indian scientists (K. Manimaran, K.R. Vijayaraghavan and M. Balasubramaniam) and others have done a number of investigations to study the statistic and dynamic properties of fission of heavy nuclei experimentally and theoretically.

Properties of heavy ion (U, Cf, Th, Pu etc.) fission products, like yield, kinetic energy, and angular distribution have been studied by such Uzbek scientists as V.P. Pikul, Yu.N. Koblik, A.K. Nasirov and others. To describe nuclear reactions with heavy ions, the dinuclear system model has been created by the scientists of the Joint Institute of Nuclear Researches (Russia) and the Institute of Nuclear Physics (Uzbekistan).

Earlier the investigation of ternary fission included only a binary fission with accompanied light charged particles, i.e. He, Li, Be etc. In this mode of ternary fission, middle fragment (light nucleus) flies perpendicular to binary fission line and the heaviest emitted cluster is sulfur nucleus. But later the experimental group (FOBOS) from Russia started to study another type of ternary fission – collinear cluster tripartition (hereinafter CCT). These ternary fission products (clusters) fly almost in one line and their masses have around the same value, i.e. middle fragment can have larger mass numbers (<100).

After publication of the results of the FOBOS experiments, the number of the theoretical researches by Indian scientists has increased. Especially, charge and mass numbers of fragments were estimated by calculating the yield of products, and possible configuration by calculating the total potential energy in their theoretical papers. Main deficiency of this theory is that one barrier was used for two necks (or overlapping surfaces), which means that the fragments can be separated only simultaneously. This limitation was not taken into account by authors.

Taking into account the current status of the problem, we tried to investigate various mechanisms of ternary fission of heavy nuclei, especially uranium and californium nuclei.

**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).

**The aim of the research** is development of a theoretical formalism describing mechanisms of collinear cluster ternary fission of heavy nuclei and identification of conditions leading to collinearity of fission.

### **The tasks of the research:**

calculating the total interaction potential of dinuclear system for describing the sequential collinear (prolate) ternary fission in the  $^{235}\text{U}(\text{n}_{\text{th}},\text{f})$  reaction;

finding the charge distribution (yield of products) of the sequential collinear (prolate) ternary fission in the  $^{235}\text{U}(\text{n}_{\text{th}},\text{f})$  reaction;

studying the dependence of the total interaction potential on the distance between the heaviest ( $^{132}\text{Sn}$ ) and middle ( $^{50}\text{Ca}$ ) clusters in collinear (prolate) configuration in spontaneous ternary fission of  $^{252}\text{Cf}$ ;

calculating the yield of products formed by the almost sequential mechanism collinear cluster tripartition of  $^{252}\text{Cf}$ ;

studying the role of the distance between edge fragments ( $^{70}\text{Ni}$  and  $^{132}\text{Sn}$ ) in shape of total interaction potential in non-collinear (oblate) configuration in the  $^{252}\text{Cf(sf)}$  reaction;

getting the Lagrange equation of motion for the true ternary fission in the  $^{252}\text{Cf(sf)}$  reaction;

solving the equation of motion with different initial conditions (Cauchy problem);

finding the initial conditions which lead to collinear ternary fission.

**The objects of the research** are heavy nuclei, products of ternary fission and clusters.

**The subjects of the research** are total interaction potential between two (and three) nuclei, yield of ternary fission products, initial states of the system which consist of three interacting nuclei.

**The methods of research.** On the theoretical level, 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:

a new trinuclear system model to describe true ternary fission process was developed, and it was revealed that in some cases collinear ternary fission takes place in nature;

it was found that in sequential collinear ternary fission more possible channel is  $^{82}\text{Ge}+^{72}\text{Ni}+^{82}\text{Ge}$  in the  $^{235}\text{U}(\text{n}_{\text{th}},\text{f})$  reaction;

it was shown that the location of  $^{132}\text{Sn}$  close to the  $^{72}\text{Ni}+^{50}\text{Ca}$  is important to be collinear ternary fission at the same time way;

it was also shown that fission the barrier between  $^{72}\text{Ni}$  and  $^{50}\text{Ca}$  is higher than that of  $^{50}\text{Ca}$  and  $^{132}\text{Sn}$ , i.e. separation of  $^{132}\text{Sn}$  from the system  $^{72}\text{Ni}+^{50}\text{Ca}$  is easier;

it was shown that the initial condition at pre-scission stage of trinuclear system is important for its decay which leads to a collinear fission.

**Practical results of the research** consist of the following:

more possible channel of sequential collinear cluster tripartition of the excited  $^{236}\text{U}$  is  $^{82}\text{Ge}+^{72}\text{Ni}+^{82}\text{Ge}$  in agreement with experimental data was obtained;

it was shown that at spontaneous fission of  $^{252}\text{Cf}$  the probability of collinear ternary fission of the  $^{70}\text{Ni}+^{50}\text{Ca}+^{132}\text{Sn}$  channel is more comparing with other channels, and rupture of neck between Ca and Sn nuclei occurs earlier than Ni and Ca. The difference of the rupture time should be too short;

at the spontaneous fission of  $^{252}\text{Cf}$  the velocity of the middle fragment ( $^{50}\text{Ca}$ ) is close to zero, and hence the possibility of the experimental observation of this fragment is rather small;

it was found that if the relative distance between Ni and Sn nuclei is less than 21 fm, then repulsive Coulomb force extrudes Ca nuclei from the collinear position, meanwhile the minimum position of Ca moves to collinear line with the increasing of the relative distance;

it was shown that from the dynamical calculation of true ternary fission of  $^{252}\text{Cf}$  there is just one initial condition that leads to collinear fission: mass centres of three nuclei lie in one line and the perpendicular component of the middle fragment's velocity to the collinear line is zero. All other initial conditions of the pre-scission state result in non-collinear ternary fission;

it was found that the breakup of  $^{50}\text{Ca}$  from  $^{70}\text{Ni}$  occurs around  $1.35 \times 10^{-21}$  seconds later than the separation of  $^{132}\text{Sn}$  from  $^{70}\text{Ni} + ^{50}\text{Ca}$  system. This time is very small compared with the time of a usual binary fission ( $\sim 10^{-19}$  s).

**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 is determined by the ability of the developed formalism in the dissertation to analyze the properties of ternary fission fragments obtained by new experimental data and results of different theoretical models. For the first time, theoretical investigation of collinearity of products was carried out by the researcher, and this is important in understanding the nature of ternary fission of heavy nuclei.

The practical significance of the research results lies in the fact that they can be used to obtain more possible configurations of a ternary system and to define its fission channels. Created calculation method can be used to estimate different parameters of ternary fission products such as charge, mass, temperature, as well as the angular distribution that shows the type of ternary fission. The results can also be useful for the analysis of the nature and dynamics of nuclear reaction mechanisms, and in the development of observational experiments and criteria for the detection and identification of clusters.

**Implementation of the research results.** Great probability of collinear ternary fission of the  $^{70}\text{Ni} + ^{50}\text{Ca} + ^{132}\text{Sn}$  channel at spontaneous fission of  $^{252}\text{Cf}$  comparing with other channels was used by international journals (Journal of Physics G, 2017; Physical Review C, 2016; Physical Review, 2017) to define a channel of collinear cluster tripartition. The use of the scientific research result has given chance to define collinear ternary fission of heavy nuclei.

Possibility of non collinear ternary decay at more than 24 fm of the distance between Ni and Sn at ternary fission of  $^{252}\text{Cf}$  was used by international journals (International Journal of Physics E, 2016; European Physical Journal A, 2017; Physical Review C, 2017) to define collinearity or non collinearity of

fission. The use of the scientific research result has given chance to define cases of non collinear fission.

**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 17 scientific works were published, including 8 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.**

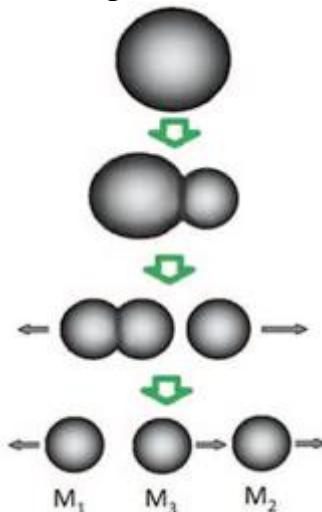
The dissertation is presented on 103 pages consisting of an introduction, four chapters, a conclusion, an appendix and a bibliography.

## THE MAIN CONTENTS OF THE DISSERTATION

**In the introduction**, the topicality and relevance of the dissertation theme are justified, the aims and objectives are formulated, the scientific novelty and the practical results of the study are set out, the reliability of the obtained results is proved and their theoretical and practical significance are disclosed, a summary of the implementation of the research results and the structure of the dissertation are given.

The first chapter of the dissertation titled “**Collinear cluster tripartition as sequential binary fission in the  $^{235}\text{U}(\text{n}_{\text{th}},\text{f})$  reaction**” is devoted to the study of the true ternary fission of  $^{235}\text{U}$  induced by thermal neutrons. The ternary fission process has been considered as sequential binary fission, and the fission products, which fly in one line, have close mass numbers.

For the description of mass and charge distributions of fission products of heavy nuclei, the concept of the dinuclear system (DNS) has been applied. Actually, at the descent from the saddle point to the scission point, the fissile nucleus looks like a dumbbell and changes its shape and mass (charge) asymmetry by nucleon exchange. Therefore, the mass and charge numbers of the being formed products are changed up to the scission of necks connecting the fragments. The initial stage of fission, when the shape of the fissionable nucleus transforms from the compact form into the double nuclear system, is not considered in the dissertation. The charge distribution of the fragments is calculated after the formation of DNS. In the case of the DNS with a large-neck parameter, the DNS model is not acceptable because the DNS concept proposes the smallness of the neck connecting the two interacting nuclei relatively with their whole volume. Collinear cluster tripartition can be assumed to be the two-stage fission of the sequential binary fissions shown in Figure 1.

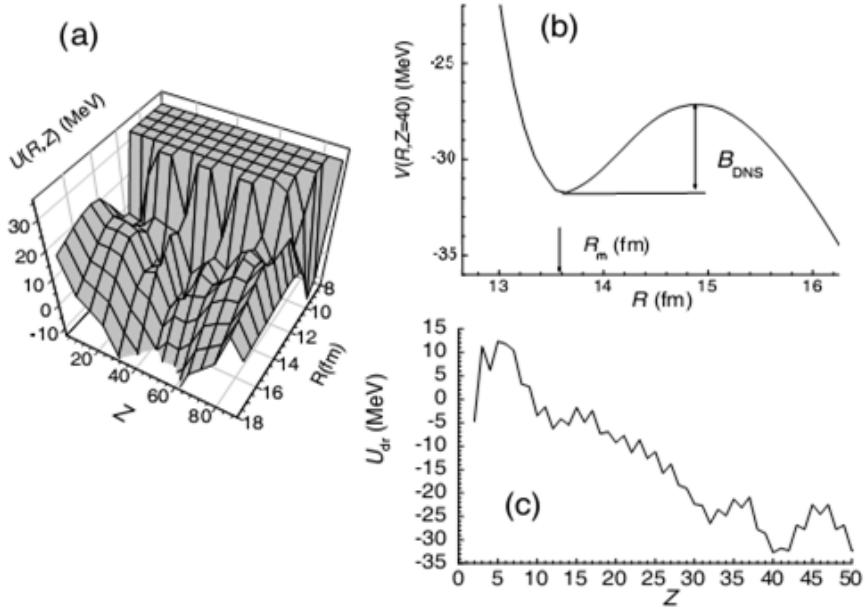


**Figure 1. The illustration of the sequential collinear cluster tripartition of a heavy nucleus.**

The change of the DNS total energy is the sum of the changes of the energy reaction balance ( $Q_{gg}$ -value) and nucleus-nucleus interaction potential  $V(Z, A, R)$  between its constituents:

$$V(Z, A, R) = V_{int}(Z, A, R) + Q_{gg}(Z, A). \quad (1)$$

The  $Q_{gg}$ -value represents the change of the internal energy of the system during the reaction:  $Q_{gg} = B_1(Z, A) + B_2(Z_{\text{CN}} - Z, A_{\text{CN}} - A) - B_{\text{CN}}(Z_{\text{CN}}, A_{\text{CN}})$ , where  $B_1$  and  $B_2$  ( $Z$  and  $Z_{\text{CN}} - Z$ ) are binding energies (charge numbers) of the DNS constituents. Binding energies are taken from well-known tables of the nuclear experimental data. In Figure 2(a), the potential energy surface  $V(Z, R)$  is presented as a function of the relative distance between the fragments and the charge number  $Z$  of a fragment. The nucleus-nucleus potential  $V_{int}(R)$  shown in Figure 2(b) corresponds to the interaction between fragments  $^{A_1}Z_1$  and  $^{A_2}Z_2$ . The mass numbers  $A_1$  and  $A_2$  corresponding to the charge numbers  $Z_1$  and  $Z_2$  provide minimal values of the potential-energy surface. The mass number  $A$  of a fragment was found from the minimization of the total potential energy of the fissioning system at the given charge number  $Z$ .



**Figure 2.** Potential-energy surface for  $^{236}\text{U}$  as a function of the relative distance  $R$  and fragment's charge number  $Z$  (a); nucleus-nucleus potential  $V(R)$  corresponding to the interaction of DNS  $^{102}\text{Zr}+^{134}\text{Te}$ ; the depth of the potential well is the barrier  $B_{\text{DNS}}$  against to decay of DNS (b); driving potential for  $^{236}\text{U}$  (c).

The method of calculation of interaction potential  $V_{int}(Z, A, R)$  is based on the double-folding procedure with the Migdal effective force between nucleons. The advance of the use of the effective nucleon-nucleon potential by Migdal is related to its sensitivity to the nucleon density of the surrounded area. The presence of the potential well allows DNS nuclei to be in interaction by multinucleon transfer before the decay into two fragments.

The driving potential has been found by connecting the minima of the potential well ( $V_{int}(R_m)$ ) of the nucleus-nucleus interaction (see Figure 2(b)) calculated for each charge asymmetry of the DNS, i.e. it is the curve lying on the bottom of a valley of the potential-energy surface along the  $Z$ -axis  $2 < Z < 90$ . If we use  $R_m(Z)$  to show the value of  $R$  corresponding to the bottom of the potential well for the DNS with the charge asymmetry  $Z$ , then the driving potential is defined by using (1) as

$$U_{dr}(Z, A) = V_{int}(Z, A, R_m(Z)) + Q_{gg}(Z, A). \quad (2)$$

The decay of the DNS may be analyzed as statistical process, i.e. statistical equilibrium in the charge (mass) distribution of the system can be established in dependence on the given excitation energy and height of the barrier hindering its decay into two fragments. The charge (mass) distribution of the fission fragments yield  $Y(Z)$  depends on the charge distribution of the DNS fragments  $P(Z)$  and decay probability  $W(Z)$  of the DNS from the given charge-asymmetry state  $Z$ :

$$Y(Z) = Y_0 P(Z) W(Z), \quad (3)$$

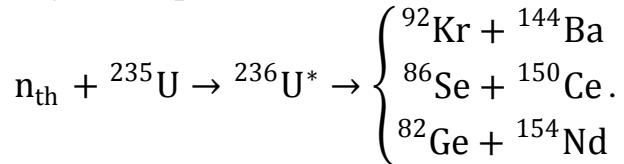
$$P(Z) = P_0 e^{-U_{dr}(Z)/T_{DNS}(Z)}, \quad (4)$$

$$W(Z) = W_0 e^{-B_{DNS}(Z)/T_B(Z)}, \quad (5)$$

where  $T_{DNS}(Z) = \sqrt{\frac{E_{DNS}^*}{a}}$  and  $T_B(Z) = \sqrt{\frac{B_{DNS}}{a}}$  are the effective temperature of the system in minimum and on the barrier (or at the scission point), correspondingly,  $a = \frac{A_{CN}}{12 \text{ MeV}}$  is level density parameter.  $E_{DNS}^*$  is excitation energy of DNS, and  $B_{DNS}(Z)$  is the scission barrier for the decay of the DNS (see Figure 2(b)).  $Y_0$ ,  $P_0$  and  $W_0$  are normalizing coefficients for the corresponding probability distributions.

According to the sequential mechanism of CCT (see Figure 1), when one of the two binary fission products undergoes to the sequential fission, the second and the third products are formed. The other first fission product is obligatorily registered by the detector and one of two sequential fission products is registered by the opposite detector. Another product of the sequential fission is missed.

When we consider the first binary fission of  $^{236}\text{U}$  by the thermal neutron with energy  $E_{n_{th}} = 0.025 \text{ eV}$ , besides binary fission channels, we shall see the maximum region in the yield of products:



These channels can lead to CCT products. If we take Ba, Ce and Nd nuclei as heavy fragments, and calculate the yield of CCT products, then we get the results shown in Table 1.

**Table 1. The calculated realization probabilities of different sequential channels for the collinear cluster tripartition of  $^{236}\text{U}^*$ .**

Fission channels $^{236}\text{U}^* \rightarrow f_1 + f_2$	Fission channels of primary heavy fragment	Yields of CCT
$^{82}\text{Ge} + ^{154}\text{Nd}^*$	$^{154}\text{Nd}^* \rightarrow ^{72}\text{Ni}^* + ^{82}\text{Ge}^*$	$3 \cdot 10^{-4}$
	$^{154}\text{Nd}^* \rightarrow ^{76}\text{Zn}^* + ^{78}\text{Zn}^*$	$1.5 \cdot 10^{-4}$
$^{82}\text{Se}^* + ^{154}\text{Ce}^*$	$^{154}\text{Ce}^* \rightarrow ^{68}\text{Fe}^* + ^{86}\text{Ge}^*$	$1.0 \cdot 10^{-5}$
	$^{154}\text{Ce}^* \rightarrow ^{72}\text{Ni}^* + ^{82}\text{Zn}^*$	$1.4 \cdot 10^{-5}$
$^{92}\text{Kr}^* + ^{144}\text{Ba}^*$	$^{144}\text{Ba}^* \rightarrow ^{62}\text{Cr}^* + ^{82}\text{Ge}^*$	$9 \cdot 10^{-6}$
	$^{144}\text{Ba}^* \rightarrow ^{72}\text{Ni}^* + ^{72}\text{Ni}^*$	$1 \cdot 10^{-7}$

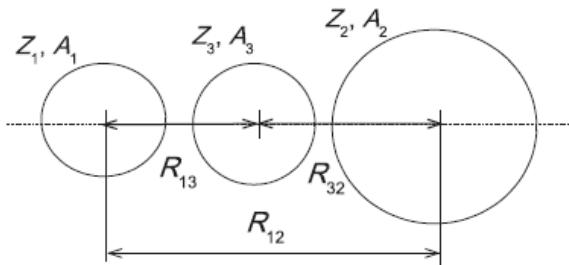
From Table 1 it can be seen that the most possible channel of CCT is  $^{236}\text{U}^* \rightarrow ^{82}\text{Ge} + ^{72}\text{Ni} + ^{82}\text{Ge}$  whose yield is  $3 \cdot 10^{-4}$ .

If we take into account the number of emitted neutrons from the excited fission fragments, then we obtain that the number of emitted neutrons from each of  $^{72}\text{Ni}^*$  and  $^{82}\text{Ge}^*$  is 2, consequently the total number of neutrons is 4. Finally, in the framework of DNS, the most possible channel of CCT is  $^{236}\text{U}^* \rightarrow ^{82}\text{Ge} + ^{70}\text{Ni} + ^{80}\text{Ge} + 4\text{n}$ .

The fragment masses within the framework of the current cascade mechanism of collinear cluster tripartition are not more than  $\sim 84$  a.m.u. But in the experiment, the products with the mass number of more than 84 are observed. This reason motivates to consider the ternary fission in different ways. So, another mechanism of ternary fission is discussed in the second chapter of the dissertation.

The second chapter of the dissertation titled “**Almost sequential mechanism of true ternary fission**” is devoted to another mechanism of the true ternary fission. The difference between this mechanism and the mechanism which is described in the first chapter is that in the almost sequential mechanism, the intermediate time of ruptures of two necks between nuclei (see the third stage in the Figure 1) is too small. To reach this result, the new theoretical model – trinuclear system (TNS) based on the dinuclear system model was developed in this chapter.

The collinear configuration of the TNS undergoing fission is defined as follows: first, the three fragments are situated in *one fission line* due to the minimal value of the total energy of TNS. The border nuclei are numbered “1” and “2”, while the middle nucleus is labeled as “3”, as shown in Figure 4. Consequently, there is no nuclear interaction between the outer fragments 1 and 2. The definitions of the variables of TNS used in this analysis are illustrated in Figure 3:



**Figure 3. Collinear configuration of TNS fragments.**

The minima of the potential-energy surfaces (PESs) are found by the variation of the charge and mass numbers of the two outer fragments of TNS and the distances between them. The PES is the two-dimensional driving potential which depends on the charge numbers of two fragments of the collinear TNS. The distances  $R_{13}$  and  $R_{32}$  between the centers of mass of fragments are found from the minimum value of the nucleus-nucleus interaction.

The PES is calculated as

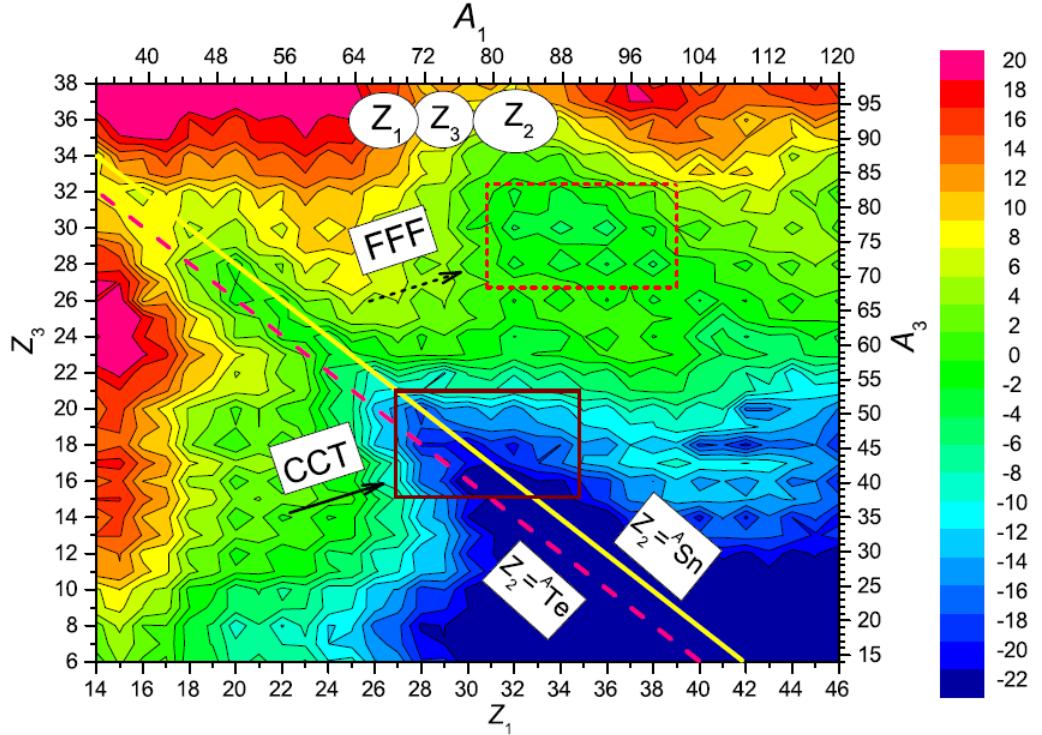
$$\begin{aligned} & U(Z_1, A_1, \beta^{(1)}, Z_2, A_2, \beta^{(2)}, Z_3, A_3, \beta^{(3)}, R_{13}, R_{32}) \\ & = V_{int}(Z_1, A_1, \beta^{(1)}, Z_2, A_2, \beta^{(2)}, Z_3, A_3, \beta^{(3)}, R_{13}, R_{32}) \\ & + Q_{ggg}(Z_1, A_1, Z_3, A_3), \end{aligned} \quad (6)$$

where  $Z_i$  and  $A_i$  are the charge and mass numbers of the  $i^{\text{th}}$  fragment of the TNS ( $i=1,2,3$ ) respectively, and  $R_{ij}$  is the distance between the mass centers of the  $i^{\text{th}}$  and  $j^{\text{th}}$  fragments. Here,  $\beta^{(i)} = \{\beta_2^{(i)}, \beta_3^{(i)}\}$  is a set of deformation parameters of fragment  $i$ , where  $\beta_2^{(i)}$  and  $\beta_3^{(i)}$  represent the quadrupole and octupole parts, respectively. As was mentioned in the first chapter, the interaction potential  $V_{int}$  contains two parts; namely, the nuclear part  $V_{nuc}^{ij}$  and the Coulomb part  $V_C^{ij}$ . It is clear that  $V_{nuc}^{12} = 0$  since the fragments 1 and 2 are separated by the fragment 3 and, therefore, there is no overlap of their nucleon densities. There is only Coulomb interaction between them. In Equation (6),  $Q_{\text{ggg}}$  is the reaction balance energy in ternary fission.

In order to calculate the mass and charge distributions of the TNS in the pre-scission state, the minima and valleys of the PESs are determined by computing the interaction potential  $V_{int}$  as a function of  $(Z_1, A_1, Z_3, A_3, R_{13}, R_{32})$  since  $(Z_2, A_2)$  can be defined through  $(Z_1, A_1, Z_3, A_3)$  and  $R_{12} = R_{13} + R_{32}$ . This is done by taking  $V_{int}$  as a function of  $R_{13}$  and  $R_{32}$  for each configuration of  $\{Z_1, A_1; Z_3, A_3; Z_2, A_2\}$  (see Figure 3 for the geometry).

The two-dimensional driving potential  $U_{dr}(Z_1, A_1; Z_3, A_3)$  is determined by the values of the PES in Equation (6) corresponding to the minimum values of the potential wells in the nucleus-nucleus interaction  $V_{int}$  between neighbor fragments as a function of the distances between their centers of mass:

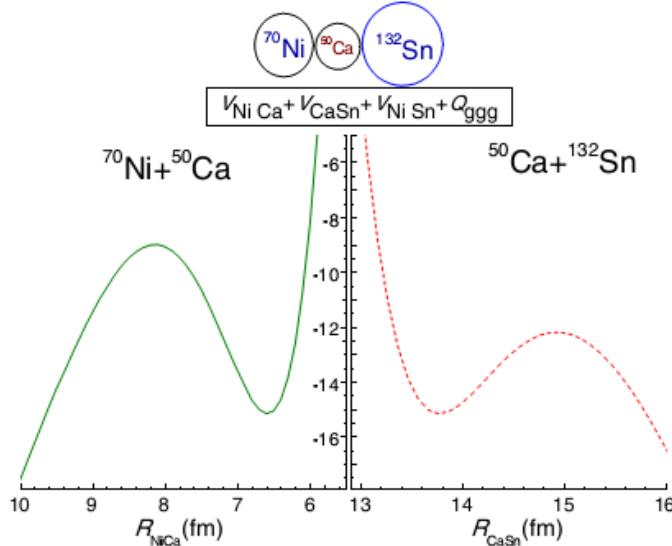
$$U_{dr}(Z_1, A_1, \beta^{(1)}, \beta^{(2)}, Z_3, A_3, \beta^{(3)}) = U(Z_1, A_1, \beta^{(1)}, \beta^{(2)}, Z_3, A_3, \beta^{(3)}, R_{13}^{(\min)}, R_{32}^{(\min)}) \quad (7)$$



**Figure 4. The potential-energy surface ( $U_{dr}$ ) of the  $^{252}\text{Cf}$  (sf,fff) reaction.**

The result of the calculation of the driving potential by formula (7) for  $^{252}\text{Cf}$  nucleus is given in Figure 4. The rectangle “CCT” shows the area of the mass numbers  $Z_1(A_1)$  and  $Z_3(A_3)$  which corresponds to the CCT products. The rectangle “FFF” shows the area of formation of three fragments with the similar mass numbers. The solid and dashed lines show the TNS configuration having  $^{132}\text{Sn}$  and  $^{134}\text{Te}$ , respectively, as the outer nucleus  $Z_2$ . So, we can see the valley, which is the minimal energy area ( $Z_2=50$  and  $Z_2=52$ ) and corresponds to the  $^{252}\text{Cf} \rightarrow f_1 + f_3 + ^{132}\text{Sn}$  and  $^{252}\text{Cf} \rightarrow f_1 + f_3 + ^{134}\text{Te}$  fission channels. The valley extends up to the area of about  $Z_3=28$ . The TNS configuration of Ni+Ca+Sn has large probability compared with the Ca+Ni+Sn configuration since the PES value of the latter configuration is about 12 MeV higher than that of the previous configuration.

These fragments of the TNS should be emitted from the potential wells and, therefore, it is important to estimate the depths of the potential wells, since the bounded heavy clusters can stay together during a definite long time. For the calculation of the interaction potential  $V_{\text{CaSn}}$ , the distance  $R_{\text{NiCa}}$  is fixed to the value corresponding to the minimum of  $V_{\text{NiCa}}$ , while the  $V_{\text{NiCa}}$  potential is calculated at the fixed value of  $R_{\text{CaSn}}$  that gives the minimum of  $V_{\text{CaSn}}$ . The result is given in Figure 5.



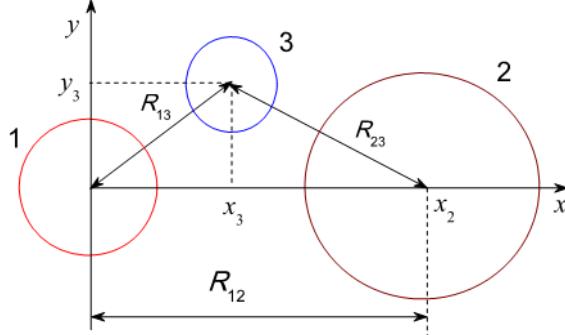
**Figure 5. The pre-scission barriers  $B_{\text{NiCa}}$  and  $B_{\text{CaSn}}$  keeping TNS fragments together.**

The depth of the potential  $V_{\text{NiSn}}$  is the difference between the maximum (on the barrier) and the minimum values of  $V_{\text{int}}$  as a function of  $R_{13}$  in Equation (6). Its value is used as the pre-scission barrier  $B_{\text{NiSn}}$  being a function of the distance  $R_{32}$ . To study the role of the pre-scission barrier at the decay of TNS, we estimate the change of the  $B_{13}$  barrier. The results show that the presence of the third fragment is important to cause the decay of the Ni+Ca system in an easier way. The presence of the third massive fragment Sn makes the pre-scission barrier shallower by 4 MeV, and thus, the decay probability of the Ni+Ca system increases.

The third chapter of the dissertation titled “**Pre-scission configuration of the trinuclear system at spontaneous ternary fission of  $^{252}\text{Cf}$** ” is devoted to the estimation of possible configurations of the trinuclear system. In the first and

second chapters, the collinearity of ternary fission was not discussed. So, in the third chapter, the configurations which are not collinear are considered.

The theoretical approach is based on the TNS model, and as in the second chapter, we use the term “trinuclear system” based on a related model used for DNS. The physical details of the TNS are the same as those for DNS, but there are three interacting nuclei.



**Figure 6. The scheme showing the variables used in the calculation of the potential energy  $V(R_{12}, x_3, y_3)$ .**

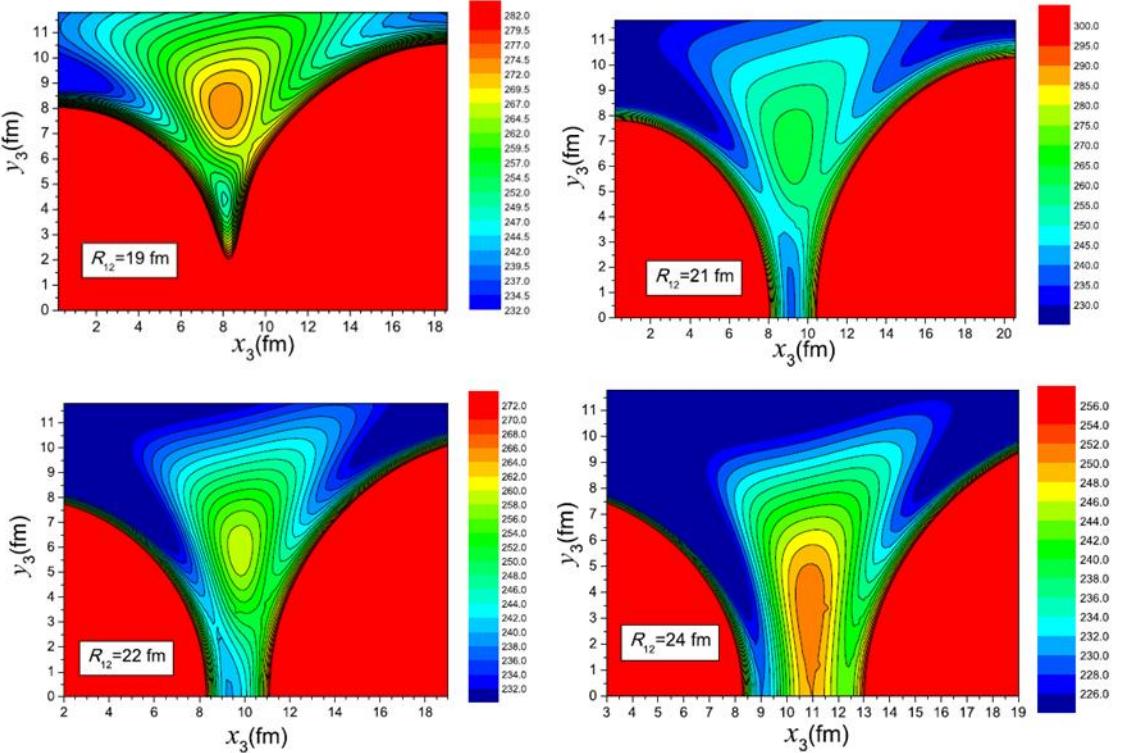
The potential energy is found as the sum of the nuclear and Coulomb interactions between three fragments:

$$V(R_{12}, x_3, y_3) = \sum_{i < j} V_{ij}(R_{ij}, x_3, y_3), \quad (8)$$

$$V_{ij}(R_{ij}, x_3, y_3) = V_{ij}^{(nuc)}(R_{ij}, x_3, y_3) + V_{ij}^{(Coul)}(R_{ij}, x_3, y_3), \quad (9)$$

where  $i,j=1,2,3$  and  $i < j$ . The nucleus-nucleus potentials  $V_{ij}(R_{ij}, x_3, y_3)$  depend on the relative distances  $R_{ij}$  between fragments “ $i$ ” and “ $j$ ” (see Figure 6). The calculation method of interaction potential is the same as was described in the second chapter. The results of calculations of  $V$  as function  $x_3$  and  $y_3$  for the fixed value of  $R_{12}$  are shown in Figure 7. It is seen from the figure that the ternary system has the triangular shape ( $y_3 > 0$ ) for the distances  $R_{12} < 21$  fm since the repulsive Coulomb forces extrude Ca from the collinear position on the axis  $R_{12}$  connecting the centres of masses of Ni and Sn.

The minimum value of the potential well for Ca is large,  $V_{min}(R_{12} = 19 \text{ fm}, x_3 = 8.2 \text{ fm}, y_3 = 4.4 \text{ fm}) = 248.83 \text{ MeV}$ . This is the first property of the Ca position relative to the line  $R_{12}$ . In this case, the position of Ca is similar to the pre-scission states of the light nuclei He, Li, Be, ..., Si, which are placed between two massive nuclei and their emission trajectories are nearly perpendicular to the line  $R_{12}$  in the ternary fission. The second property for the position of the middle Ca nuclei relative to the collinearity axis  $R_{12}$  is the coincidence of the minimum of the potential well in  $V(R_{12}, x_3, y_3)$  with  $R_{12}$ . The centre of the potential well moves to the line  $R_{12}$  by the increase of its value. We can state that the collinear configuration of the TNS is preferable for the values of  $R_{12}=21-22$  fm but the fluctuation of the position of the middle Ca cluster from the collinearity axis can be observed due to the extension of the potential well in  $V(R_{12}, x_3, y_3)$  up to 2 fm around the axis. From Figure 7 it can be also concluded that if TNS decays at  $R_{12} \geq 24$  fm value, then deviation from the collinear fission may take place. To answer this open question, dynamical calculations are done in the next chapter.



**Figure 7.** The potential energy surface  $V(R_{12}, x_3, y_3)$  as a function of the position  $x_3$  and  $y_3$  of the centre of mass of the middle fragment “3” (Ca) for the value of  $R_{12}$  from 19 to 24 fm of the relative distance between centres of mass of fragments “1” and “2”.

The fourth chapter of the dissertation titled “**Dynamics of the trinuclear system at spontaneous fission of  $^{252}\text{Cf}$** ” is devoted to the solution of the Lagrange equations of motion of the decaying trinuclear system to define the collinearity of the fission.

The main task is obtaining the classical Lagrange equations of motion and solving them. The Lagrangian is  $L=T-V$ , where  $T=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^3 m_i \dot{\mathbf{R}}_i^2$  – kinetic energy of the system,  $V$  – total interaction potential between fragments,  $m_i$  is the mass of the  $i^{\text{th}}$  nucleus.

As the process occurs in the  $x$  and  $y$  plane, so the equations of motion are

$$m_i \ddot{v}_{ix} = -\frac{\partial V}{\partial R_{ix}}, \quad (10)$$

As potential energy  $V$  depends only on relative distance  $R_{ij}$  (or  $R_{ik}$ ), so equation (10) can be written as following

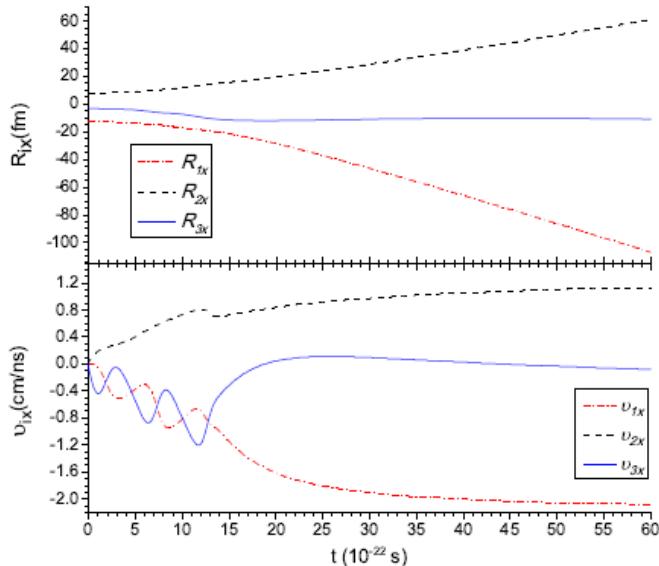
$$\begin{cases} m_1 \ddot{v}_{1x} = -\frac{R_{12x}}{R_{12}} \frac{\partial V}{\partial R_{12}} + \frac{R_{13x}}{R_{13}} \frac{\partial V}{\partial R_{13}} \\ m_2 \ddot{v}_{2x} = \frac{R_{12x}}{R_{12}} \frac{\partial V}{\partial R_{12}} + \frac{R_{23x}}{R_{23}} \frac{\partial V}{\partial R_{23}} \\ m_3 \ddot{v}_{3x} = -\frac{R_{23x}}{R_{23}} \frac{\partial V}{\partial R_{23}} - \frac{R_{13x}}{R_{13}} \frac{\partial V}{\partial R_{13}} \end{cases} \quad (11)$$

Symmetric three equations can be obtained for the  $y$  component. Considering the conservation law of linear momentum  $\sum_{i=1}^3 m_i v_{ix} = 0$  (since  $\mathbf{P}_{c.m.} = 0$  for the spontaneous fission of  $^{252}\text{Cf}$ ), one of the equations in formulas (11) can be

excluded. It is clear from Equation (11) that the dynamics of motion strongly depends on the derivative of the total interaction potential. The method of calculation of total interaction potential is provided in the third chapter.

As mentioned in the third chapter, the most possible channel for spontaneous ternary fission of  $^{252}\text{Cf}$  is  $^{70}\text{Ni} + ^{50}\text{Ca} + ^{132}\text{Sn}$ .  $^{70}\text{Ni}$  is the first nucleus (placed on the left side),  $^{132}\text{Sn}$  is the second nucleus (placed on the right side) and  $^{50}\text{Ca}$  is the third one (placed in the middle) in Figure 6.

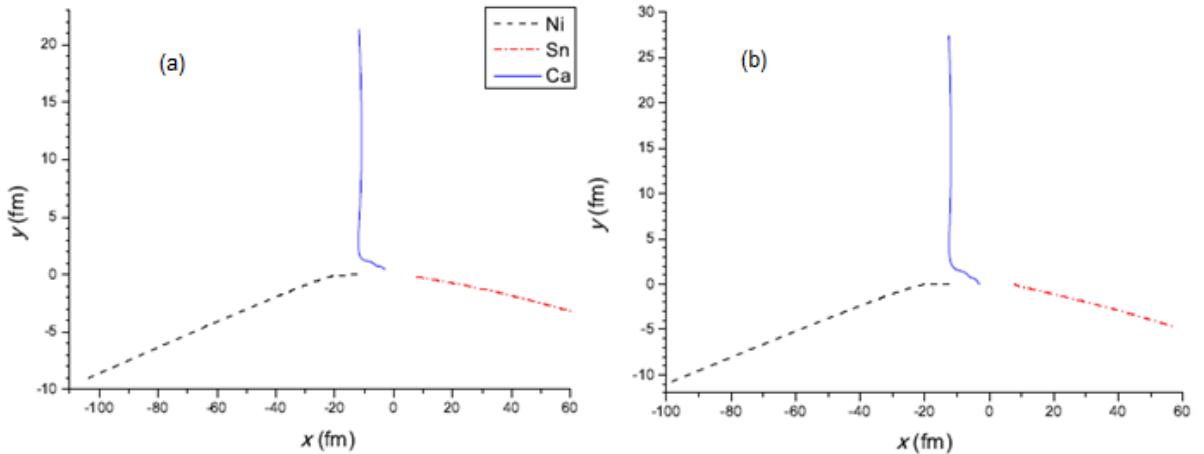
Let's consider the 3 cases of initial conditions which correspond to Cauchy problem. In the first case, it is considered that initially all nuclei are placed in one line, since the energy of the collinear configuration in the pre-scission state is the smallest, and relative distances between nuclei correspond to the local minimum in the total energy. Both components ( $x$  and  $y$ ) of initial velocities of the three nuclei are zero. In other words, the formation of fragments of the TNS is so slow that the fragments have zero (or too small) velocities. The results of the solution of the equations of motion (11) with the abovementioned initial conditions are shown in Figure 8. An important result has been obtained that after decaying of the system, the third nucleus (Ca) almost does not change its coordinate along  $x$  axis, because its velocity is about zero. It means that detection of the middle nucleus (Ca) is almost experimentally impossible. This conclusion proves the assumption done in the second chapter.



**Figure 8.**  $x$  component of coordinates (upper) and velocities (lower) of three nuclei as functions of time.

In the second and the third cases, all initial conditions are the same, but the middle nucleus (Ca) is placed a little bit upper, i.e.  $R_{3y}(t=0)=0.5$  fm and the initial velocity of the middle fragment is  $v_{3y}(t = 0) = 0.1$  cm/ns, respectively. The results of the calculations are shown in Figure 9. It can be seen from the figure that the deviation of the location of calcium nucleus on 0.5 fm on  $y$ -axis from the origin or non-zero  $y$  component of the initial velocity of the Ca nucleus is enough to get non-collinear ternary fission, and in both cases, the final trajectories are similar.

In all the cases, the sequence of ternary fission is similar, i.e. at the beginning Sn nucleus is going to break up from the Ni+Ca system, and then at  $\approx 1.4 \times 10^{-22}$  s, the Ni+Ca system has decayed.



**Figure 9. Trajectories of three decaying nuclei with the same initial conditions as in Figure 8, but with  $R_{3y}(t = 0) = 0.5$  fm (a) and  $v_{3y}(t = 0) = 0.1$  cm/ns (b).**

From Figures 8 and 9, it can be concluded that there is collinear fission only when all the three nuclei are located in one line ( $R_{iy} = 0$ ) and there is not  $y$  component of the initial velocity of the middle fragment ( $v_{3y} = 0$ ).

**In the appendix,** we present the exact expressions of interaction potential between two deformed nuclei consisting of the nuclear and the Coulomb parts. The Wong formula to calculate the Coulomb part and the formula to calculate the nuclear part with the double folding procedure method are presented.

## CONCLUSION

The analysis of the main results of the theoretical research carried out on the theme of the dissertation “Mechanisms of collinear cluster tripartition” has led to the following conclusions:

1. If the excited compound nucleus  $^{236}\text{U}^*$  formed in the  $^{235}\text{U}(\text{n}_{\text{th}}, \text{f})$  reaction can undergo the collinear cluster tripartition by the sequential mechanism, then the products will be  $^{82}\text{Ge}^*$ ,  $^{72}\text{Ni}^*$  and  $^{82}\text{Ge}^*$ . The probability of this channel is maximum compared with the other channels for CCT, and it is equal to  $3 \cdot 10^{-4}$  relative to binary fission. The value of the yield is close to the value obtained in the experiment. But the yield of products with mass number  $M=132-138$  was not obtained in this mechanism.

2. The second mechanism of CCT, which is called “almost sequential mechanism”, has been suggested to reproduce the yield of the massive fragment ( $^{132}\text{Sn}$  nucleus) in spontaneous fission of  $^{252}\text{Cf}$  together with  $^{70}\text{Ni}$  and  $^{50}\text{Ca}$  nuclei by taking into account the decrease of the pre-scission barrier in the interaction between  $^{70}\text{Ni}$  and  $^{50}\text{Ca}$  nuclei due to the Coulomb field of the massive fragment. It means that the location of  $^{132}\text{Sn}$  should be close to  $^{70}\text{Ni} + ^{50}\text{Ca}$  system for its separation.

3. The solution of the equations related with the energy and momentum conservation laws shows that the velocity of the middle fragment (Ca) is about zero in the  $^{252}\text{Cf} \rightarrow ^{70}\text{Ni} + ^{50}\text{Ca} + ^{132}\text{Sn}$  reaction. That is why Ca nucleus is hard to observe in the experiment.

4. From the results of the calculation of the total interaction potential for the spontaneous fission of  $^{252}\text{Cf}$  we can conclude that  $R_{12}$  (line connecting centers of the outer fragments Ni and Sn) is smaller than 21 fm, outer fragments extrude the middle fragment (Ca) from collinear position, and the TNS has the triangular shape. At larger values of  $R_{12}=21\text{-}22$  fm, the minimum of the potential well moves to the line  $R_{12}$  and the collinear shape of the TNS is favorable.

5. In the pre-scission stage, if all the nuclei of the TNS are placed collinearly corresponding to the minimum in the potential energy surface and there is no net force on the third nucleus (Ca) on y-axis (or y component of its initial velocity is zero), then the trinuclear system can be broken up collinearly. Other initial cases lead to non-collinear ternary fission.

6. In all the cases, the decay time of the TNS ( $^{70}\text{Ni} + ^{50}\text{Ca} + ^{132}\text{Sn}$ ) is nearly the same value, around  $1.4 \times 10^{-21}$  s. It means that the time almost does not depend on initial conditions. It is because of the sequence of the fission: firstly, Sn nucleus is separated from the Ni+Ca system, and then Ni is decayed from Ca nucleus.

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

---

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

**ТАШХОДЖАЕВ РУСТАМ БАХОДИРХОДЖАЕВИЧ**

**МЕХАНИЗМЫ КОЛЛИНЕАРНОГО КЛАСТЕРНОГО ТРОЙНОГО  
ДЕЛЕНИЯ**

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

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

**Ташкент – 2017**

**Тема диссертации доктора философии (Doctor of Philosophy) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером В2017.1.PhD/FM28.**

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

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

**Научный руководитель:**

**Насиров Авазбек Каримович,**  
доктор физико-математических наук, старший  
научный сотрудник

**Официальные оппоненты:**

**Усманов Пазлиддин Нуритдинович,**  
доктор физико-математических наук, доцент

**Хугаев Авас Васильевич,**  
кандидат физико-математических наук

**Ведущая организация:**

**Физико-технический институт Академии наук  
Республики Узбекистан,**  
г. Ташкент

Защита диссертации состоится «      »        2017 года в        часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики, Астрономическом институте, Национальном университете Узбекистана (Адрес: 100174, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ. Тел.: (+99871) 289-31-60; факс: (+99871)289-31-18; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

Диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный номер       ), с диссертацией можно ознакомиться в ИРЦ (Адрес: 100214, г. Ташкент, поселок Улугбек, НУУз. Тел. (+99871) 289-31-19).

Автореферат диссертации разослан «      »        2017 г.  
(протокол рассылки №        от        2017 г.).

**М. Ю. Ташметов**

председатель Научного совета по присуждению  
ученой степени, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник

**Р. Ярмухамедов**

ученый секретарь Научного совета по присуждению  
ученой степени, д.ф.-м.н., профессор

**И. Нуритдинов**

председатель научного семинара при Научном совете  
по присуждению ученой степени, д.ф.-м.н., профессор

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В настоящее время в мире накоплено множество экспериментальных данных в области физики ядерных реакций с тяжелыми ионами. Большинство из них требует понимания с помощью подходящих и непротиворечивых моделей. Актуальность теоретического исследования спонтанного и индуцированного деления тяжелых ядер связана с отсутствием полного понимания процесса деления, что требует разработки новых теоретических методов для анализа известных экспериментальных данных о характеристиках продуктов деления. Систематика анализов и установление универсальных закономерностей позволяют создать реалистические механизмы процесса деления массивных ядер.

В годы независимости уделяется большое внимание развитию экспериментальных и теоретических работ в области физики деления ядер, а также проведению фундаментальных исследований в этом направлении на мировом уровне. В этом плане удалось достичь определенных результатов, в частности в понимании природы тройного деления тяжелых ядер. Улучшение эффективности направления ядерной технологии через применение инновационных технологий теоретических и прикладных исследований в области реакций с тяжелыми ядрами, в частности бинарное и тройное деление ядер, имеет большое значение и отражено в Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан.

На сегодняшний день существуют различные модели, созданные в разных научных центрах мира, но ни одна из них не может описывать тройное деление почти с одинаковыми продуктами. Данная диссертационная работа является началом исследования автором тройного и мультикластерного деления. Хотя эти процессы составляют доли процента всех событий деления, но знание их природы позволит лучше понять процесс обычного деления ядер. Мультикластерное деление существует благодаря оболочечной структуре ядерного вещества, теоретическое и экспериментальное знание природы мульти кластерного деления в различных ядрах будет способствовать построению полной картины деления.

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

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

технологий в Республике Узбекистан – II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

**Степень изученности проблемы.** До сегодняшнего дня ведущие ученые мира, например немецкие (A.R. Degheidy, J.A. Maruhn, H. Diehl, W. Greiner, F. Gonneinwein, W. von Oertzen, J.P. Theobald, P. Heeg и M. Mutterer), российские (Ю.В. Пятков, Д.В. Каманин, А.В. Карпов, В.А. Рубчена и С.Г. Явшиц), американские (M.L. Muga и C.R. Rice), шведские (P. Holmvall и U. Köster), индийские (K. Manimaran, K.R. Vijayaraghavan и M. Balasubramaniam) и другие проводили огромный объем работы по теоретическому и экспериментальному изучению статистических и динамических свойств тройного деления тяжелых ядер.

Некоторые узбекские ученые (В.П. Пикуль, Ю.Н. Коблик, А.К. Насиров и другие) провели теоретические и экспериментальные работы по изучению выхода, кинетической энергии и углового распределения продуктов деления тяжелых ионов ( $U$ ,  $Cf$ ,  $Th$ ,  $Pu$  и т.д.). Для описания реакции с тяжелыми ионами разработана модель двойной ядерной системы совместно с учеными Объединенного института ядерных исследований (Россия) и Института ядерной физики (Узбекистан).

Ранее исследование тройного деления включало в себя только бинарное деление, сопровождающееся эмиссией легких заряженных частиц, т.е.  $He$ ,  $Li$ ,  $Be$  и так далее. В этой модели тройного деления средний фрагмент (легкое ядро) летит перпендикулярно линии бинарного деления, и наиболее тяжелым ядром была сера. Но позже экспериментальная группа Фобос в Объединенном институте ядерных исследований (Ю. В. Пятков, Д. В. Каманин и другие) начала изучать другой тип тройного деления – коллинеарное кластерное тройное деление (далее ККТД). Эти продукты тройного деления (кластеры) летят почти на одной линии, и их массы имеют сравнимые значения, т.е. средний фрагмент может иметь большие массовые числа ( $<100$ ).

После опубликования результатов эксперимента Фобос, индийские ученые (K.R. Vijayaraghavan, K. Manimaran, M. Balasubramaniam) оценили зарядовое и массовое числа фрагментов с помощью вычисления полной потенциальной энергии. Основным недостатком этой теории является то, что один барьер был использован для двух шеек (перекрывающих поверхности). Это означает, что фрагменты могут отделиться только одновременно. Такое ограничение авторами не обсуждается.

Учитывая текущий статус проблемы, мы пытаемся исследовать разные механизмы тройного деления тяжелых ядер, в основном ядер урана и калифорния.

**Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в рамках научных проектов Института ядерной физики по темам ФА-Ф2-Ф055 «Исследование выхода продуктов реакции с тяжелыми ионами и деление ядер» (2007–2011); ФА-

Ф2-Ф115 «Исследование механизмов реакции многонуклонных передач и слияние–деление ядер» (2012–2016).

**Целью исследования** является развитие теоретического формализма описания механизмов коллинеарного кластерного тройного деления и выявление причин, приводящих к коллинеарности деления.

**Задачи исследования:**

вычислить полный потенциал взаимодействия двойной ядерной системы для описания последовательного коллинеарного (вытянутого) тройного деления в реакции  $^{235}\text{U}(\text{n}_{\text{th}}, \text{f})$ ;

оценить зарядовое распределение (выход продуктов) последовательного коллинеарного (вытянутого) тройного деления в реакции  $^{235}\text{U}(\text{n}_{\text{th}}, \text{f})$ ;

изучить зависимость полного потенциала взаимодействия от расстояния между наиболее тяжелым ( $^{132}\text{Sn}$ ) и средним ( $^{50}\text{Ca}$ ) кластерами в коллинеарной (вытянутой) конфигурации при спонтанном тройном делении  $^{252}\text{Cf}$ ;

вычислить вероятность выхода продуктов для почти последовательного коллинеарного истинного тройного деления  $^{252}\text{Cf}$ ;

изучить роль расстояния между крайними фрагментами ( $^{70}\text{Ni}$  и  $^{132}\text{Sn}$ ) в форме полного потенциала взаимодействия в неколлинеарной (сплющенной) конфигурации в  $^{252}\text{Cf(sf)}$ ;

получить уравнения движения Лагранжа для истинного тройного деления в реакции  $^{252}\text{Cf(sf)}$ ;

решить уравнения движения разными начальными условиями (задача Коши);

найти начальное условие, которое приводит к коллинеарному тройному делению.

**Объектом исследования** являются тяжелые ядра, продукты тройного деления и кластеры.

**Предметом исследования** являются полный потенциал взаимодействия между двумя (и тремя) ядрами, выход продуктов тройного деления, начальные состояния системы, которая состоит из трех взаимодействующих ядер.

**Методы исследования:** математический аппарат феноменологического потенциала сильного взаимодействия и макроскопической статистической механики, аналитические и численные методы решения дифференциальных уравнений движения.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

разработана новая модель тройной ядерной системы для описания процесса истинного тройного деления и выявлено, что в некоторых случаях коллинеарное тройное деление имеет место в природе;

найдено, что при последовательном коллинеарном тройном делении более вероятным является канал  $^{82}\text{Ge} + ^{72}\text{Ni} + ^{82}\text{Ge}$  в реакции  $^{235}\text{U}(\text{n}_{\text{th}}, \text{f})$ ;

показано, что расположение  $^{132}\text{Sn}$  близко к  $^{72}\text{Ni} + ^{50}\text{Ca}$  важно для одновременного (или почти последовательного) коллинеарного тройного деления;

найдено, что барьер деления между  $^{72}\text{Ni}$  и  $^{50}\text{Ca}$  выше, чем у  $^{50}\text{Ca}$  и  $^{132}\text{Sn}$ , т.е. отделение  $^{132}\text{Sn}$  от системы  $^{72}\text{Ni}+^{50}\text{Ca}$  происходит легче;

показано, что начальное условие для тройной ядерной системы на предразрывной стадии важно для её распада, которое приводит к коллинеарному делению.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

получено, что более возможным каналом последовательного коллинеарного кластерного тройного деления возбужденного  $^{236}\text{U}$  является  $^{82}\text{Ge}+^{72}\text{Ni}+^{82}\text{Ge}$ , что совпадает с экспериментальными данными;

показано, что при спонтанном делении  $^{252}\text{Cf}$  вероятность коллинеарного кластерного тройного деления канала  $^{70}\text{Ni}+^{50}\text{Ca}+^{132}\text{Sn}$  сравнима с другими каналами, а разрыв шейки между ядрами Ca и Sn происходит раньше, чем Ni и Ca. Разница времени между разрывами должна быть слишком короткой;

найдено, что при спонтанном делении  $^{252}\text{Cf}$  скорость среднего фрагмента ( $^{50}\text{Ca}$ ) очень мала и кинетическая энергия меньше порога регистрации детектора, поэтому экспериментальное наблюдение этого ядра довольно сложно, тем самым показана причина наблюдения только двух фрагментов тройного деления;

обнаружено, что отклонение от коллинеарности наблюдается, если относительное расстояние между ядрами Ni и Sn меньше 21 фм, так как отталкивающая кулоновская сила выдавливает ядра Ca из коллинеарного положения, а с увеличением относительного расстояния минимальное положение Ca перемещается в коллинеарную линию;

при динамическом анализе истинного тройного деления  $^{252}\text{Cf}$  найдено, что имеется только одно начальное условие, приводящее к коллинеарному делению: все ядра расположены на одной линии, а перпендикулярная составляющая скорости среднего фрагмента к коллинеарной линии равна нулю. Все остальные начальные условия предразрывного состояния приведут к результатам неколлинеарного тройного деления;

получено, что распад  $^{50}\text{Ca}$  из  $^{70}\text{Ni}$  происходит примерно на  $1,35 \times 10^{-21}\text{s}$  позже, чем отделение  $^{132}\text{Sn}$  от системы  $^{70}\text{Ni}+^{50}\text{Ca}$ . Показано, что это время очень мало по сравнению со временем обычного бинарного деления ( $\sim 10^{-19}\text{s}$ ).

**Достоверность результатов исследования** обосновывается использованием современных методов ядерной и теоретической физики, высокоэффективных численных методов и алгоритмов; проведена тщательная проверка согласованности полученных теоретических результатов с экспериментальными данными и результатами других авторов; выводы хорошо согласуются с основными положениями ядерных реакций при низких энергиях, опубликованные работы, входящие в диссертационную работу, цитируются независимыми авторами.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость методов, разработанных соискателем, и результатов исследований, полученных с помощью этих методов, определяется их полезностью и пригодностью для установления механизма истинного тройного деления и анализа свойств фрагментов, полученных в новых

экспериментальных данных. Теоретический анализ коллинеарности продуктов впервые проводился соискателем и является ключевым моментом в понимании природы тройного деления тяжелых ядер. Ценность материала диссертации подтверждается многочисленными ссылками и положительными отзывами на опубликованные статьи соискателя авторами из разных научных центров Европы и Азии.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что они могут быть использованы для определения наиболее вероятных конфигураций тройной ядерной системы и каналов ее распада. Метод расчета, развитый в диссертации, позволяет предсказывать такие параметры продуктов тройного деления, как заряд, масса и угловое распределение. Результаты также могут быть полезны для анализа природы и динамики механизмов ядерных реакций, могут быть использованы в планировании экспериментов для наблюдения выхода кластеров с определенными свойствами и для установления механизма их образования.

**Внедрение результатов исследования.** Большая вероятность коллинеарного кластерного тройного деления по каналу  $^{70}\text{Ni}+^{50}\text{Ca}+^{132}\text{Sn}$  при спонтанном делении  $^{252}\text{Cf}$  использована в зарубежных журналах (*Journal of Physics G*, 2017; *Physical Review C*, 2016; *Physical Review C*, 2017) для определения канала коллинеарного тройного деления. Использование этого результата позволило определить механизм коллинеарного тройного деления.

Возможность не коллинеарного распада при расстоянии между Ni и Sn больше, чем 24 фм в тройном делении ядра  $^{252}\text{Cf}$  использована в зарубежных журналах (*International Journal of Physics E*, 2016; *European Physical Journal A*, 2017; *Physical Review C*, 2017) для определения коллинеарности или не колленеарности деления. Использование этого результата позволило определить случаи не коллинеарного деления.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследований были обсуждены на 3 международных и 4 республиканских конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе 10 научных статей, 8 из них в международных научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов доктора философии (PhD).

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем диссертации составляет 103 страницы.

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

**I бўлим (Part I; I часть)**

1. Tashkhodjaev R. B., Nasirov A. K., Scheid W. Collinear cluster tripartition as sequential binary fission in the  $^{235}\text{U}(\text{n}_{\text{th}}, \text{f})$  reaction // European Physical Journal A. – SIF-Springer (Germany), 2011. – vol. 47, N 11. – pp. 136-145 (№ 39. Impact Factor Search; IF = 2,373).
2. Nasirov A. K., Tahkhodzhaev R. B., Abdurazakov O. O. True Ternary Fission of  $^{236}\text{U}$ : Sequential Mechanism? // Bulletin of the Russian Academy of Sciences, Physics. – Springer (Germany), 2012. – vol. 76, N 44. – pp. 467-471 (№ 39. Impact Factor Search; IF = 0,330).
3. Nasirov A. K., von Oertzen W., Muminov A. I., Tashkhodjaev R. B. Peculiarities of cluster formation in true ternary fission of  $^{252}\text{Cf}$  and  $^{236}\text{U}^*$  // Physica Scripta. – IOP Science (Sweden), 2014. – vol. 89, N 5. – id.054022. – 6p (№ 39. Impact Factor Search; IF = 1,194).
4. Tashkhodjaev R. B., Nasirov A. K., von Oertzen W., Ishmuratov A. N. Clusters in true ternary fission in the  $^{252}\text{Cf(sf)}$  reaction // Uzbek Journal of Physics. – Fan (Uzbekistan), 2015. – vol. 17, N 1-2. – pp. 79-83 (01.00.00. №5).
5. Tashkhodjaev R. B., Muminov A. I., Nasirov A. K., von Oertzen W., Yongseok O. Theoretical study of the almost sequential mechanism of true ternary fission // Physical Review C. – American Physical Society (USA), 2015. – vol. 91, N 5. – id 054612. - 9p (№ 39. Impact Factor Search; IF = 3,146).
6. von Oertzen W., Nasirov A. K., Tashkhodjaev R. B. Multimodal fission in collinear ternary cluster decay of  $^{252}\text{Cf(sf, fff)}$  // Physics Letters B. – Elsevier (England), 2015. – vol. 746. – pp. 223-229 (№ 39. Impact Factor Search; IF = 4,787).
7. Nasirov A. K., von Oertzen W., Tashkhodjaev R. B. Nuclear shell effect and collinear tri-partition of nuclei // Pramana-Journal of Physics. – Springer (Germany), 2015. – vol. 85, N 2. – pp. 367-378 (№ 39. Impact Factor Search; IF = 0,692).
8. Nasirov A. K., Tashkhodjaev R. B., von Oertzen W. Pre-scission configuration of trinuclear system at spontaneous ternary fission of  $^{252}\text{Cf}$  // European Physical Journal A. – SIF-Springer (Germany), 2016. – vol. 52, N 5. – pp. 135-141 (№ 39. Impact Factor Search; IF = 2,373).
9. Tashkhodjaev R. B. Potential energy of pre-scission configurations in ternary fission of  $^{252}\text{Cf}$  // ЎзМУ хабарлари (Acta NUUz). – National University of Uzbekistan (Uzbekistan), 2016. – N 2/1. – pp. 254-262 (01.00.00. №8).
10. Tashkhodjaev R. B., Nasirov A. K., Alpomeshev E. Kh. Dynamics of the trinuclear system at spontaneous fission of  $^{252}\text{Cf}$  // Physical Review C. – American Physical Society (USA), 2016. – vol. 94, N 5. – id.054614. – 6p (№ 39. Impact Factor Search; IF = 3,146).

## **II бўлим (Part II; II часть)**

11. Nasirov A. K., Tashkhodjaev R. B., Abdurazakov O. O. True Ternary Fission of  $^{236}\text{U}$ : Sequential Mechanism? // Preprint JINR. – Joint Institute for Nuclear Research (Russia), 2010. – id. P7-2010-110. – 11p.
12. Tashkhodjaev R. B., Nasirov A. K., Scheid W. Sequential Fission Mechanism of Collinear Cluster Tripartition // International Conference on Nuclear Science and Its Application. – September 25-28, 2012. – Samarkand, Uzbekistan. – pp. 91-93.
13. Tashkhodjaev R. B., Nasirov A. K., von Oertzen W. Formation of clusters in the  $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$  reaction // Республикаанская конференция «Актуальные проблемы теоретической и ядерной физики», 25-26 октября 2013 г. – НУУз, Ташкент, Узбекистан. – С. 190-192.
14. Nasirov A. K., von Oertzen W., Tashkhodjaev R. B. Nuclear shell effect and collinear tri-partition of nuclei // International Conference “75-years of Nuclear Fission: Present Status and Future Perspectives”. – May 8-10, 2014. – Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai, India. – pp. 34-35.
15. Ташходжаев Р. Б., Насиров А. К., фон Оертцен В., Ишмуратов А. Н. Механизм одновременного тройного деления  $^{252}\text{Cf}$  // IV Республикаанская конференция молодых физиков Узбекистана «Ядерная физика и ядерные технологии». 2-3 декабря, 2014. – ИЯФ, Ташкент, Узбекистан. – С. 33-34.
16. Nasirov A. K., Tashkhodjaev R. B., von Oertzen W. Theoretical study of a possible mechanism of the true ternary fission // 4th South Africa – JINR Symposium “Few to Many Body-Systems: Models, Methods and Applications”. – September 21-25, 2015. – Dubna, Russia. – pp. 10-11.
17. Tashkhodjaev R. B., Nasirov A. K., Alpomeshev E. Kh. Dynamics of the tri-nuclear system at spontaneous fission of  $^{252}\text{Cf}$  // The International Symposium “New Trends of Development Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects”. – November 10-11, 2016. – Tashkent, Uzbekistan. – pp. 34-35.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали таҳририятида  
таҳрирдан ўтказилди (26.10.2017 йил)

Босишга руҳсат этилди: 02.11.2017 йил  
Бичими 60x84  $1/16$ , «Times New Roman»  
гарнитурада ракамли босма усулида босилди.  
Шартли босма табоғи 3. Адади: 80. Буюртма: № \_\_\_\_\_.  
\_\_\_\_\_

Ўзбекистон Миллий университети босмахонасида босилди.  
Тошкент, Талабалар шахарчаси, ЎзМУ