



ХҒТАР 29.15.39

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-151-2-158-176>

Ғылыми мақала

Көп нуклондық берілу реакцияларын зерттеу үшін SHELS кинематикалық сепараторын және GABRIELA детекторлық жүйесін пайдалану

Б.С. Сайлаубеков^{*1,2,3,5}, А.И. Свирихин^{3,4}, М.С. Тезекбаева^{1,3,4,5}, Х.М.Девараджа^{1,3},
А.Қ. Әжібеков^{1,3}, А.В. Исаев^{3,4}, Р.С. Мухин³, Ю.А. Попов^{3,4}

¹Қорқыт ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан

²Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

³Біріккен ядролық зерттеулер институты, Дубна, Ресей

⁴Дубна мемлекеттік университеті, Дубна Ресей

⁵Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

(E-mail: bsailaybekov@jinr.ru)

Аңдатпа. Біріккен ядролық зерттеулер институтының (БЯЗИ) Ядролық реакциялар Зертханасында (ЯРЗ) SHELS сепараторында $Z \geq 82$ болатын ауыр ядролардың жаңа изотоптарын синтездеу, олардың радиоактивті ыдырау қасиеттерін және түзілу көлденең қималарын зерттеу бойынша тәжірибелер жүргізілуде. Бұл зерттеулердің мақсаты – радиоактивті ыдырау қасиеттері мен ауыр ядролардың қалыптасу процестерін анықтайтын ауыр элементтер ядроларының құрылымындағы жаңа заңдылықтарды зерттеу. Бұл зерттеулер ядролық тұрақтылықтың теориялық модельдерін жетілдіру, ұзақ өмір сүретін аса ауыр изотоптарды анықтау және ядролық технологиялар саласындағы практикалық қосымшаларды әзірлеу үшін аса маңызды.

Жұмыста негізгі назар тәжірибе әдістемесіне – көп нуклондық берілу реакцияларын зерттеу үшін GABRIELA детекторлық жүйесі мен SHELS кинематикалық сепараторын қолдануға аударылады.

Атап айтқанда, SHELS сепараторы мен GABRIELA комбинияланған детекторлық жүйесін пайдаланып жүргізілген, нысана ядроларына қарағанда протон саны жоғары ядролардың түзілуіне әкелетін, $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$, $^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ және $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ көп нуклондық берілу реакцияларын зерттеу нәтижелері ұсынылады.

Жылдамдық фильтрі SHELS көмегімен осындай тәжірибелерді жүргізу көп нуклондық берілу реакцияларын зерттеуде кинематикалық сепараторлардың мүмкіндіктерін тереңірек түсінуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, жұмыста сипатталған зерттеу әдістері ауыр және аса ауыр ядролардың радиоактивті ыдырау қасиеттерін тәжірибелік зерттеуде сәтті қолданылып келеді.

Түйін сөздер: кинематикалық сепаратор; детекторлық жүйе; көп нуклондық берілу реакциясы; ауыр ядролар; α -ыдырау.

Жіберілді 06.05.2025. Өзгертілді 02.06.2025. Қабылданды 03.06.2025. Онлайн қол жетімді 25.06.2025.

¹ *хат-хабар авторы

Кіріспе

Ядролық физиканың негізгі мәселелерінің бірі – $Z \geq 100$ аймағындағы жаңа нуклидтердің қасиеттері, $Z \geq 82$ аймағында β -тұрақтылық сызығынан алыс орналасқан жаңа ядролардың қасиеттері мен ауыр ядролар құрылымының заңдылықтарын зерттеу бойынша деректер алу. Бұл тақырып ядролық материяның макро-микроскопиялық қасиеттерін зерттеу, бұл қасиеттердің ядроның ішкі құрылымымен байланысын анықтау, радиоактивті ыдыраудың жаңа экзотикалық түрлерін іздеу, ауыр элементтердің тұрақтылығын зерттеу және аса ауыр ядроларды синтездеудің жаңа тәсілдерін табу мақсатында өзекті болып табылады.

Экзотикалық ядролар әдетте нысананың фрагментациясы немесе бөлінуі арқылы, сондай-ақ кулондық кедергі энергиясы деңгейіндегі толық бірігу реакцияларында алынады. Бұл әдістер мен сәулелердің қол жетімді интенсивтілігі нуклидтер кестесінің қазіргі шекараларын анықтайды. Зерттелмеген аймақтарға жетудің тағы бір тәсілі – көп нуклондық берілу (КНБ) реакциялары. Принцип бойынша, олар $Z > 92$ болатын нейтрондық-артық және нейтрондық-тапшылық изотоптарды алуға мүмкіндік береді. Бұл зерттеулер әлемнің түрлі зертханаларында өзектілікке ие болды. Тиісті бөліп алу және тіркеу әдістері, сондай-ақ теориялық базалар әзірленуде. Қазіргі таңға дейін алынған нәтижелер КНБ реакцияларының негізінен жаңа трансурани изотоптарын синтездеу үшін перспективті әдіс екенін көрсетті.

Қазіргі уақытта $Z \geq 82$ болатын, тұрақтылық сызығының нейтрондық және протондық шекараларына жақын немесе сол бағытта орналасқан элементтердің экзотикалық изотоптарын алу үшін фрагментация, уату, КНБ және ауыр ядролардың толық бірігу реакцияларын пайдалану ең тиімді әдістер болып табылады. Трансурани ядроларының көпшілігі әдетте ауыр иондармен бірігу реакцияларында алынады. Алайда, тұрақтылық алқабының нейтрондық-артық жағындағы ауыр және аса ауыр изотоптар бірігу реакциялары арқылы алуға келмейді. Бұл ауыр ядролар аймағында нейтрондар санының протондар санына қатынасы өсіп, $A = 250$ аймағында 1.6 мәніне жетуімен түсіндіріледі. Бұл өзгерісті ядролық күштердің қысқа қашықтықта әсер ету сипатын және массалық сан өскен сайын протондардың кулондық әсерінің артуын ескере отырып түсіну оңай. Ауыр ядролар энергетикалық тұрғыдан тұрақты болу үшін протондар санына (Z) қарағанда нейтрондар санының (N) көп болуы тиіс. Қазіргі сәтте фермийден оганесонға дейінгі элементтердің тәжірибелік синтезделген изотоптары негізінен нейтрондық-тапшылық болып табылады.

Бүгінгі таңда сәтті тәжірибелік зерттеулер [1-5] мен жаңа модельдік есептеулер [6-8] ауыр иондардың үдетілген сәулелері мен ауыр ядролы нысаналар арасындағы КНБ реакциялары арқылы ауыр экзотикалық ядроларды синтездеуге жаңа мүмкіндіктер ашып отыр. Жақында SHIP (Separator for Heavy Ion reaction Products) [9] жылдамдық фильтрінде өткізілген зерттеулер [4-5] терең серпімсіз КНБ реакцияларының жаңа нейтрондық-тапшылық және нейтрондық-артық изотоптарды синтездеу үшін пайдаланылуы мүмкіндігін растады. Әртүрлі модельдермен жасалған КНБ реакцияларының теориялық болжамдары [7-8] $Z \geq 104$ болатын нейтрондық-артық өте ауыр ядроларды синтездеуді орталық соқтығысуларға (терең серпімсіз соқтығысуларға)

жақын аймақта жүзеге асыруға болатынын анық көрсетеді. Ядролар картасында нейтрондық-артық жағында орналасқан белгілі $Z \geq 104$ болатын ядролардың көпшілігі тікелей синтезбен алынбаған, олар ыстық бірігу реакцияларында [10] синтезделген ауыр ядролардың α -ыдырау тізбектерінің өнімдері болып табылады. КНБ реакциялары осы және басқа да жаңа ядроларды тікелей синтездеудің әдісіне айналуы мүмкін. КНБ реакцияларының қолданылуы туралы толық ақпаратты [5] жұмысынан табуға болады.

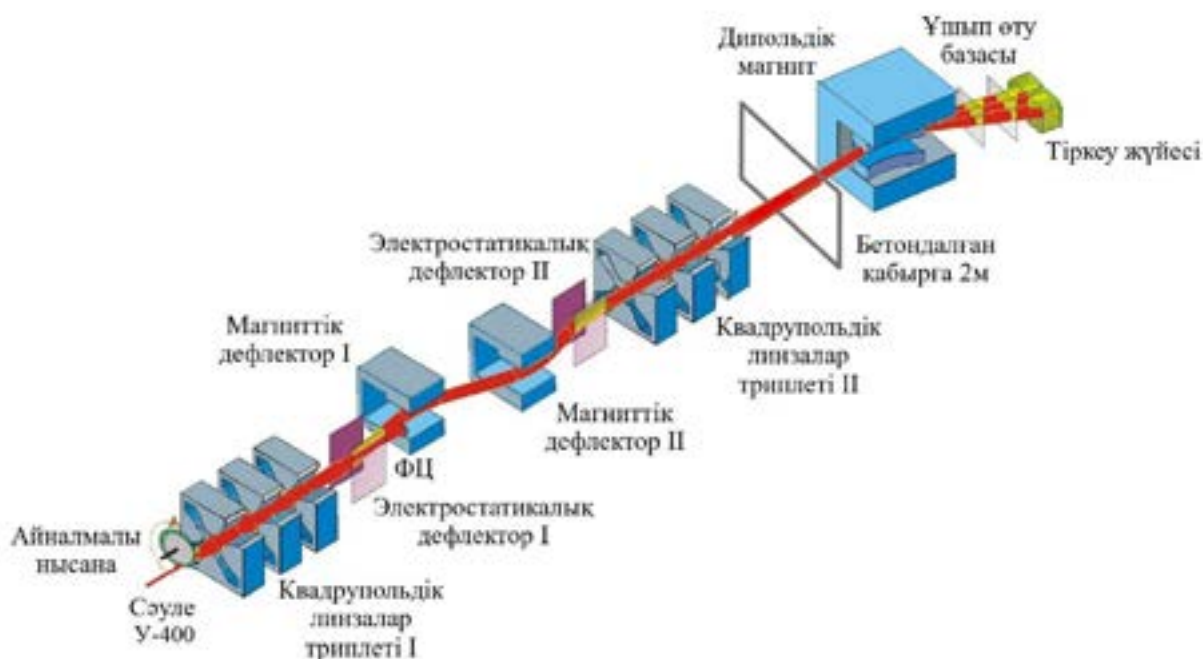
Зерттеу әдіснамасы

1. Тәжірибелік қондырғы сипаттамасы

SHELS кинематикалық сепараторы

SHELS [13] (Separator for Heavy Element Spectroscopy) кинематикалық сепараторы QQQ-E-D-D-E-QQQ сызбасы бойынша жобаланған (мұнда Q – квадрупольдік линза, E – электростатикалық дефлектор, D – дипольдік магнит), БЯЗИ ЯРЛ-дағы ауыр ионды сәулелермен қамтамасыз ететін У-400 үдеткішінің 3-арнасында орналасқан. Бұл қондырғы ВАСИЛИСА [11-12] электростатикалық сепараторын терең жаңарту нәтижесінде пайда болды, онда ядролық реакция өнімдерін электрлік қаттылық бойынша емес, SHIP жылдамдық фильтріне ұқсас, жылдамдық бойынша бөліп алу енгізілді.

Екі кезеңді сепарация және фокустайтын элементтері бар схеманы таңдау нысана ядросы мен ауыр иондардың асимметриялық комбинациясынан туындайтын толық бірігу реакцияларының өнімдерін тасымалдау тиімділігін арттыру қажеттілігімен байланысты. Бұл фондық өнімдерді жоғары деңгейде төмендетумен қатар, фокальдік жазықтықта күрделі детекторлық жүйелерді қолдануға мүмкіндік береді. Сепаратор сызбанұсқасы 1-суретте көрсетілген, ал негізгі сипаттамалары 1-кестеде келтірілген.

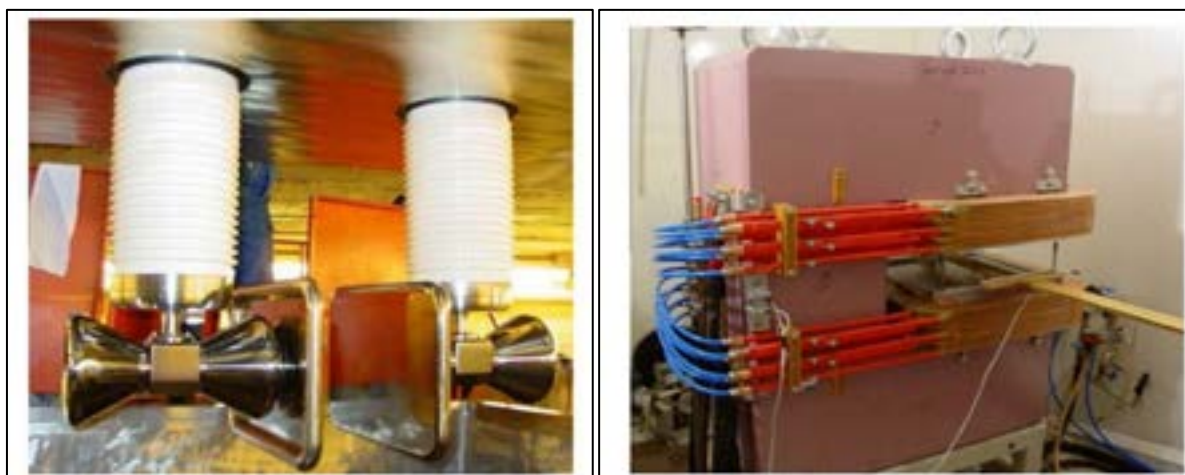


1-сурет. SHELS сепараторының сызбанұсқасы [13]

Ескерту: [13] деректер негізінде құрастырылған

Сепараторда зарядталған иондардың үдетілген сәулесімен сәулеленетін айналмалы нысана бар. Магниттік квадрупольдік линзалардың бірінші триплеті нысанадан шығатын реакция өнімдерін фокустау үшін арналған. Сепарациялайтын бөлігі екі элементтен тұрады, олар тоғысатын-айқасқан электрлік және магниттік өрістер, бұл "жылдамдық фильтрі" ретінде белгілі. Нысананың ядроларымен әрекеттеспейтін сәуле иондары бірінші дефлекторда ауытқымайды және Фарадей цилиндрінде тежеледі.

Сепаратордағы жылдамдық фильтрлері айналы-симметриялы түрде орналасқан. Әрбір фильтр дипольдік магнит пен екі параллель пластинадан тұратын электростатикалық дефлектордан тұрады (2-сурет). Фильтрлердің осылай орналасуы кезінде магнит өрісіндегі ауытқу бұрышы электр өрісіндегі ауытқу бұрышына сызықты тәуелді болады. Дефлекторлардың кернеуін және дипольдердің ток күшін реттеу арқылы ауытқу бұрыштарын өзгерте отырып, ұшып өтетін иондарды дисперсия және жылдамдық диапазоны бойынша бөліп алуға болады. Иондардың екі жылдамдық фильтрі арқылы ұшу траекториясы S-пішінді болады.



2-сурет. Сол панель: электростатикалық дефлектор; Оң панель: дипольдік магнит [13]

Ескерту: [13] деректер негізінде құрастырылған

Электростатикалық дефлекторлардың пластиналарын бекіту конструкциясы олардың арасындағы қашықтықты 10 см-ден 20 см-ге дейін реттеуге мүмкіндік береді. Симметриялы реакцияларды, мысалы, $^{136}\text{Xe} + ^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{272}\text{Hs}^*$, зерттеу кезінде электростатикалық өрістің кернеулігін 40 кВ/см-ге жеткізу үшін пластиналарды 10 см-ге дейін жылжытуға болады. Асимметриялы комбинациялар үшін пластиналар арасындағы қашықтық 20 см деңгейінде бекітіледі, бұл кезде дефлекторлардың тиімді ұзындығы 66 см-ді құрайды.

Екінші квадрупольдік линзалар триплеті қайтарма ядроларды фокальдік детекторларға фокустау үшін арналған. Фокальдік жазықтықта детекторлық жүйе орналасқан, оның алдында қосымша 8-градустық дипольдік магнит орнатылған. Бұл магнит қайтарма ядроларды (ҚЯ) шашыраған сәулелерден қосымша тазарту үшін қолданылады. Детекторлық жүйе мен үдетілген сәуле орналасқан эксперименттік залдың арасы 2 метрлік

бетон қабырғамен бөлінген, бұл өз кезегінде детектор орналасқан аймақтағы фондық белсенділікті айтарлықтай төмендетуге мүмкіндік береді. Қондырғының ион-оптикалық осінің ұзындығы (нысанадан детекторларға дейін) 12.8 метрді құрайды, ал реакция өнімдерінің ұшу уақыты бірнеше микросекундқа тең. Үдетілген ^{48}Ca және ^{50}Ti сәулелерімен реакциялар нәтижесінде пайда болатын ҚЯ-ды тасымалдау тиімділігі 20%-дан 40%-ға дейін жетеді [14]. Жеңіл ^{22}Ne ионы үшін (асимметриялық комбинациялар) жаңартылған сепараторда ҚЯ-ды тасымалдаудың тәжірибе түрінде анықталған тиімділігі (3.5–6)% құрайды [15]. Сепаратордың толық сипаттамасын [13] жұмысынан табуға болады.

Ертеректе SHELS сепараторында КНБ реакцияларын зерттеу бойынша тесттік тәжірибелер жүргізілді. Осы тәжірибелерде алынған ең төменгі қима ≈ 10 пб/ср (SHELS қабылдау бұрышына сәйкес) шамасында болды, ол 5 сағаттық сәулелену уақытында қол жеткізілді [5]. SHELS-тің деректерді айтарлықтай тез жинайтын жүйесі жартылай ыдырау периоды ~ 1 мкс-қа дейін болатын ядроларды тіркеуге мүмкіндік береді. Ядроларды тіркеу SHELS сепараторының фокальдік жазықтығында орналасқан жоғары сезімтал GABRIELA детекторлық жүйесі арқылы жүзеге асырылады.

1-кесте. SHELS сепараторының негізгі бөліктерінің сипаттамалары [13]

Квадрупольдік линзалар	
Өрістің максималды градиенті	13 Т/м
Эффективті ұзындығы	38 см
Апертураның радиусы	10 см
Электростатикалық дефлектор	
Өрістің максималды кернеулігі	40 кВ/см
Эффективті ұзындығы	65.7 см
Пластиналар арасындағы қашықтық	10-20 см
Номиналды ауытқу бұрышы	8°
Дипольдік магниттер D22	
Өрістің максималды градиенті	0.8 Т
Эффективті ұзындығы	59.7 см
Полюстер арасындағы алшақтық	13.5 см
Номиналды ауытқу бұрышы	22°
Дипольдік магнит D8	
Өрістің максималды градиенті	0.2 кВ/см
Эффективті ұзындығы	58.8 см
Полюстер арасындағы алшақтық	14 см
Номиналды ауытқу бұрышы	8°

Ескерту: [13] деректер негізінде құрастырылған

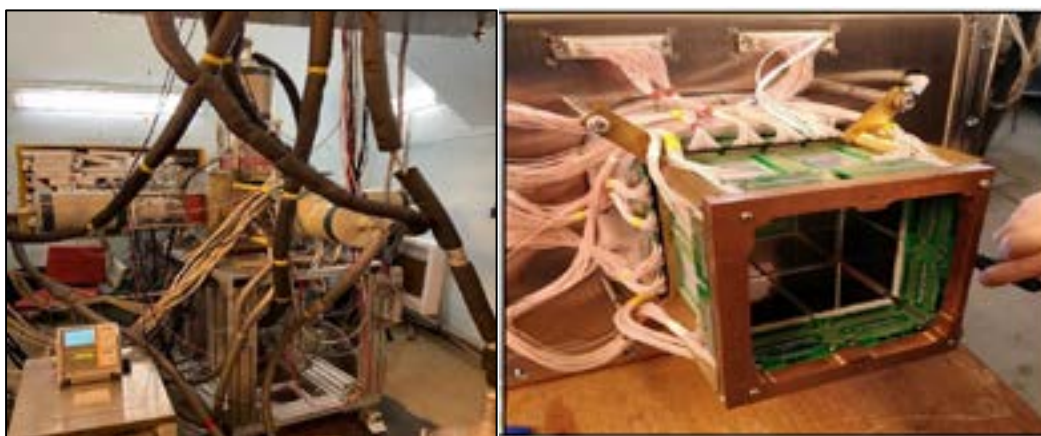
GABRIELA детекторлық жүйесі

Заманауи тәжірибелердің өзекті мәселесі – үдетілген ауыр иондар мен нысана ядролары арасындағы реакция нәтижесінде пайда болатын өнімдер шығаратын α -бөлшектер

мен γ -кванттарды тіркеу болып табылады. Бұл тарауда SHELS кинематикалық сепараторындағы тәжірибелерде кремнийлік және германийлік жартылай өткізгіш детекторларын қолдану қарастырылады. Жоғары сезімтал детекторлық жүйенің негізгі міндеті – сепаратордың фокальдік жазықтығындағы ҚЯ, аналық және ұрпақ (материнское и дочернее) ядролардың α -, β -, γ -ыдырауларын тіркеу болып табылады.

GABRIELA детекторлық жүйесі [16-17] – кремнийлік және германийлік детекторлардан тұратын күрделі құрылым (3-сурет, сол жақ панель, толық жинақ). Оған 4п геометриясына жақын тік бұрышты «шұңқыр» құрайтын кремний детекторлары кіреді. Бұл шұңқырдың түбі фокальдік екі жақты кремнийлік стрипті DSSD (Double-Sided Silicon Strip Detector) детекторы болып табылады. Бұл фокальдік детектордың конфигурациясы 128×128 стриптен тұрады, ал белсенді аймақтың өлшемі $100 \times 100 \text{ мм}^2$, қалыңдығы 500 мкм.

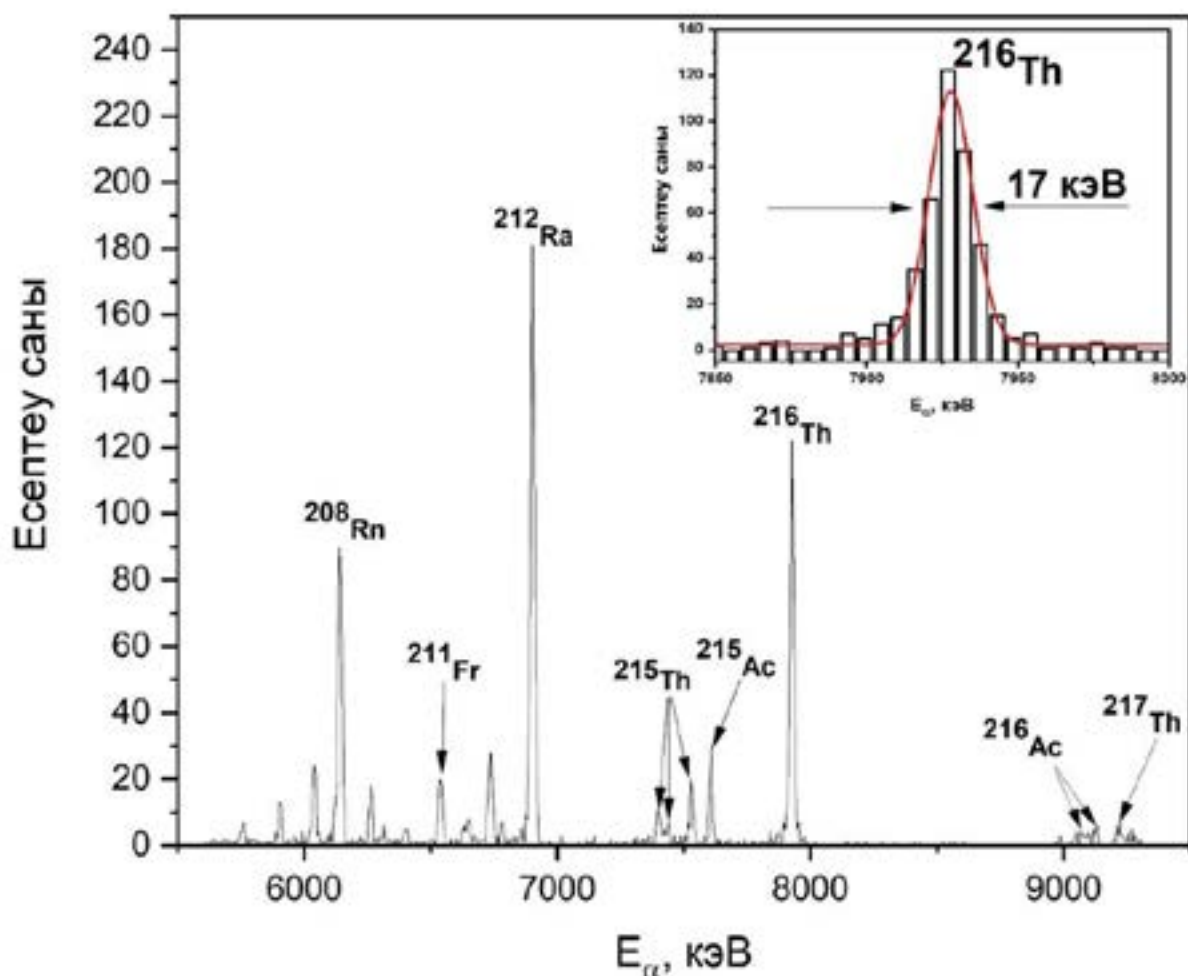
Фокальдік детекторға перпендикуляр сегіз кремнийлік жартылай өткізгіш детекторлары орналасқан (3-сурет, оң жақ панель, кремнийлік шұңқыр). Бүйірлік детекторлардың конфигурациясы 16×16 стрип, өлшемі $50 \times 60 \text{ мм}^2$, қалыңдығы 700 мкм. Олар фокальдік детектордың әр жағында жұптап орнатылған: жалпы 16 стрип параллель және 32 стрип перпендикуляр бағытта.



3-сурет. Сол панель: GABRIELA детектор жүйесінің толық жинағы. Оң панель: Түбінде фокальдік DSSD детекторы бар кремнийлік шұңқыр

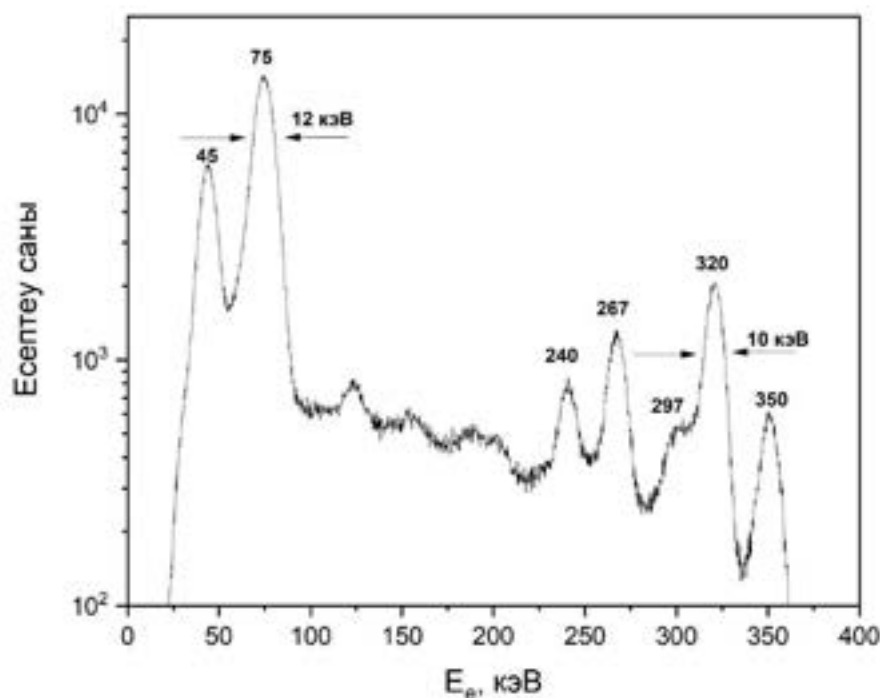
Кремнийлік «шұңқырдың» айналасына өте таза германийден (HPGe) жасалған төрт коаксиалды монокристалды цилиндрлік үлкен көлемді детектор, сонымен қатар, фокальдік DSSD детекторына максималды жақын (артқы жағында) бір Clover-детектор [18] қойылған.

Фокальдік детектордың α -бөлшектерді тіркеу тиімділігі 50% құрайды, ал спонтанды бөліну жарықшақтарының кем дегенде біреуін тіркеу тиімділігі 100% жетеді. Фокальдік DSSD детекторының энергиялық ажыратымдылығы 6–10 МэВ диапазонындағы α -бөлшектер үшін шамамен 15-25 кэВ құрайды. Кремнийлік детекторларды мөлшерлеу үшін түсетін сәуле түріне және эксперимент мақсаттарына байланысты әртүрлі тесттік реакциялар қолданылады. 4-суретте SHELS кинематикалық сепараторындағы $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb}$ КНБ реакциясы экспериментінде қолданылған $^{50}\text{Ti} + ^{170}\text{Er}$ тесттік реакциясында фокальдік DSSD детекторда тіркелген α -бөлшектердің энергиялық спектрі көрсетілген.



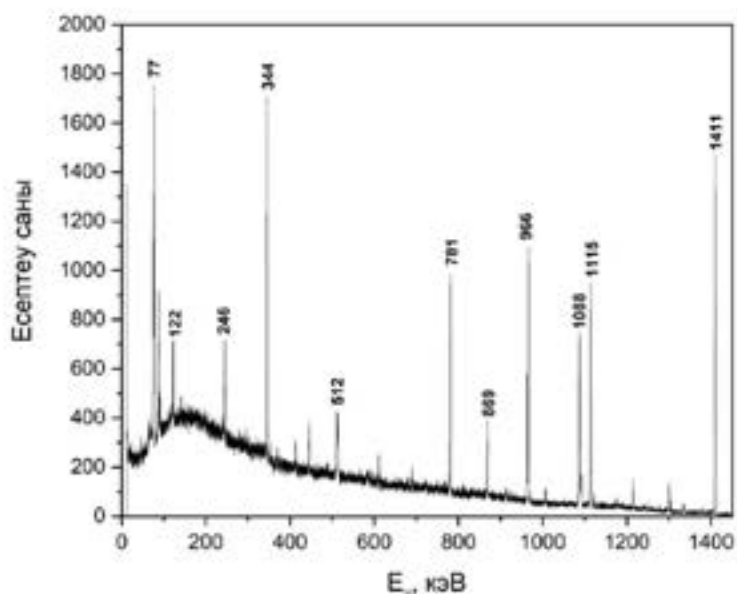
4-сурет. Фокальдік DSSD детекторының бір стрипында тіркелген $^{50}\text{Ti} + ^{170}\text{Er}$ тесттік реакциясының α -бөлшектерінің энергиялық спектрі. Оң жақ жоғары терезеде ^{216}Th (7922 кэВ) шыңының талдауы көрсетілген, энергиялық ажыратымдылық 17 кэВ-ті құрайды

Қосымша сызықтық күшейткіштерді пайдалана отырып, жүйені электрондарды тіркеу режиміне ауыстыруға болады, бұл детекторды β -ыдырау және кешіктірілген нейтрондар эмиссиясы немесе кешіктірілген бөліну сияқты үдерістерді зерттеу үшін қолдануға мүмкіндік береді. Бұл контекстте бүйірлік детекторларды мөлшерлеу үшін ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu стандартты көздері жиі қолданылады. 5-суретте бүйірлік детекторларда ^{133}Ba көзінен тіркелген конверсиялық электрондардың (КЭ) энергиялық спектрі көрсетілген.



5-сурет. Бүйірлік детекторлардың бір стрипында тіркелген ^{133}Ba көзінің конверсиялық электрондарының энергиялық спектрі. Энергиялық ажыратымдылық КЭ үшін 10-12 кэВ-ті құрайды

Германийлік детекторлар ^{60}Co , ^{152}Eu сияқты стандартты көздер арқылы мөлшерленеді. Детекторды қосымша мөлшерлеу және γ -кванттарды тіркеу тиімділігін анықтау үшін белгілі изомерлік ыдырауы бар ядролар түзілетін тесттік реакциялар қолданылады. 6-суретте ^{152}Eu көзінің γ -кванттарының энергиялық спектрі көрсетілген.



6-сурет. ^{152}Eu көзінің γ -кванттарының энергиялық спектрі. Энергиялық ажыратымдылық γ -кванттар үшін 2-3 кэВ-ті құрайды

2. Тәжірибе сипаттамасы

БЯЗИ ЯРЛ-да SHELS сепараторында $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$, $^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ және $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ КНБ реакцияларын зерттеу бойынша эксперименттер жүргізілді. ^{48}Ca , ^{50}Ti және ^{40}Ar ауыр ионды сәулелері У-400 үдеткіші арқылы шығарылды. Айналмалы нысандар ^{208}PbS (^{208}Pb изотопы бойынша тазалық дәрежесі 99.57%) және $^{209}\text{Bi}_2\text{O}_3$ (^{209}Bi изотопы бойынша тазалық дәрежесі 99.99%) 1.5 мкм қалыңдықтағы титандық субстратына жабынды ретінде бекітілді. 2-кестеде қолданылған нысаналардың сипаттамалары және түсетін сәулелердің нысана ортасындағы энергиясы көрсетілген. Эксперименттер мен олардан алынған нәтижелер туралы толық ақпаратты [19] мақаласынан табуға болады. Бұл жұмыста негізгі назар SHELS кинематикалық сепараторының ион-оптикалық элементтерінің баптауларына аударылады.

2-кесте. Қолданылған нысаналардың сипаттамалары және түскен сәулелердің нысана ортасындағы энергиясы

Реакция	$^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$	$^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$	$^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$
Нысана ортасындағы сәуленің энергиясы, МэВ	236 ± 2.4	243 ± 2.4	194 ± 2
Нысана материалы	^{208}PbS	^{208}PbS	Bi_2O_3
Нысана қалыңдығы, мкг/см ²	500 ± 50	437 ± 50	526 ± 50
Нысананың титандық субстрат қалыңдығы, мкм	1.5	1.5	1.5

SHELS жылдамдық фильтрі сәуле осіне қатысты төмен бұрышпен ($\pm 4^\circ$) қозғалған КНБ реакцияларының нысанаға ұқсас өнімдерін ұшу барысында бөліп алу үшін қолданылады. Сәуле-нысана комбинациясына және сәуле энергиясына байланысты нысанаға ұқсас КНБ өнімдерінің жылдамдығы құрама ядро жылдамдығынан v_{CN} шамамен 1.5 есе жоғары болды. SHELS-тің электрлік және магниттік өрістері КНБ реакция нәтижесінде туындайтын жылдамдықтары ($1.1 - 1.8$) v_{CN} болатын өнімдерді бөліп алу үшін бапталды. Басқа жылдамдықтағы реакция өнімдері сәуле тоқтатқышы көмегімен тежелді.

КНБ реакция өнімдерінің нысанадан фокальдік детекторларға трансмиссиясын максимизациялау мақсатында сепаратор элементтерінің оптималды параметрлерін анықтау үшін VASFIT [20] қосымшасы қолданылады. Бұл қосымшада бөлшектердің сепаратор арқылы ұшуын модельдеу үшін Монте-Карло әдісі пайдаланылады. 3-кестеде Q1 - ... - Q6 магниттік квадрупольдік линзалардағы токтың мәндері, E1 – E2 электростатикалық дефлекторларындағы кернеу, D22 магниттік дефлекторларындағы токтар және D8 ауытқытушы дипольдік магниттің тогы көрсетілген. Электростатикалық дефлектор пластиналарында жерге төзімділікті арттыру үшін симметриялы кернеу қолданылады – бір пластинаға оң, ал екіншісіне теріс потенциал беріледі.

3-кесте. SHELS сепараторының ион-оптикалық элементтерінің параметрлері

Ион-оптикалық элемент	$^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$	$^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$	$^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$
Q1	196.4 А	886 А	164.4 А

Q2	148.1 A	777 A	139.2 A
Q3	64.8 A	373 A	59.1 A
Q4	189.1 A	137 A	190.8 A
Q5	429.5 A	351 A	429.1 A
Q6	288.3 A	253 A	288.4 A
E1	(40-160)* кВ	125, 145, 165 кВ	120, 135, 150 кВ
E2	(40-160)* кВ	125, 145, 165 кВ	120, 135, 150 кВ
D22-1	532.1 A	504 A	493.2 A
D22-2	532.1 A	504 A	493.2 A
D8	430 A	449 A	400.3 A

*мәндер 10 кВ қадаммен өзгертіліп отырды

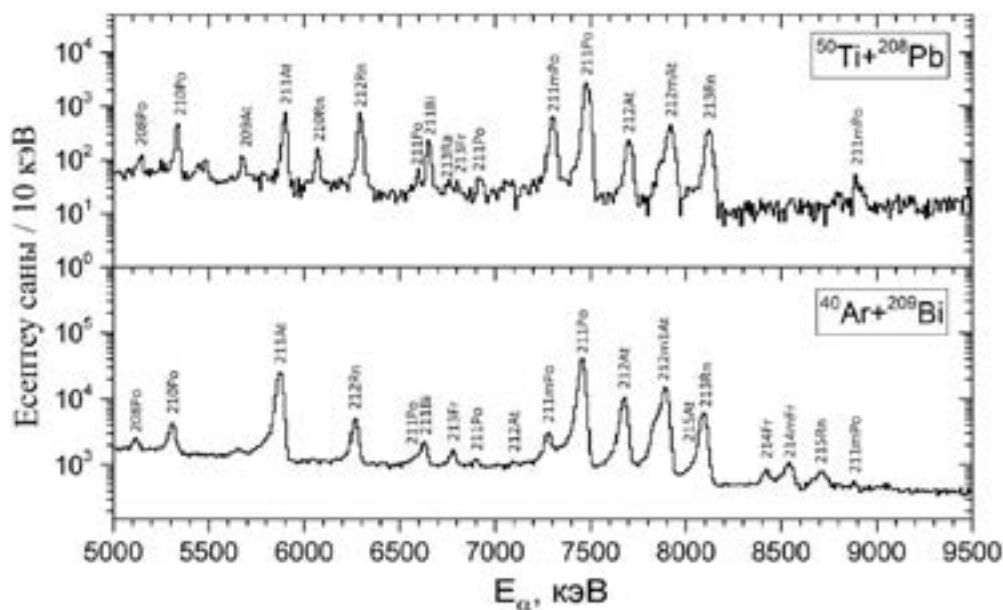
Сепарациядан кейін нысанадан ұшып шыққан және сепаратор арқылы өткен өнімдер сепаратордың фокальдік жазықтығында орналасқан GABRIELA детекторлық жүйесі арқылы тіркеледі. Бұл тәжірибеде сепаратордың детекторлық жүйесі екі старт-стоп уақыттық ұшу детекторынан, кремнийлік жартылай өткізгіш детекторлар жиынтығынан және бір Clover түріндегі γ -детектордан тұрды.

Сепараторда жүргізілетін әдеттегі тәжірибелерде алынатын КНБ реакция өнімдерін сәйкестендіру олардың α -ыдырау энергиясы, өмір сүру ұзақтығы және ұрпақ өнімдерімен корреляциясын табу арқылы жүзеге асырылады. Соңғы жағдайда сәйкестендіру фокальдік жазықтықтағы DSSD детекторының бірдей пикселінде тіркелген және α -ыдыраудың генетикалық тізбегіне жататын ядролардың уақыт бойынша корреляцияланған бірізді α -ыдыраулары арқылы жүргізіледі.

Спонтанды бөліну изотоптарының қасиеттерін зерттеуге бағытталған тәжірибелерде негізгі сәйкестендіру әдісі ретінде фокальдік DSSD детекторында бөліну жарықшақтарына тән үлкен амплитудалы сигналдарды (30-40 МэВ-тан жоғары) тікелей бақылау қолданылады. «ҚЯ-жарықшақ» корреляциясын іздеу әдісі бөлінетін ядролардың жартылай ыдырау периодын анықтауға және нысананың қоспа изотоптарында пайда болатын спонтанды бөлінудің қажетсіз өнімдерінен құтылуға мүмкіндік береді.

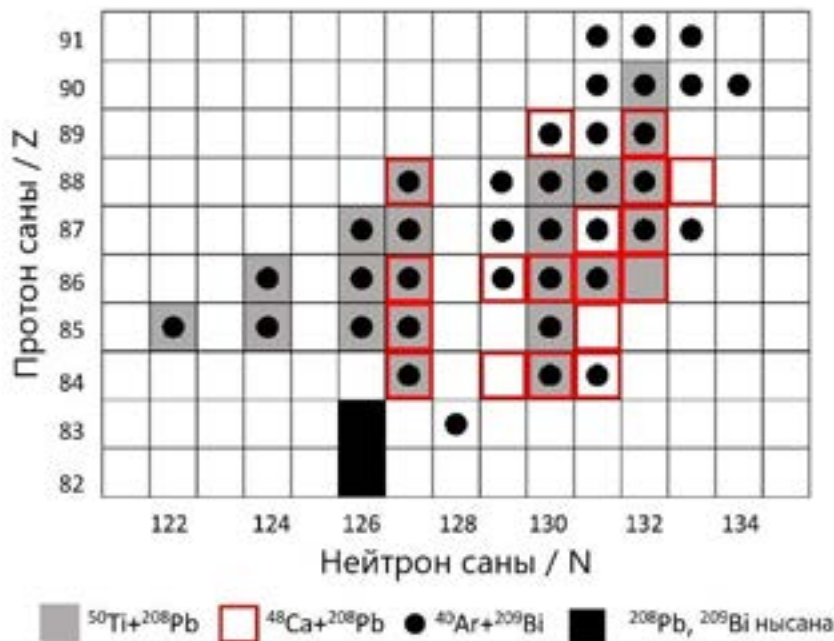
Нәтижелер мен талқылау

$^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ және $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ КНБ реакцияларында өлшенген α -спектрлер 7-суретте көрсетілген [19]. Олар қорғасын (Pb) және висмут (Bi) нысана ядроларынан тыс түзілген әртүрлі ядролардың орналасқанын көрсетеді. Ядроларды сәйкестендіру және іздеу үшін ҚЯ- α және α - α корреляциялық талдау әдісі қолданылды. Үш КНБ реакциялары нәтижесінде тіркелген массалары нысана ядроларынан ауыр өнімдердің жиынтығы 8-суретте берілген. Протондар саны нысана ядроларына қарағанда сегізге, ал нейтрондар саны жетіге дейін артық болатын изотоптар байқалды. Бұл жерде атап өтетін нәрсе: КНБ реакция өнімдеріндегі нейтрондар санына тек қана берілген нейтрондар саны ғана емес, сонымен қатар қозған бастапқы КНБ өнімдерінен шыққан нейтрондар да кіреді.



7-сурет. $^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ и $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ КНБ реакцияларында алынған нысанаға ұқсас өнімдердің өлшенген α -спектрлері. Деректер $^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ КНБ реакция өнімдері үшін 11.4 сағат және $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ реакциясы үшін 18 сағат бойы жиналды [19]

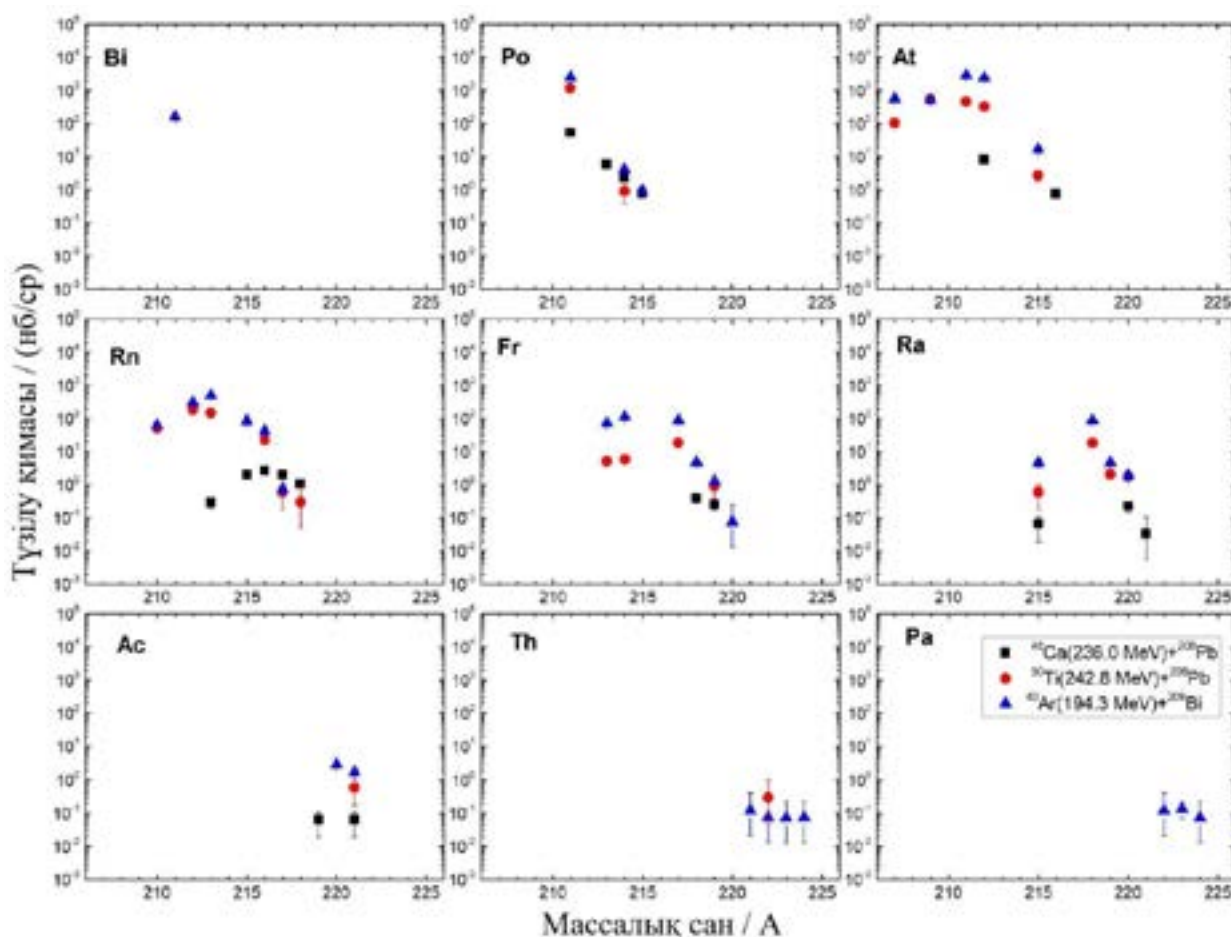
Ескерту: [19] деректер негізінде құрастырылған



8-сурет. Ядролар диаграммасында $^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ (сұр түсті шаршылар), $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ (қызыл ашық шаршылар) және $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ (қара шеңберлер) КНБ реакциялары нәтижесінде тіркелген нуклидтердің орналасу аймағы көрсетілген. Боялған қара шаршылар ^{208}Pb және ^{209}Bi нысаналарының орналасқан жерлерін көрсетеді [19]

Ескерту: [19] деректер негізінде құрастырылған

Сондай-ақ, зерттеліп отырған КНБ реакциялары кезінде туындайтын SHELS сепараторының бұрыштық акцептансына сәйкес болатын (15 мср) өнімдердің түзілу қималары алынды (9-сурет). Өлшенген ең төменгі қима 50 пб/ср деңгейінде болды, ондай мән өнімдердің жылдамдығы, сәуле интенсивтілігі және нысана қалыңдығы параметрлеріне сәйкес бес сағаттық дерек жинау кезінде қол жеткізілді.



9-сурет. $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$, $^{48}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ және $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ КНБ реакцияларында алынған Bi-тан Pa-қа дейінгі элементтердің изотоптары үшін массалық саннан тәуелді КНБ өнімдерінің түзілу қималары. Суретті оңай қабылдау үшін нүктелер сызықтармен қосылды [19]

Ескерту: [19] деректер негізінде құрастырылған

Қорытынды

$^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$, $^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ және $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ КНБ реакцияларының өнімдерін SHELS сепараторы көмегімен зерттеу бұл әдістің КНБ сирек ауыр өнімдерін бақылау үшін потенциалын көрсетті. SHELS арнайы КНБ реакцияларын зерттеуге арналмаса да, ол қималары 1 нб дейін болатын өнімдерді өлшеуге болатын сезімталдығын көрсетті. Бұл басқа әдістермен алынған нәтижелерден бірнеше есе жоғары. Осы жұмыста қолданылған инструменталды

әдістерді ауыр ион үдеткіштерінде КНБ реакциялары нәтижесінде алынатын өте ауыр элементтердің спонтанды бөліну қасиеттерін зерттеу үшін сәтті қолдануға болады деп сеніммен айта аламыз.

SHELS сепараторында жасалған GABRIELA детекторлық жүйесі трансурани ядролардың құрылымын зерттеу бойынша тәжірибелердің тиімділігін шетелдік аналогтармен салыстырғанда айтарлықтай арттырды. Бұл жүйе трансурани ядролардың құрылымын зерттеуге және жаңа ауыр нуклидтерді тіркеуге арналған күшті комбиниралған әдіс болып табылады. Жобада қойылған міндеттерді орындау заманауи теориялар мен есептеу әдістерінің физикалық негізділігін бағалау үшін қажетті маңызды ақпаратты алуды қамтамасыз етеді. Ұсынылған эксперименталды әдістер мен тәсілдер физикалық және техникалық тұрғыдан ең заманауи болып табылады. Айтарлықтай қаржылық және интеллектуалдық салымдар қажет болса да, ауыр иондар физикасындағы бұл бағыттар динамикалық түрде дамуда, сонымен қатар осындай зерттеулер жүргізуге қажетті үдеткіштік базасы бар ядролық-физикалық орталықтарда жоғары басымдылыққа ие.

БЯЗИ ЯРЛ-да КНБ реакцияларының өнімдерін сепарациялау және тіркеу әдістерін дамыту аясында, бірігу/берілу реакцияларынан алынатын өнімдердің жоғары трансмиссиясына бағытталған, сондай-ақ ауыр ядроларды тіркеудің заманауи әдістерін қамтитын У-400 үдеткішін жаңартумен (У-400Р) қатар STAR [21] (Separator for TransActinide Research) деп аталатын жаңа кинематикалық сепараторды жасау идеясы ұсынылды. Негізінен, жаңа сепаратор сәулеленудің жоғары интенсивтілігіне, фонды жоғары деңгейде басуға, толық бірігу және КНБ реакцияларында түзілетін ауыр және өте ауыр ядроларды жоғары дәрежеде өткізу қабілетіне, сондай-ақ барлық ыдырау модалары мен ядролардың массаларын өлшеуге бейімделген болады деп жоспарлануда.

Сонымен қатар, STAR сепараторын түсетін сәуленің осіне қатысты бұруға мүмкіндік болады, бұл өз кезегінде КНБ реакцияларында кең бұрыштық таралымда туындайтын өнімдерді зерттеуге идеалды болып есептеледі. Сепарациядан кейін, ізделінетін ядролардың ыдырау қасиеттеріне сүйене отырып, корреляциялық талдау әдісін қолданып, имплантацияланған ядроларды анықтауға мүмкіндік беретін детекторлық жүйелер көмегімен зерттеулер жүргізуге болады.

Алғыс айту, мүдделер қақтығысы

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің (№АР19577048 грант) қаржылық қолдауымен жүзеге асырылуда.

Авторлардың қосқан үлесі

Сайлаубеков Б.С. – жұмыстың барлық аспектілері үшін жауапты болуға келісім беру, мәтін жазу және оның мазмұнын сыни тұрғыдан қарау, зерттеу нәтижелерін жинау, талдау, зерттеу жұмысын жүргізу.

Свирихин А.И. – деректердің дұрыстығына, мақаланың барлық бөліктерінің тұтастығына байланысты мәселелерді реттеу, жариялау үшін мақаланың соңғы нұсқасын бекіту, зерттеу жұмысын жүргізу.

Тезекбаева М.С. – идея қалыптастыру, негізгі мақсаттар мен идеяларды дамыту, мақаланың рәсімделуіне елеулі үлес, зерттеу жұмысын жүргізу.

Девараджа Х.М. – зерттеу нәтижелеріне статистикалық талдау жүргізу, деректерді және дәлелдемелерді жинау, алынған деректерді түсіндіру, зерттеу жұмысын жүргізу.

Әжібеков А.Қ. – зерттеу жұмыстарын қаржыландыру мәселелерін реттеу, деректердің дұрыстығына көз жеткізу.

Исаев А.В. – мақаланың барлық бөліктерінің тұтастығына байланысты мәселелерді реттеу және мазмұнын сыни тұрғыдан қайта қарау, деректердің дұрыстығына көз жеткізу, зерттеу жұмысын жүргізу.

Мухин Р.С. – мәтіннің мазмұнын сыни тұрғыда қайта қарау, деректердің біртұтастығына мән беру.

Попов Ю.А. – зерттеу жұмысын өткізуге дайындық жұмыстарын жасау және техникалық тұрғыда қамтамасыз ету, зерттеу жұмысын жүргізу.

Әдебиеттер тізімі

1. D.C. Hoffman et al., *Excitation functions for production of heavy actinides from interactions of ^{40}Ca and ^{48}Ca ions with ^{248}Cm* , Phys. Rev. C 31(5), p.1763-1769 (1985). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.31.1763>
2. A. Türler et al., *Actinide production from the interactions of ^{40}Ca and ^{44}Ca with ^{248}Cm and a comparison with the $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$ system*, Phys. Rev. C 46(4), p.1364-1382 (1992). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.46.1364>
3. E. K. Hulet et al., *Spontaneous fission properties of ^{258}Fm , ^{259}Md , ^{260}Md , ^{258}No and $^{260}\text{[104]}$: Bimodal fission*, Phys. Rev. C 40(2), p.770–784 (1989). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.40.770>
4. S.Heinz et al., *Synthesis of new transuranium isotopes in multinucleon transfer reactions using a velocity filter*, Eur. Phys. J. A 52 (3), p.1-9 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1140/epja/i2016-16278-7>
5. H.M. Devaraja et al., *The Study of Multi-Nucleon Transfer Reactions for Synthesis of New Heavy and Superheavy Nuclei*, Physics of Particles and Nuclei Letters 19(2), p.693–716 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477122060085>
6. V.Zagrebaev and W.Greiner, *New way for the production of heavy neutron-rich nuclei*, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 35(12), p.125103 (2008). DOI: [10.1088/0954-3899/35/12/125103](https://doi.org/10.1088/0954-3899/35/12/125103)
7. V.Zagrebaev and W.Greiner, *New ideas on the production of heavy and superheavy neutron rich nuclei*, Nuclear Physics A 834(1-4), p.366c-369c (2010). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2010.01.041>
8. V. V. Saiko and A. V. Karpov, *Analysis of multinucleon transfer reactions with spherical and statically deformed nuclei using a Langevin-type approach*, Phys. Rev. C 99(1), p.014613 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.99.014613>
9. G. Münzenberg, W. Faust, S. Hofmann, P. Armbruster, K. Güttner, H. Ewald, *The velocity filter SHIP, a separator of unslowed heavy ion fusion products*, Nuclear Instruments and Methods 161(1), p.65-82 (1979). DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(79\)90362-8](https://doi.org/10.1016/0029-554X(79)90362-8)
10. Yu.Ts. Oganessian and V.K. Utyonkov, *Superheavy nuclei from ^{48}Ca -induced reactions*, Nuclear Physics A 944(3), p.62-98 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2015.07.003>
11. Yeremin A. V. et al., *The Vassilissa facility for electrostatic separation and study of complete fusion reaction products*, Nucl. Instr. Meth. A 274(2), p.528-532 (1989). DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(89\)90185-X](https://doi.org/10.1016/0168-9002(89)90185-X)
12. Yeremin A. V. et al, *The kinematic separator VASSILISSA performance and experimental results*, Nucl. Instr. Meth. A 350(1), p.608-617 (1994). DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)91265-3](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)91265-3)

13. Popeko A.G. et al., *Separator for Heavy Element Spectroscopy - Velocity filter SHELS*, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. Elsevier B 376(2), p.140–143 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2016.03.045>
14. Yeremin A. V. et al., *Experimental tests of the modernized VASSILISSA separator (SHELS) with the use of accelerated 50Ti ions*, Phys. Part. Nucl. Lett. 12(1), p.43–47 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477115010082>
15. Yeremin A. V. et al., *First experimental tests of the modernized VASSILISSA separator*, Phys. Part. Nucl. Lett. 12(1), p.35–42 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477115010070>
16. A. G. Popeko et al., *GABRIELA setup for nuclear spectroscopy of the transfermium element isotopes at the VASSILISSA separator*, Phys. At. Nucl. 69(7), p.1183–1187 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063778806070143>
17. Hauschild K. et al., *GABRIELA: A New Detector Array for γ -Ray and Conversion Electron Spectroscopy of Transfermium Elements*, Nucl. Instr. Meth. A 560(1), p. 388–394 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.01.107>
18. G. Duchene, F.A. Beck, P.J. Twin, G. de France, D. Curien, L. Han, C.W. Beausang, M.A. Bentley, P.J. Nolan, J. Simpson, *The Clover: a new generation of composite Ge detectors*, Nucl. Instrum. Methods A 432(4), p.90-110 (1999). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)00277-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00277-6)
19. Devaraja et al., *Systematic studies to produce heavy above-target nuclides in multinucleon transfer reactions*, Physics Letters B 862(3), p.139353 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2025.139353>
20. Popeko A.G., Malyshev O.N., Yeremin A.V., Hofmann S., *Monte-Carlo optimization of the transmission of recoil separators*, Nucl. Instr. and Meth. A 427(2), p.166-169 (1999). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01561-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01561-7)
21. A. Yeremin, *Prospects of investigation of multinucleon transfer reactions, Proceedings of the Programme Advisory Committee for Nuclear Physics 51st Meeting*, Dubna, Russia (2020)

Б.С. Сайлаубеков^{*1,2,3,5}, А.И. Свирихин^{3,4}, М.С. Тезекбаева^{1,3,4,5}, Х.М. Девараджа^{1,3},
А.К. Ажибеков^{1,3}, А.В. Исаев^{3,4}, Р.С. Мухин³, Ю.А. Попов^{3,4}

¹Кызылординский университет имени Коркыт ата, Кызылорда, Казахстан

²Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

³Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁴Государственный университет Дубна, Дубна, Россия

⁵Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

(E-mail: bsailaybekov@jinr.ru)

Использование кинематического сепаратора SHELS и детектирующей системы GABRIELA для изучения реакций многонуклонных передач

Аннотация. В Лаборатории ядерных реакций Объединённого института ядерных исследований (ЛЯР ОИЯИ) на сепараторе SHELS проводятся эксперименты по синтезу новых изотопов тяжелых ядер с $Z \geq 82$, исследованию свойств их радиоактивного распада и поперечных сечений

образования с целью изучения новых закономерностей структуры ядер тяжелых элементов, определяющих свойства радиоактивного распада и процессы формирования тяжелых ядер. Эти исследования важны для развития моделей ядерной стабильности, поиска долгоживущих сверхтяжелых изотопов и возможных практических применений в ядерной энергетике.

Основное внимание в работе будет уделено методике эксперимента – использованию детектирующей системы GABRIELA и кинематического сепаратора SHELS для исследования реакций многонуклонных передач.

В частности, будут представлены результаты экспериментов, проведенных на сепараторе SHELS с комбинированной детектирующей системой GABRIELA по изучению реакций многонуклонных передач $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$, $^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ и $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$, которые ведут к образованию ядер с числом протонов выше, чем у ядер мишени.

Проведение подобных экспериментов с использованием фильтра скоростей SHELS позволит лучше понять потенциал кинематических сепараторов для исследования реакций многонуклонных передач. При этом описанные в работе методы исследования успешно применяются в экспериментальном изучении свойств радиоактивного распада тяжелых и сверхтяжелых ядер.

Ключевые слова: кинематический сепаратор; детектирующая система; реакция многонуклонных передач; тяжелые ядра; α -распад.

B.S. Sailaubekov^{*1,2,3,5}, A.I. Svirikhin^{3,4}, M.S. Tezekbayeva^{1,3,4,5}, H.M. Devaraja^{1,3}, A.K. Azhibekov^{1,3}, A.V. Isaev^{3,4}, R.S. Mukhin³, Yu.A. Popov^{3,4}

¹Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan

²L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

³Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

⁴Dubna State University, Dubna, Russia

⁵Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

(E-mail: bsailaybekov@jinr.ru)

Use of SHELS kinematic separator and GABRIELA detection system for studying multinucleon transfer reactions

Abstract. At Flerov Laboratory of Nuclear Reactions of the Joint Institute for Nuclear Research (FLNR JINR), experiments are conducted using the SHELS separator to synthesize new isotopes of heavy nuclei with $Z \geq 82$, study their radioactive decay properties, and measure production cross-sections. These efforts aim to uncover new patterns in the structure of heavy nuclei that govern radioactive decay and the processes involved in the formation of heavy elements. This research is essential for refining theoretical models of nuclear stability, discovering long-lived superheavy isotopes, and exploring potential applications in nuclear technology.

This work focuses on the experimental methodology – the application of the GABRIELA detection system and the SHELS kinematic separator to investigate multinucleon transfer reactions.

In particular, we present results from experiments performed at the SHELS separator with the combined GABRIELA detection system for studying multinucleon transfer reactions in $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$,

$^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$, and $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ systems, which lead to the formation of nuclei with proton numbers higher than the target nuclei.

Conducting such experiments with the SHELS velocity filter will enhance our understanding of the potential of kinematic separators for studying multinucleon transfer reactions. The methodologies described here have been successfully applied in experimental investigations of the radioactive decay properties of heavy and superheavy nuclei.

Keywords: kinematic separator; detection system; multinucleon transfer reaction; heavy nuclei; α -decay.

References

1. D.C. Hoffman et al., *Excitation functions for production of heavy actinides from interactions of ^{40}Ca and ^{48}Ca ions with ^{248}Cm* , Phys. Rev. C 31(5), p.1763-1769 (1985), DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.31.1763>
2. A. Türler et al., *Actinide production from the interactions of ^{40}Ca and ^{44}Ca with ^{248}Cm and a comparison with the $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$ system*, Phys. Rev. C 46(4), p.1364-1382 (1992), DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.46.1364>
3. E. K. Hulet et al., *Spontaneous fission properties of ^{258}Fm , ^{259}Md , ^{260}Md , ^{258}No and $^{260}\text{[104]}$: Bimodal fission*, Phys. Rev. C 40(2), p.770-784 (1989), DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.40.770>
4. S. Heinz et al., *Synthesis of new transuranium isotopes in multinucleon transfer reactions using a velocity filter*, Eur. Phys. J. A 52 (3), p.1-9 (2016), DOI: <https://doi.org/10.1140/epja/i2016-16278-7>
5. H.M. Devaraja et al., *The Study of Multi-Nucleon Transfer Reactions for Synthesis of New Heavy and Superheavy Nuclei*, Physics of Particles and Nuclei Letters 19(2), p.693-716 (2022), DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477122060085>
6. V. Zagrebaev and W. Greiner, *New way for the production of heavy neutron-rich nuclei*, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 35(12), p.125103 (2008), DOI: [10.1088/0954-3899/35/12/125103](https://doi.org/10.1088/0954-3899/35/12/125103)
7. V. Zagrebaev and W. Greiner, *New ideas on the production of heavy and superheavy neutron rich nuclei*, Nuclear Physics A 834(1-4), p.366c-369c (2010), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2010.01.041>
8. V. V. Saiko and A. V. Karpov, *Analysis of multinucleon transfer reactions with spherical and statically deformed nuclei using a Langevin-type approach*, Phys. Rev. C 99(1), p.014613 (2019), DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.99.014613>
9. G. Münzenberg, W. Faust, S. Hofmann, P. Armbruster, K. Güttner, H. Ewald, *The velocity filter SHIP, a separator of unslowed heavy ion fusion products*, Nuclear Instruments and Methods 161(1), p.65-82 (1979), DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(79\)90362-8](https://doi.org/10.1016/0029-554X(79)90362-8)
10. Yu. Ts. Oganessian and V.K. Utyonkov, *Superheavy nuclei from ^{48}Ca -induced reactions*, Nuclear Physics A 944(3), p.62-98 (2015), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2015.07.003>
11. Yeremin A. V. et al., *The Vassilissa facility for electrostatic separation and study of complete fusion reaction products*, Nucl. Instr. Meth. A 274(2), p.528-532 (1989), DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(89\)90185-X](https://doi.org/10.1016/0168-9002(89)90185-X)
12. Yeremin A. V. et al, *The kinematic separator VASSILISSA performance and experimental results*, Nucl. Instr. Meth. A 350(1), p.608-617 (1994), DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)91265-3](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)91265-3)
13. Popeko A.G. et al., *Separator for Heavy ELEMENT Spectroscopy - Velocity filter SHELS*, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. Elsevier B 376(2), p.140-143 (2016), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2016.03.045>

14. Yeremin A. V. et al., *Experimental tests of the modernized VASSILISSA separator (SHELS) with the use of accelerated 50Ti ions*, Phys. Part. Nucl. Lett. 12(1), p.43–47 (2015), DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477115010082>
15. Yeremin A. V. et al., *First experimental tests of the modernized VASSILISSA separator*, Phys. Part. Nucl. Lett. 12(1), p.35–42 (2015), DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477115010070>
16. A.G. Popeko et al., *GABRIELA setup for nuclear spectroscopy of the transfermium element isotopes at the VASSILISSA separator*, Phys. At. Nucl. 69(7), p.1183–1187 (2016), DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063778806070143>
17. Hauschild K. et al., *GABRIELA: A New Detector Array for γ -Ray and Conversion Electron Spectroscopy of Transfermium Elements*, Nucl. Instr. Meth. A 560(1), p. 388–394 (2016), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.01.107>
18. G. Duchene, F.A. Beck, P.J. Twin, G. de France, D. Curien, L. Han, C.W. Beausang, M.A. Bentley, P.J. Nolan, J. Simpson, *The Clover: a new generation of composite Ge detectors*, Nucl. Instrum. Methods A 432(4), p.90–110 (1999), DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)00277-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00277-6)
19. Devaraja et al., *Systematic studies to produce heavy above-target nuclides in multinucleon transfer reactions*, Physics Letters B 862(3), p.139353 (2025), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2025.139353>
20. Popeko A.G., Malyshev O.N., Yeremin A.V., Hofmann S., *Monte-Carlo optimization of the transmission of recoil separators*, Nucl. Instr. and Meth. A 427(2), p.166–169 (1999), DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01561-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01561-7)
21. A. Yeremin, *Prospects of investigation of multinucleon transfer reactions*, *Proceedings of the Programme Advisory Committee for Nuclear Physics 51st Meeting*, Dubna, Russia (2020)

Авторлар туралы мәлімет:

Сайлаубеков Б.С. – хат-хабар авторы, PhD докторанты, кіші ғылыми қызметкер, жоба орындаушысы, Қорқыт ата атындағы Қызылорда университеті, Әйтеке би көшесі, 29А, 120014, Қызылорда, Қазақстан

Свирихин А.И. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, сектор басшысы, Біріккен ядролық зерттеулер институты, Жолио-Кюри көшесі, 6, 141980, Дубна, Ресей

Тезекбаева М.С. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, ғылыми қызметкер, жоба орындаушысы, Қорқыт ата атындағы Қызылорда университеті, Әйтеке би көшесі, 29А, 120014, Қызылорда, Қазақстан

Девараджа Х.М. – PhD, жетекші ғылыми қызметкер, жоба орындаушысы, Қорқыт ата атындағы Қызылорда университеті, Әйтеке би көшесі, 29А, 120014, Қызылорда, Қазақстан

Әжібеков А.Қ. – PhD, жоба жетекшісі, Қорқыт ата атындағы Қызылорда университеті, Әйтеке би көшесі, 29А, 120014, Қызылорда, Қазақстан

Исаев А.В. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, топ басшысы, Біріккен ядролық зерттеулер институты, Жолио-Кюри көшесі, 6, 141980, Дубна, Ресей

Мухин Р.С. – кіші ғылыми қызметкер, Біріккен ядролық зерттеулер институты, Жолио-Кюри көшесі, 6, 141980, Дубна, Ресей

Попов Ю.А. – топ басшысы, Біріккен ядролық зерттеулер институты, Жолио-Кюри көшесі, 6, 141980, Дубна, Ресей

Сайлаубеков Б.С. – автор для корреспонденции, докторант PhD, младший научный сотрудник, исполнитель проекта, Кызылординский университет имени Коркыт ата, улица Айтеке би, 29А, 120014, Кызылорда, Казахстан

Свирихин А.И. – кандидат физико-математических наук, начальник сектора, Объединенный институт ядерных исследований, улица Жолио-Кюри, 6, 141980, Дубна, Россия

Тезекбаева М.С. – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, исполнитель проекта, Кызылординский университет имени Коркыт ата, улица Айтеке би, 29А, 120014, Кызылорда, Казахстан

Девараджа Х.М. – PhD, ведущий научный сотрудник, исполнитель проекта, Кызылординский университет имени Коркыт ата, улица Айтеке би, 29А, 120014, Кызылорда, Казахстан

Ажібеков А.К. – PhD, руководитель проекта, Кызылординский университет имени Коркыт ата, улица Айтеке би, 29А, 120014, Кызылорда, Казахстан

Исаев А.В. – кандидат физико-математических наук, начальник группы, Объединенный институт ядерных исследований, улица Жолио-Кюри, 6, 141980, Дубна, Россия

Мухин Р.С. – младший научный сотрудник, Объединенный институт ядерных исследований, улица Жолио-Кюри, 6, 141980, Дубна, Россия

Попов Ю.А. – начальник группы, Объединенный институт ядерных исследований, улица Жолио-Кюри, 6, 141980, Дубна, Россия

Sailaubekov B.S. – corresponding author, PhD student, junior researcher, project executor, Korkyt Ata Kyzylorda University, 29A Aiteke bi street, 120014, Kyzylorda, Kazakhstan

Svirikhin A.I. – PhD in physics, head of sector, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie street, 141980, Dubna, Russia

Tezekbayeva M.S. – PhD in physics, researcher, project executor, Korkyt Ata Kyzylorda University, 29A Aiteke bi street, 120014, Kyzylorda, Kazakhstan

Devaraja H.M. – PhD in physics, leading researcher, project executor, Korkyt Ata Kyzylorda University, 29A Aiteke bi street, 120014, Kyzylorda, Kazakhstan

Azhibekov A.K. – PhD in physics, project manager, Korkyt Ata Kyzylorda University, 29A Aiteke bi street, 120014, Kyzylorda, Kazakhstan

Isaev A.V. – PhD in physics, head of group, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie street, 141980, Dubna, Russia

Mukhin R.S. – junior researcher, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie street, 141980, Dubna, Russia

Popov Yu.A. – head of group, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie street, 141980, Dubna, Russia



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).