

## Трансуран ядроларының спонтанды бөліну қасиеттерін зерттеу үшін газ толтырылған GRAND сепараторының фокальді жазықтығында SFiNx детекторлық жүйесін қолдану

**Б.С. Сайлаубеков<sup>1,2,3\*</sup>, А.И. Свирихин<sup>1,2,4</sup>, М.С. Тезекбаева<sup>1,2,4</sup>,  
Х.М. Девараджа<sup>1,2</sup>, А.В. Исаев<sup>1,2,4</sup>, Р.С. Мухин<sup>2</sup>, Ю.А. Попов<sup>2,4</sup>**

<sup>1</sup>Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Біріккен ядролық зерттеулер институты, Дубна, Ресей

<sup>3</sup>Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

<sup>4</sup>Дубна мемлекеттік университеті, Дубна Ресей

E-mail: \*bsailaybekov@jinr.ru, asvirikhin@jinr.ru, tezekbaeva@jinr.ru, devaraja@jinr.ru, isaev@jinr.ru, rmukhin11@gmail.com, yarpopov8511@yandex.ru, zhumadilovk@gmail.com

**Аңдатпа.** Біріккен ядролық зерттеулер институтында (БЯЗИ) ауыр спонтанды бөлінетін ядролардың синтезі және олардың ыдырау сипаттамаларын зерттеу саласында көпжылдық тәжірибе жинақталған. Осы зерттеулердің мүмкіндіктерін кеңейту үшін Аса ауыр элементтер фабрикасы (ААЭФ) құрылды, оның негізгі элементі жоғары қарқынды сәулелермен жұмыс істеуге оңтайландырылған DGFERS-2 газ толтырылған сепараторы болып табылады. ДЦ-280 үдеткішін DGFERS-2 сепараторымен бірге қолдану соңғы жылдары трансурандық нысаналармен бірқатар сәтті тәжірибелер жүргізуге мүмкіндік берді. Қондырғының жоғары тиімділігі рекордтық қысқа мерзімде (шамамен бір ай) ААЭ изотоптарының ыдырауының 100 оқиғасына дейін тіркелуімен расталды, бұл өте аз қималар жағдайында айтарлықтай жетістік болып табылады.

DGFERS-2 сепараторының сәтті пайдаланылуы GRAND әмбебап газ толтырылған сепараторының жобасын әзірлеуге негіз болды, оның фокальді жазықтығына SFiNx детекторлық жүйесін орналастыру жоспарлануда.

Бұл мақалада негізгі назар трансурани ядроларының спонтанды бөліну қасиеттерін зерттеу үшін қолданылған тәжірибе әдістемесіне және GRAND сепараторында SFiNx жүйесін пайдалану перспективаларына аударылған. GRAND сепараторында жүргізілген сынақ тәжірибелерінің және SHELS сепараторында SFiNx детекторлық жүйесін қолдана отырып жүргізілген тәжірибелердің нәтижелері ұсынылған. Осы жүйені ААЭФ инфрақұрылымына енгізу мүмкіндіктері қарастырылуда. Ұсынылып отырған әдістеменің басты артықшылығы — бөлінудің лездік нейтрондарын тіркеу мүмкіндігі, бұл ауыр және аса ауыр ядролардың спонтанды бөліну нейтрондарының еселігін өлшеу бойынша тәжірибелерді жоспарлау үшін жаңа мүмкіндіктер ашады. Жасалған тәжірибелік әдістер осы саладағы болашақ зерттеулер үшін елеулі әлеуетке ие.

**Түйін сөздер:** газ толтырылған сепаратор, нейтронды детектор, лездік нейтрондар еселігі, спонтанды бөліну, трансурани ядролар.

Жіберілді 9.04.2023. Өзгертілді 12.05.2023. Қабылданды 01.06.2023. Онлайн қол жетімді 30.09.2023

\*хат-хабар авторы

## Кіріспе

Ауыр трансурани ядроларын тәжірибелік зерттеу қазіргі ядролық физиканың іргелі міндеттерінің бірі болып табылады және айтарлықтай әдістемелік қиындықтармен байланысты. Негізгі қиындықтар зерттелетін ядролардың түзілуінің өте төмен қималарымен және олардың қысқа өмір сүру уақыттарымен шартталған. Мұндай зерттеулерді жүргізу нысаналарды ұзақ уақыт бойы сәулелендіру циклдарын, содан кейін реакция өнімдерін бөліп алу мен тіркеудің жоғары тиімді әдістерін қолдануды талап етеді. Осы аймақтағы ядролардың көпшілігі үшін ыдыраудың басым арнасы спонтанды бөліну болып табылады – бұл химиялық элементтердің болу шекараларын түсінуге жақындататын, жан-жақты зерттеуді қажет ететін күрделі үдеріс.

Ядроның бөліну энергиясы басым түрде жарықшақтардың қозу энергиясына ауысады, бұл энергия лездік нейтрондардың булануы және  $\gamma$ -кванттардың шығарылуы арқылы бөсеңдетіледі. Осы тұрғыдан,  $Z > 92$  ядролардың спонтанды бөліну сипаттамаларын зерттеу үдерістің тұтас теориясын құру үшін шешуші мәнге ие, өйткені қолданыстағы үлгілер оның барлық аспектілерін толыққанды сипаттай алмайды. Қазіргі уақытқа дейін жинақталған тәжірибелік мәліметтер массиві жартылай ыдырау мерзімдерінің парциалды өлшемдерін [1], бөліну жарықшақтарының массалық және энергетикалық үлестірімдерін [2] қамтиды. Лездік нейтрондардың еселігін өлшеу [3–4] ерекше маңызға ие, өйткені бұл өлшемдер бөліну динамикасы туралы ақпарат береді және реакцияның энергетикалық балансын қалпына келтіруге мүмкіндік береді. Нейтрондардың орташа шығымын және оның үлестірімдерін анықтау реактордың кризистік шарттарын бағалау үшін өте маңызды, бұл тізбекті ядролық реакцияны басқарудың қауіпсіздігі мен тиімділігі мәселелеріне тікелей әсер етеді.

БЯЗИ-дың Г. Н. Флёрв атындағы Ядролық реакциялар зертханасында (ЯРЗ) бөліну нейтрондарын зерттеу заманауи SFiNx (Spontaneous Fission, Neutrons and X-rays) детекторлық жүйесін [5-6] қолдану арқылы жүргізіледі. Бұл жұмыста осы жүйені жаңа газ толтырылған GRAND (Gas-filled Recoil Analyzer and Nuclei Detector) сепараторының [7] фокальді жазықтығында қолдану перспективалары қарастырылады. SFiNx пен GRAND комбинациясы ауыр және аса ауыр ядролардың қиын қолжетімді аймағында спонтанды бөліну нейтрондарының шығымдары туралы алғаш рет толық деректер алуға мүмкіндік береді. Бұл нәтижелер бөлінудің теориялық үлгілерін дамытуда айтарлықтай прогресті қамтамасыз етеді, жүздеген нуклондарды қамтитын үдеріс динамикасын түсінуді тереңдетеді және жекелеген изотоптарда бөлінудің жаңа модаларының ашылуына әкелуі мүмкін.

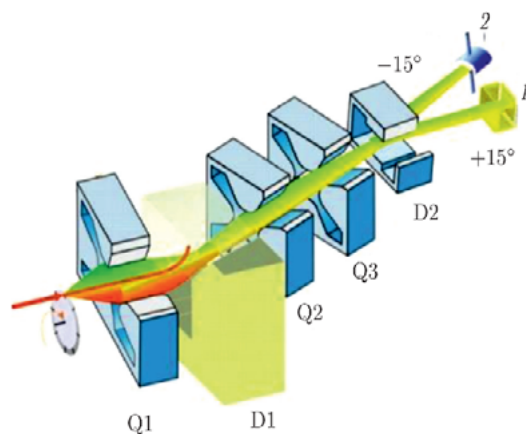
## Әдіснама

### 1. Тәжірибелік қондырғы сипаттамасы

#### GRAND газ толтырылған сепараторы

ДЦ-280 үдеткішінің сәулелерінде DGFRS-2 (Dubna Gas-Filled Recoil Separator) [8] газ толтырылған кинематикалық сепараторын тиімді пайдалану ұқсас ион-оптикалық Q-D-QQ-D схемасын (Q — квадрупольдік линза, D — дипольдік магнит) қолданатын әмбебап газ толтырылған сепаратор жасау идеясына әкелді. Жаңа GRAND сепараторының схемасы 1-суретте көрсетілген.

Газ толтырылған сепаратордың жұмыс істеу принципі келесідей. ДЦ-280 үдеткішінен шыққан  $^{48}\text{Ca}$  иондарының сәулесі дифференциалды сору жүйесі арқылы өтеді, бұл жүйе GRAND көлеміндегі газ бен ион өткізгіш көлеміндегі жоғары вакуумды ( $10^{-7}$  Торр) бөлуді қамтамасыз етеді, және нысанаға түсіп, онда нысана ядроларымен реакцияға түседі. Энергия мен импульстің сақталу заңдарына сәйкес, құрама ядродан бірнеше нейтронның булануы кезінде түзілетін қайтарма ядролар (ҚЯ) нысанадан ұшып шығады. Бұл ядролар жеткілікті жоғары зарядқа (актинидті нысаналармен реакциялар үшін  $q \approx 19^+$ ) және кең зарядтық үлестірімге ие. ҚЯ-дың сепаратордағы газ атомдары мен молекулаларымен соқтығысуы, заряд алмасу процестерімен қатар жүріп, үлестірімнің тарылуына және оның орташа мәнінің шамамен  $6^+$ -ға дейін төмендеуіне әкеледі.  $^{48}\text{Ca}$  сәуле иондары үшін заряд алмасу қимасы ҚЯ-мен салыстырғанда олардың жоғары жылдамдығына байланысты (3-4 есе) аз, бұл сәуледегі зарядтық күйлердің қатты денелік күйлерге жақын болуына мүмкіндік береді ( $\approx 17^+$ ). Бірдей импульстер кезінде бір магнит өрісіндегі ҚЯ мен сәуле иондарының траекториялары зарядтардағы үш еселік айырмашылыққа байланысты әр түрлі болады, бұл ҚЯ-дың сәуле иондарынан тиімді сепарациясын қамтамасыз етеді.



**1, 2 – детекторлық жүйелер орналасатын фокальді жазықтық  
1-сурет. GRAND газ толтырылған сепаратор схемасы**

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [7]

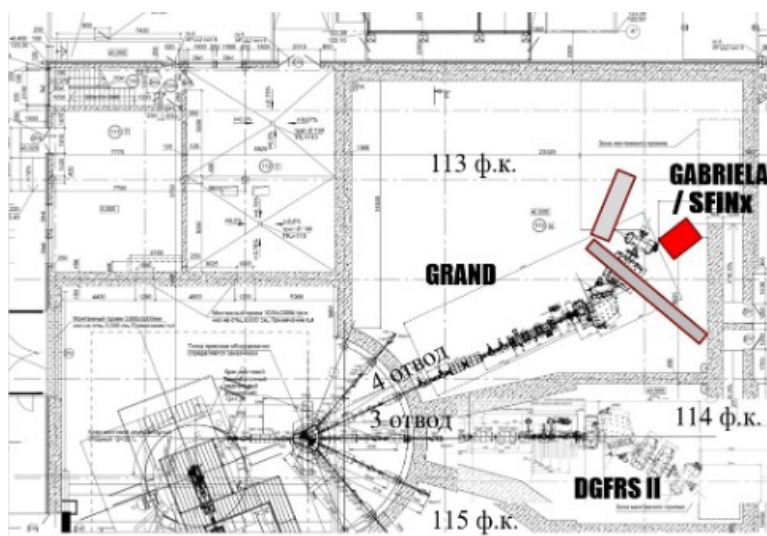
Әрі қарай ҚЯ алдымен қысымы 0.7 Торр гелиймен толтырылған бірінші квадрупольдік магнит Q1 камерасына түседі. Бұл камерада ядролар бірінші дипольдік магнит D1 полюстерінің арасында орналасқан қабырғалармен соқтығысу кезіндегі жоғалтуларды азайту үшін тігінен фокусталады. Мұнда ҚЯ-дың сәуле иондарынан негізгі сепарациясы жүреді. Содан кейін ҚЯ Q2-Q3 квадрупольдік линзалар дублетімен фокусталады, екінші дипольдік магнит D2 камерасына түседі, мұнда ҚЯ-дың жоғары энергиялы протондар мен  $\alpha$ -бөлшектерден сепарациясы жүзеге асырылады. Осыдан кейін ядролар сәулесі сепаратордың гелиймен толтырылған көлемінен шығып, ұшып өту жүйесінен өтеді және детектор камерасына түседі.

Бұл сепаратордың DGFRS-2-ден басты айырмашылығы ҚЯ-ды D2 дипольдік магнитінде  $\pm 15^\circ$  бұрышқа ауытқыту мүмкіндігі болып табылады (DGFRS-2-дегі  $+10^\circ$ -қа қарағанда). Негізгі D1 дипольдік магнитінде ҚЯ DGFRS-2-дегідей бұрышқа бұрылады, бірақ қарама-қарсы бағытта. Бұл ДЦ-280 кешенінің тәжірибелік кабиналарындағы сәуле желілерінде физикалық қондырғылардың орналасуымен шартталған (2-суретті қараңыз). Көрнекілік үшін 1-кестеде ауыр элементтер изотоптарының синтезі және қасиеттерін зерттеу жөніндегі тәжірибелерде қолданылатын қолданыстағы газ толтырылған сепараторлардың параметрлері келтірілген.

**1-Кесте. Ауыр элементтер изотоптарын синтездеу және зерттеу тәжірибелерінде қолданылатын газ толтырылған сепараторлардың салыстырмалы сипаттамалары [7]**

Қондырғы	Конфигурация	Бұру бұрышы, °	Макс $B \cdot \rho$ Тл·м	Дисперсия, мм/% $B \cdot \rho$	Ұзындығы, м
DGFRS-1	$D_v Q_h Q_v$	23	3.1	7.5	4.07
DGFRS-2	$Q_v D_h Q_h Q_v D$	(32+10)	3.35	32.8	7.41
BGS	$Q_v D_h D$	(25+45)	2.5	20.2	4.6
GARIS-1	$D_{vh} Q_h Q_v D$	(45+10)	2.16	9.7	5.76
GARIS-2	$Q_v D_h Q_h Q_v D$	(30+7)	2.43	19.3	5.06
TASCA	$D Q_h Q_v$	30	2.4	9.0	3.5
RITU	$Q_v D Q_h Q_v$	25	2.2	10	4.8
SHANS-2	$Q_v D_h Q_h Q_v D$	(30+10)	2.5	21.7	5.85
GRAND	$Q_v D_h Q_v Q_h D$	(32±15)	3.35	32.8	7.95

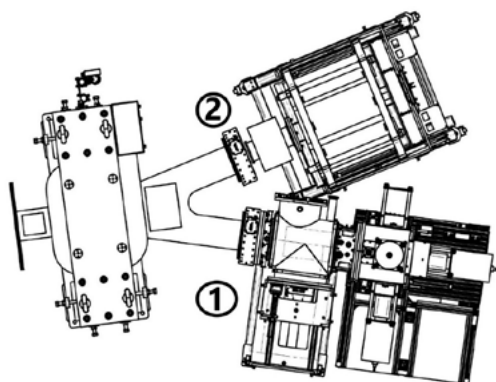
Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [7]



**2-сурет. GRAND және DGFRS-2 сепараторларының ДЦ-280 кешенінің тәжірибелік кабиналарында орналасу схемасы**

Соның нәтижесінде, GRAND сепараторының фокальді жазықтығында екі детекторлық жүйені орнату жоспарлануда (3-суретті қараңыз):

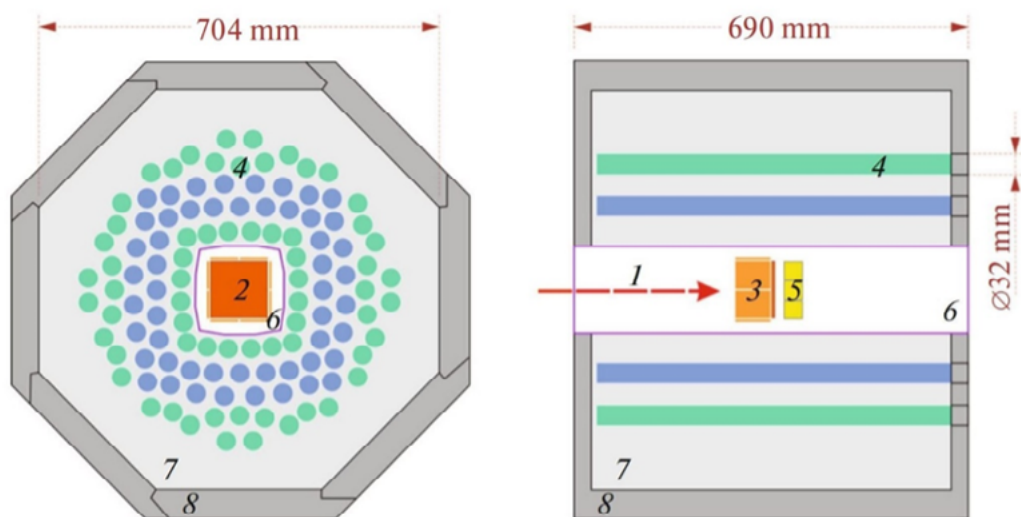
1. Трансуран ядролары изотоптарының  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - спектрометриясы бойынша тәжірибелер жүргізуге арналған GABRIELA (Gamma Alpha Beta Recoil Investigations with the Electromagnetic Analyzer) [9] детекторлық жүйесі.
2. Ауыр ядролардың спонтанды бөліну кезіндегі лездік нейтрондар спектрометриясы бойынша тәжірибелерді орындауға арналған SFiNx детекторлық жүйесі



**3-сурет. Газ толтырылған GRAND сепараторының фокальді жазықтығында детекторлық жүйелердің ықтимал орналасу схемасы**

### **SFiNx детекторлық жүйесі**

2022 жылы «Нейтрондық бөшке» [10] детекторын жаңғырту нәтижесінде жетілдірілген SFiNx детекторлық жүйесі әзірленіп, пайдалануға енгізілді. Бұл жүйе (4-суретті қараңыз) DSSD (Double-Sided Silicon Strip Detector) құрастырылымымен жабдықталған вакуумдық камераның периметрі бойынша біркелкі орналасқан 116 нейтрондық  $^3\text{He}$ -санауыштарды қамтиды.

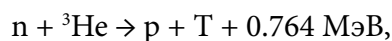


1 – ҚЯ; 2 – фокальді DSSD детектор; 3 – бүйірлік Si-детекторлары; 4 –  $^3\text{He}$ -санауыштар; 5 – сцинтиллятор; 6 – вакуумдық камера; 7 – баяулатқыш; 8 – сыртқы фоннан қорғаныс

#### 4-сурет. SFiNx схемасы (алдыңғы көрінісі – сол жақта; бүйір көрінісі – оң жақта)

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [6]

Спонтанды бөлінудің лездік (жылдам) нейтрондары полиэтилендік баяулатқышта термализацияға ұшырайды, нәтижесінде жылулық энергияларға ( $\sim 0,025$  эВ) жетеді. Термализацияланған нейтрондар келесі ядролық реакция арқылы  $^3\text{He}$ -санауыштармен тиімді тіркеледі:



жылулық нейтрондар үшін ерекше үлкен қармау қимасымен (5330 барн) сипатталады.

Нейтрондық санауыштар тот баспайтын болаттан жасалған (катод), сыртқы диаметрі шамамен 32 мм және ұзындығы 500 мм болатын, газбен ( $^3\text{He}$ ) толтырылған цилиндрлік детекторлар болып табылады. Олардың ішінде анод қызметін атқаратын жұқа алтын жалатылған вольфрам жіпшесі орналасқан. Жылулық нейтрондар гелиймен әрекеттескенде, протон мен тритон бөлінетін ядролық реакция жүреді, олар детектордағы газды иондайды. Пайда болған зарядталған бөлшектер түсірілген электр өрісінің әсерінен электродтарда ток импульсін тудырады, бұл нейтрондарды тіркеуге мүмкіндік береді. Вольфрам жіпшесінің алтын жалатылуы электр өрісінің біркелкілігін және детектор жұмысының тұрақтылығын қамтамасыз етеді, ал корпусың берік болат конструкциясы тәжірибе жағдайында сенімділікке кепілдік береді.

Санауыштар 7 атмосфера қысымдағы  $^3\text{He}$ -мен толтырылған, құрамында аргон қоспасы (10%-ға дейін) бар. Бұл протондар мен тритондардың төмен өту қашықтығын сақтай отырып, ядролық реакцияның зарядталған өнімдерінің энергиясын тиімді жұтуды қамтамасыз етеді. Зарядталған бөлшектер мен  $\gamma$ -фонынан болатын электрондардың өту қашықтықтарының әртүрлі болуының арқасында импульстердің амплитудалық спектрі нейтрондық оқиғаларды (тән шың) және фондық  $\gamma$ -сигналдарды (кіші амплитудалар облысы) нақты ажыратады. Нейтрондарды сұрыптау үшін сигналдардың табалдырықтық дискриминациясы қолданылады. Нейтрондық санауыштардың толық сипаттамалары 2-кестеде берілген.

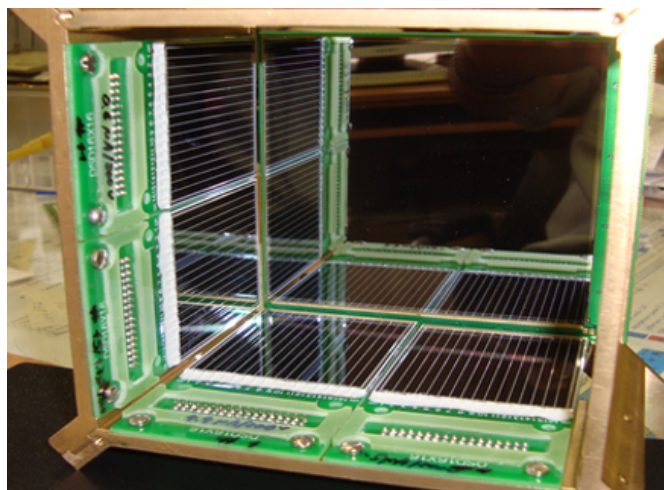
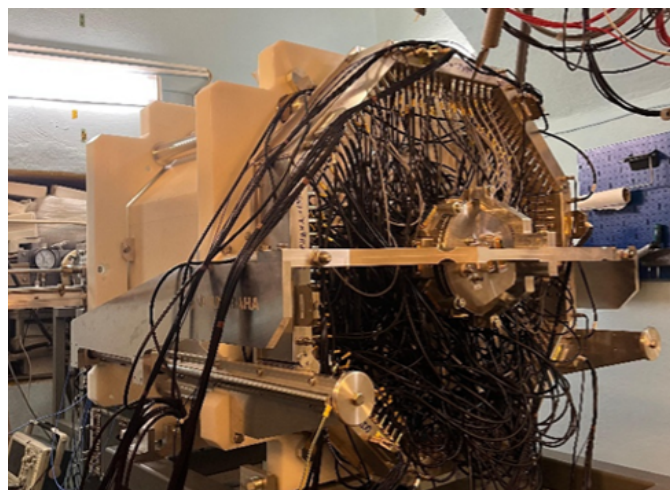
Нейтрондардың полиэтилендік баяулатқышы (5-сурет, сол панель) биіктігі 630 мм, сырттай сызылған шеңбердің диаметрі 762 мм болатын сегізбұрышты призма болып табылады. Фондық нейтрондарды азайту үшін конструкция бүйір қырлары бойынша қалыңдығы 50 мм, ал жоғарғы және төменгі табандарында 30 мм борленген полиэтиленмен (5% бор қоспасы) қорғалған. Мұндай конфигурация жылдам нейтрондардың тиімді баяулауын және сонымен бірге паразиттік нейтрондық фонның жұтылуын қамтамасыз етеді.

## 2-Кесте. Құрастырылымда қолданылатын нейтрондық санауыштардың сипаттамалары [6]

Өндіруші	Диаметрі, мм	Белсенді ұзындығы, мм	Жұмыс кернеуі, В	Қабат	Саны	<sup>3</sup> He қысымы, атм
"Консенсус" ҒӨФ	32	530	1400	1	20	7
				4	44	
ЯРЗ БЯЗИ	460	1775	2	24		
			3	28		

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [6]

Нейтрондық санауыштар ішіне DSSD құрастырылымы орналастырылған вакуумдық камераны қоршайды. 128 × 128 стриптен тұратын фокальды кремний детекторының активті аймағы 100 × 100 мм<sup>2</sup> және қалыңдығы 500 мкм. Конфигурациясы 16 × 16 стрип, өлшемдері 50 × 60 мм<sup>2</sup> және қалыңдығы 700 мкм болатын сегіз кремнийлі жартылай өткізгіш детекторлары фокальді детекторға перпендикуляр орнатылып, "құдық" тәрізді құрастырылымды құрайды (5-сурет, оң панель).



5-сурет. SFiNx детекторлық жүйесі (сол панель), DSSD құрастырылымы (оң панель)

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [6]

Спонтанды бөліну кезінде пайда болатын  $\gamma$ -сәулені тіркеу үшін DSSD-детекторының артына CLLBC кристаллынан ( $\text{Cs}_2\text{LiLaBr}_{4-8}\text{Cl}_{1-2}\text{:Ce}$ ) [11] жасалған сцинтиллятор орнатылған. Бұл детектор пайдалы сигналдарды фоннан импульстердің пішіні бойынша ажыратуға мүмкіндік береді. DSSD сигналдары мен CLLBC-дегі  $\gamma$ -жарқылдары арасындағы сәйкестіктер бөліну актілерін сенімді түрде сәйкестендіруге және деректерді фондық оқиғалардан тазартуға көмектеседі.

248Сm көзімен нейтрондық жүйені калибрлеу детектордың негізгі параметрлерін анықтауға мүмкіндік берді [5]: жеке нейтронды тіркеу тиімділігі  $(55 \pm 1)\%$  және жүйедегі нейтрондардың орташа өмір сүру (нейтрондардың жылулық энергияларға дейін баяулау уақыты мен  $^3\text{He}$  ядроларымен қармау сәтінге дейінгі диффузия уақытының қосындысымен анықталатын) уақыты  $(18 \pm 1)$  мкс. Бұл параметр уақыттық талдау үшін өте маңызды, себебі нейтрондық оқиғаларды іздеудің оңтайлы терезесін

анықтайды – оның ұлғаюы фондық сәулеленумен кездейсоқ сәйкестіктер ықтималдығының артуына әкеледі. Фокальді DSSD-де бөліну жарықшақтарының тіркелуі нейтрондарды детекторлау үшін ұзақтығы 128 мкс болатын уақыт терезесінің ашылуын бастайды, бұл бөліну актісіне нейтрондық еселікті 8 нс қадаммен дәл өлшеуді қамтамасыз етеді.

Бұл құрастырылым  $\alpha$ -бөлшектерін, спонтанды бөліну жарықшақтарын және фокальді DSSD детекторынан ұшып шығатын жарықшақтардың лездік нейтрондарын тіркеуге мүмкіндік береді. Осы құрастырылымдағы фокальді детектордың тіркеу тиімділігі  $\alpha$ -бөлшектер үшін 50% және кем дегенде бір жарықшақты тіркеу үшін 100% құрайды.

## 2. Тәжірибе сипаттамасы

Г.Н. Флёров атындағы ЯРЗ-да изотоптарды синтездеу және олардың спонтанды бөліну қасиеттерін зерттеу бойынша тәжірибелер жүргізілді. ДЦ-280, У-400 үдеткіштерінен алынған  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{40}\text{Ar}$  ауыр иондарының сәулелері айналмалы нысанаға бағытталды, онда толық бірігу реакциялары нәтижесінде ізделінген изотоптар түзілді. Сипатталып отырған тәжірибелерде жоғары байытылған  $^{204,206,208}\text{PbS}$  айналмалы нысаналары, сондай-ақ детекторлық жүйені мөлшерлеу үшін  $^{164}\text{Dy}$ ,  $^{174}\text{Yb}$  стационарлық (қозғалмайтын) нысаналары қолданылды. 3-кестеде пайдаланылған айналмалы нысаналардың сипаттамалары және түскен сәулелердің энергиясы (бұдан әрі барлық жерде сәуленің нысана ортасындағы энергиясы беріледі) келтірілген.

## 3-Кесте. Пайдаланылған нысаналардың сипаттамалары және түскен сәулелердің энергиясы

Толық бірігу реакциясы	$^{48}\text{Ca}+^{204}\text{Pb}$	$^{48}\text{Ca}+^{206}\text{Pb}$	$^{40}\text{Ar}+^{206}\text{Pb}$	$^{40}\text{Ar}+^{208}\text{Pb}$
$E_{1/2}$ , МэВ	$215 \pm 2$	$215 \pm 2$	$182 \pm 2$	$183 \pm 3$
Нысана материалы	204PbS	206PbS	206PbS	208PbS
Нысана қалыңдығы, мкг/см <sup>2</sup>	$450 \pm 45$	$350 \pm 35$	$362 \pm 36$	$450 \pm 45$
Қорғасын изотопының тазалық дәрежесі, %	99.94	~ 97	99.51	> 99

БЯЗИ ЯРЗ-да әлемдік тәжірибеде алғаш рет қорғасын сульфидіне (PbS) негізделген нысаналар сәтті әзірленіп, тәжірибелерге енгізілді. Бұл нысаналардың қалыңдығы 350–450 мкг/см<sup>2</sup> аралығында өзгереді. Мұндай нысаналардың негізгі пайдалану артықшылығы олардың ыстыққа төзімділігіне байланысты. Таза қорғасынмен салыстырғанда, қорғасын сульфидінің балку температурасы шамамен 1114°C құрайды, бұл металдық қорғасынның көрсеткішінен (327.5°C) едәуір жоғары. Жылу бөлуді жақсартуға ықпал ететін қосымша фактор қосылыстың қара түсі болып табылады, бұл жылулық сәуле шығарудың жоғары коэффициентін қамтамасыз етеді. Осы қасиеттердің жиынтығының арқасында нысаналар жоғары радиациялық төзімділік көрсетеді және сәуленің  $4 \times 10^{12}$  бөлшек/с дейінгі қарқындылығына төтеп бере алады.

Көрнекті жылуфизикалық сипаттамаларға қарамастан, қорғасын сульфидінен жасалған нысаналарды пайдаланудың елеулі шектеуі бар. Маңызды кемшілік – сәуленің нысана құрамындағы күкірт ядроларында айтарлықтай энергия жоғалтуы. Бұл эффект нысананың қалыңдығына қатаң талаптар қояды: тым қалың үлгілерді қолдануға мүмкіндік бермейді. Тәжірибелердің максималды тиімділігіне қол жеткізу үшін, атап айтқанда, толық бірігу реакциялары өнімдерінің ең жоғары шығымын алу үшін, нысана қалыңдығы мен сәуле энергиясын мұқият таңдау қажет. Максималды шығым нысана қалыңдығының ортасындағы сәуле энергиясы ( $E_{1/2}$ ) зерттелетін булану каналы үшін қозу функциясы максимумына сәйкес келгенде байқалады. Осылайша, бұл параметрлерді оңтайландыру PbS нысаналарымен тәжірибелерді жоспарлау кезінде негізгі міндет болып табылады.

Ізделініп отырған ҚЯ-ды жанама реакциялар өнімдерінен және шашыраған сәуле иондарынан бөліп алу GRAND, SHELS (Separator for Heavy Element Spectroscopy) [12] сепараторлары көмегімен жүзеге асырылды. Сепарациядан кейін ҚЯ ұшып өту жүйесі арқылы өтіп, фокальді DSSD-ге имплантацияланды. Фокальді детектордан ұшып шығатын  $\alpha, \beta$ -бөлшектер мен бөліну жарықшақтары бүйірлік детекторларда тіркелді.

## Нәтижелер мен талқылау

### 1. Газ толтырылған GRAND сепараторындағы сынақ тәжірибелері

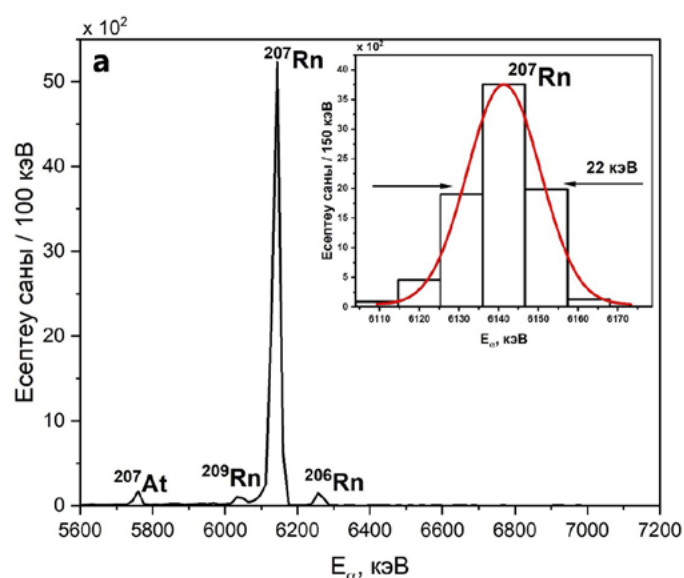
GRAND сепараторында  $^{48}\text{Ca}^{+10}$  иондарының сәулелерімен  $^{48}\text{Ca}+^{164}\text{Dy}$ ,  $^{48}\text{Ca}+^{174}\text{Yb}$  реакцияларында жүргізілген сынақ тәжірибелері барысында детекторлық жүйенің мөлшерлеуі орындалды, оның энергетикалық ажыратымдылығы анықталды, сондай-ақ сепараторды баптаудың иондық-оптикалық схемасы пысықталды.

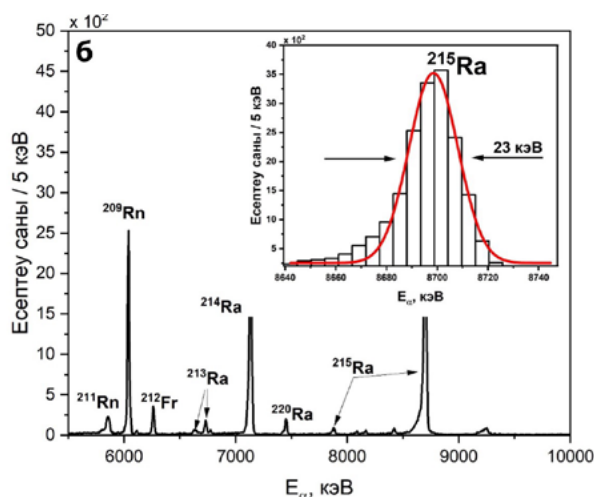
6-суретте  $^{48}\text{Ca}+^{164}\text{Dy}$ ,  $^{48}\text{Ca}+^{174}\text{Yb}$  сынақ реакциялары үшін фокальді DSSD детекторында тіркелген  $\alpha$ -спектр көрсетілген, энергетикалық ажыратымдылық 6–10 МэВ аралығындағы  $\alpha$ -бөлшектер үшін шамамен 20–25 кэВ құрайды.

Сонымен қатар, жаңа газ толтырылған GRAND сепараторындағы сынақ тәжірибелері [7] оның жұмысқа қабілеттілігін растады және негізгі параметрлерді оңтайландырды: ҚЯ тасымалдау тиімділігі  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{254}\text{No} + 2n$  реакциясы үшін 54%-ға жетті, гелийдің оңтайлы қысымы 0.7 Торр құрады, ал  $Q_v D_h Q_v Q_h D$  ион-оптикалық схемасы өнімдердің фокальді жазықтықта біркелкі таралуын қамтамасыз етті.  $^{48}\text{Ca}$  сәулесімен реакцияларда қолданылатын GRAND сепараторының ион-оптикалық параметрлерінің сипаттамалары 4-кестеде көрсетілген. Сынақ тәжірибелерінің нәтижелері туралы толығырақ [7] жұмысынан табуға болады.

### 4-Кесте. $^{48}\text{Ca}$ сәулесімен реакцияларда қолданылатын GRAND сепараторының ион-оптикалық параметрлері

Ион-оптикалық элемент	$^{48}\text{Ca} + ^{164}\text{Dy}$	$^{48}\text{Ca} + ^{174}\text{Yb}$	$^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$
Q1, A	145	145	200
Q2, A	165	165	234.5
Q3, A	125	125	176.2
D1, A	396	396	515
D2, A	-320	-320	-450





**6-сурет. Фокальді DSSD детекторының бір стрипінде тіркелген  $^{48}\text{Ca} + ^{164}\text{Dy}$  (а),  $^{48}\text{Ca} + ^{174}\text{Yb}$  (б) сынақ реакцияларының  $\alpha$ -бөлшектерінің энергетикалық спектрі**

Ескерту: жоғары терезеде 6133 кэВ шыңы бар  $^{207}\text{Rn}$  және 8700 кэВ шыңы бар  $^{215}\text{Ra}$  талдауы көрсетілген, энергетикалық ажыратымдылық 22-23 кэВ құрады.

Осылайша, қысқа өмір сүретін ядроларды тіркеу және тасымалдау әдістемелерінің сәтті пысықталуы сепаратордың фокальді жазықтығына SFiNx детекторлық жүйесін енгізу арқылы ауыр және аса ауыр ядроларды зерттеудің көкжиегін кеңейтуге мүмкіндік береді.

## 2. SHELS сепараторында SFiNx детекторлық жүйесін қолдану арқылы жүргізілген тәжірибелер

SHELS сепараторында толық бірігу реакцияларында (3-кестені қараңыз) 2 нейтронның булану каналдары арқылы жүргізілген тәжірибелер барысында  $^{244}\text{Fm}$ ,  $^{246}\text{Fm}$ ,  $^{250}\text{No}$ ,  $^{252}\text{No}$  изотоптары түзілді.

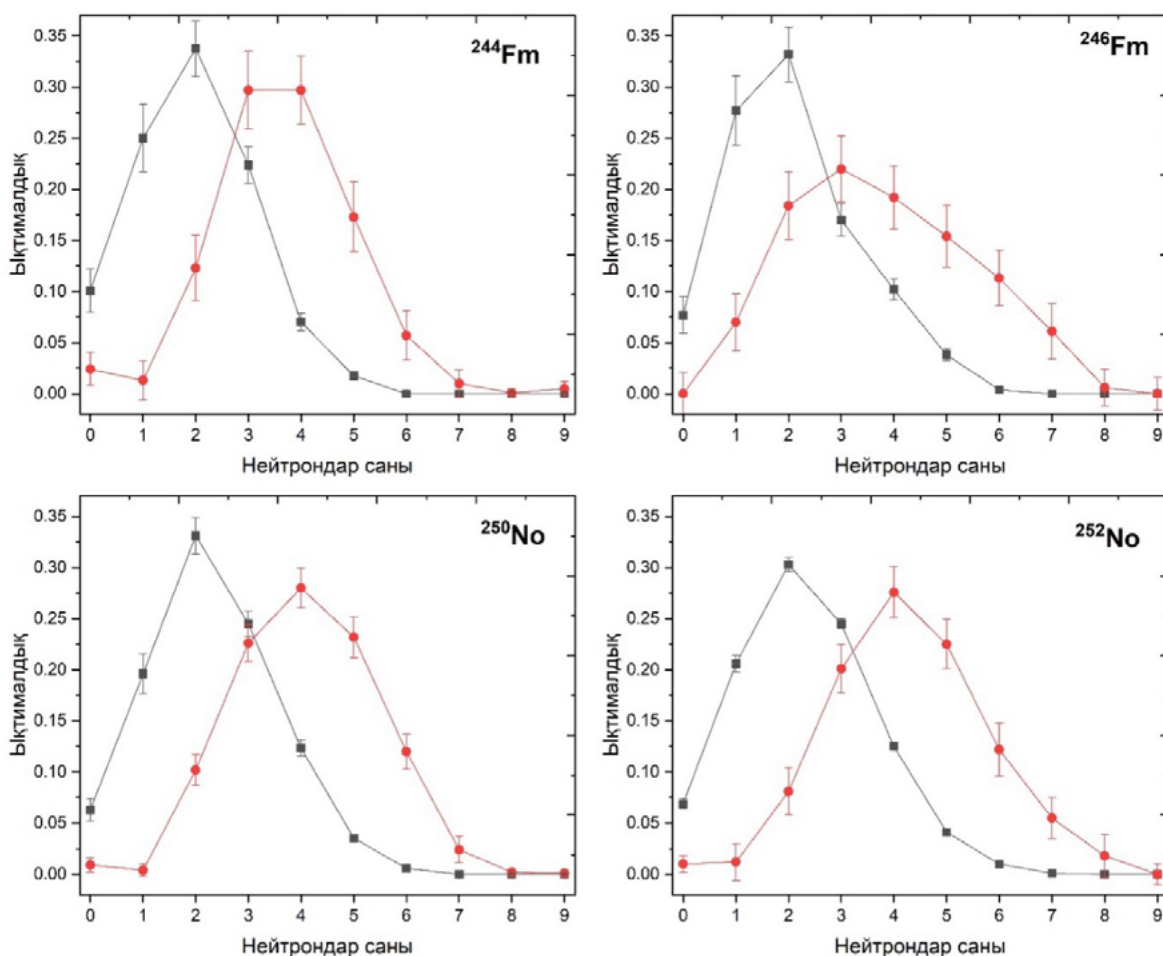
ҚЯ сенімді сәйкестендірілуі және олардың өмір сүру уақыттарын өлшеу корреляциялық талдау әдісімен жүзеге асырылды. Бұл тәсіл имплантацияланған ҚЯ мен оның ыдырау өнімдерінің ( $\alpha$ -бөлшектері мен спонтанды бөліну жарықшақтары) арасындағы өзара байланыстарды іздеуді болжайды. Әдістің мәні ҚЯ-дың бастапқы тіркелген нүктесінде оның дәйекті ыдырауларын тіркеу болып табылады. Фокальді DSSD-де бөліну жарықшақтары анықталған кезде, алдымен оның ізделінді изотоптың  $\sim 10 \times T_{1/2}$  дейінгі уақыт аралығында детектордың дәл сол пикселіне түскен ҚЯ-мен сәйкестігі бар-жоғы тексеріледі. Содан кейін 0 – 128 мкс уақыт аралығында ыдырау актілеріне қатысты нейтрондар ізделеді. Фермий мен нобелий изотоптары үшін корреляциялық іздеу нәтижелері, сондай-ақ өлшенген жартылай ыдырау периодтары 5-кестеде көрсетілген.

7-суретте  $^{244}\text{Fm}$ ,  $^{246}\text{Fm}$ ,  $^{250}\text{No}$ ,  $^{252}\text{No}$  ядролары үшін лездік нейтрондардың еселігінің тәжірибелік таралулары көрсетілген. Олардың негізінде бөліну актісіне шаққандағы нейтрондардың орташа саны есептелді. Детектор тиімділігіне және фондық әсерлерге түзетулерді ескере отырып алынған соңғы нәтижелер 6-кестеде берілген.

### 5-Кесте. Фермий мен нобелий изотоптары бойынша деректерді өңдеу нәтижелері

Изотоп	Спонтанды бөліну оқиғалар саны	Бөліну актілеріндегі лездік нейтрондар саны	Жартылай ыдырау периоды ( $T_{1/2}$ )	Әдебиет
$^{244}\text{Fm}$	503	966	$3.8 \pm 0.3$ мс	[13]
$^{246}\text{Fm}$	235	488	$1.50^{+0.08}_{-0.07}$ с	[14]
$^{250}\text{No}$	1357	3147	$4.7 \pm 0.2$ мкс (негізгі) $46 \pm 4$ мкс (изомерлік)	[15]
$^{252}\text{No}$	3260	7574	$2.44 \pm 0.05$ с	[5]

Нейтрондарды детекторлармен тіркеу тиімділігінің төмендігі тәжірибеде өлшенген нейтрондардың еселік таралу пішінінің шынайыға қарағанда айтарлықтай бұрмалануына әкеледі. Бұл мәселені шешу және таралудың бастапқы пішінін қалпына келтіру үшін Тихоновтың статистикалық регуляризациялау әдісі [16] қолданылды. Қалпына келтіру нәтижесі 7-суретте және 6-кестеде көрсетілген.



**7-сурет. Фермий және нобелий изотоптарының спонтанды бөліну нейтрондарының өлшенген (қара шаршы) және қалпына келтірілген (қызыл дөңгелек) еселік таралуы**

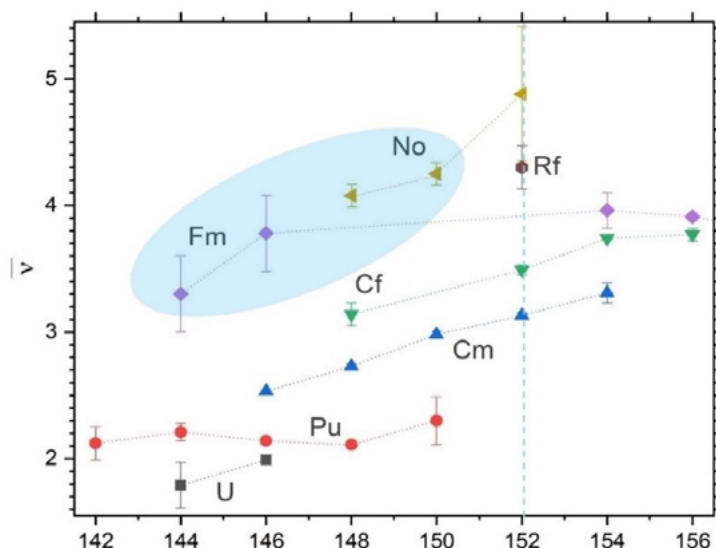
**6-Кесте. Лездік нейтрондардың еселік таралу сипаттамалары**

Изотоп	Бөліну актісіне шаққандағы нейтрондардың орташа саны	Таралу дисперсиясы	Қалпына келтірілген нейтрондардың орташа саны	Қалпына келтірілген таралудың дисперсиясы
<sup>244</sup> Fm	3.6 ± 0.1	1.8	3.67 ± 0.1	1.8
<sup>246</sup> Fm	3.8 ± 0.3	2.1	3.79 ± 0.2	2.8
<sup>250</sup> No	4.1 ± 0.1	1.8	4.08 ± 0.1	1.8
<sup>252</sup> No	4.25 ± 0.09	2.1	4.27 ± 0.15	2.2

Лездік нейтрондардың орташа санының ( $\bar{\nu}$ ) ядроғағы нейтрондар санына тәуелділігінің жаңартылған систематикасы 8-суретте көрсетілген. Жұп-жұп ядролар аймағында  $\bar{\nu}$  сипатында аномалиялар жоқ және массалық санның артуымен монотонды өсуде. Ең үлкен тіркелген  $\bar{\nu} = 4.88 \pm 0.53$  мәні

$^{254}\text{No}$  изотопы үшін байқалады. Алайда,  $N=152$  қабықшасына жақын No және Rf ядролары үшін осы уақытқа дейін алынған деректер фрагменттік сипатта қалып отыр, бұл, өз кезегінде, көршілес спонтанды бөлінетін изотоптарға жаңа тәжірибелік зерттеулер жүргізу қажеттілігін көрсетеді.

Демек, SHELS сепараторында SFiNx детекторлық жүйесін қолдану арқылы алынған нәтижелер осы жүйенің жұмысқа қабілеттілігін көрсетеді және оны ААЭФ-на интеграциялау трансуран ядроларының спонтанды бөліну нейтрондарын зерттеудің жаңа мүмкіндіктерін ашады.



8-сурет. Лездік нейтрондардың орташа санының ядродағы нейтрондар санына тәуелділік систематикасы

Ескерту: сопақшамен (овалмен) сызылып көрсетілген деректер SFiNx детекторлық жүйесін қолдану арқылы алынған.

### Қорытынды

GRAND сепараторындағы сынақ тәжірибелері ҚЯ тасымалдаудың жоғары тиімділігін (54%-ға дейін) және қондырғы жұмысының оңтайлы параметрлерін (гелий қысымы 0.7 Торр, ион-оптикалық схема  $Q_v D_n Q_v Q_n D$ ) көрсетті.  $\alpha$ -бөлшектердің жоғары энергетикалық ажыратымдылықпен (22-23 кэВ) тіркелуі және аса ауыр элементтерді синтездеу бойынша тәуелсіз тәжірибелермен сәйкес келетін деректердің алынуы GRAND сепараторының трансуран ядроларымен тәжірибелер жүргізуге дайындығын растайды.

SFiNx детекторлық жүйесін қолданумен жүргізілген тәжірибелер фермий ( $^{244}\text{Fm}$ ,  $^{246}\text{Fm}$ ) және нобелий ( $^{250}\text{No}$ ,  $^{252}\text{No}$ ) қысқа өмір сүретін изотоптарының лездік нейтрондардың еселігі туралы алғашқы толық деректерді алуға мүмкіндік берді. Тихоновтың статистикалық регуляризациялау әдісін қолдану нейтрондардың еселік таралуының пішінін қалпына келтіруге және массалық санның артуымен монотонды өсетін бөліну актісіне шаққандағы нейтрондардың орташа санының ( $\nu$ ) мәндерін алуға мүмкіндік берді.

GRAND сепараторының фокальді жазықтығына SFiNx жүйесін орналастыру БЯЗИ ААЭФ-да спонтанды бөлінудің қасиеттерін зерттеуге арналған теңдесі жоқ құрал жасауға мүмкіндік береді. Бұл әдістің басты артықшылығы – бөлінудің лездік нейтрондарын тіркеу мүмкіндігі, бұл бөлінудің теориялық модельдерін, оның ішінде процестің динамикасын, энергетикалық балансты және бөлінудің жаңа модаларын іздеуді дамыту үшін маңызды деректер алуға жол ашады.

Осылайша, SFiNx детекторлық жүйесін GRAND сепараторымен біріктіру жобасын іске асыру ядролық физикадағы маңызды қадам болып табылады және ядролардың өмір сүру шегіндегі қасиеттері туралы іргелі білім алуға зор үміт береді.

## Алғыс

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің (№АР26195449 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, зерттеу жұмыстарын қаржыландыру мәселелерін реттеу, деректердің дұрыстығына көз жеткізу.

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

**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.

## Қолжазбаны дайындау процесінде генеративті ЖИ және ЖИ пайдаланатын технологияларды пайдалану туралы мәлімдеме

Осы жұмысты дайындау процесінде авторлар мәтінді қазақ тіліне аудару үшін DeepSeek ЖИ пайдаланды. Осы құралды пайдаланғаннан кейін авторлар мазмұнды қажеттілігіне қарай тексерді, редакциялады және жарияланған мақаланың мазмұны үшін толық жауапты болады.

## Әдебиеттер тізімі

1. Hoffman D.C., Spontaneous fission properties and life-time systematic, Nuclear Physics A 502, p.21-40 (1989). [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(89\)90652-0](https://doi.org/10.1016/0375-9474(89)90652-0)
2. Hoffman D.C., Lane M.R., Spontaneous fission, Radiochimica Acta 70/71, p.135-145 (1995). <https://doi.org/10.1524/ract.1995.7071.s1.135>
3. Popeko A.G., Smirnov V.I., Ter-Akopian G.M. et al., Multiplicity of prompt neutrons in spontaneous fission of <sup>238</sup>U, Soviet Journal of Nuclear Physics 24(3), p.245-247 (1976)
4. Wild J.F., van Aarle J., Westmeier W. et al., Prompt neutron emission from the spontaneous fission of <sup>260</sup>Md, Physical Review C 41(2), p.640-646 (1990). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.41.640>
5. Isaev A.V., Yeregin A.V., Zamyatin N.I. et al., The SFiNx detector system, Physics of Particles and Nuclei Letters 19(1), p.37-45 (2022). <https://doi.org/10.1134/S154747712201006X>
6. Isaev A.V., Mukhin R.S., Andreev A.V. et al., The SFiNx Detector System (Current Status), Physics of Particles and Nuclei Letters 22(2), p.300-303 (2025). <https://doi.org/10.1134/S1547477124702303>
7. Yeregin A.V., Popeko A.G., Svirikhin A.I. et al., GRAND Universal Gas-Filled Separator: First Experimental Results, Physics of Particles and Nuclei Letters 21(3), p.518-525(2024). <https://doi.org/10.1134/S1547477124700511>
8. Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Popeko A.G. et al., DGFRS-2—A gas-filled recoil separator for the Dubna Super Heavy Element Factory, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 1033, p.166640-1-166640-9 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166640>
9. Popeko A.G., Belozero A.V., Briançon Ch. et al., GABRIELA setup for nuclear spectroscopy of the transfermium element isotopes at the VASSILISSA separator, Physics of Atomic Nuclei 69(7), p.1183-1187 (2006). <https://doi.org/10.1134/S1063778806070143>
10. Svirikhin A.I., Isaev A.V., Yeregin A.V. et al., A detector for studying the characteristics of spontaneous fission of short-lived heavy nuclei, Instruments and Experimental Techniques 54(5), p.644-648 (2011). <https://doi.org/10.1134/S0020441211040154>
11. Glodo J., Wang Y., Shawgo R. et al., New developments in scintillators for security applications, Physics Procedia 90, p.285-290 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.09.012>

12. Popeko A.G., Yeregin A.V., Malyshev O.N. et al., Separator for Heavy Element Spectroscopy - Velocity filter SHELS, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 376, p.140-143(2016). <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2016.03.045>
13. Mukhin R.S., Isaev A.V., Ulanova I.I. et al., Prompt neutron multiplicity from spontaneous fission of 244Fm, The European Physical Journal A 60(11), p.223-1-223-6 (2024). <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-024-01441-0>
14. Isaev A.V., Mukhin R.S., Andreev A.V. et al., Prompt neutron emission in the spontaneous fission of 246Fm, The European Physical Journal A 58(6), p.108-1-108-7 (2022). <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00761-3>
15. Mukhin R.S., Isaev A.V., Andreev A.V. et al., Prompt neutron emission in 250No spontaneous fission associated with ground and isomeric state decays, Chinese Physics C 48(6), p.064002-1-064002-6 (2024). <https://doi.org/10.1088/1674-1137/ad361a>
16. Mukhin R.S., Dushin V.N., Eremin A.V. et al., Reconstruction of spontaneous fission neutron multiplicity distribution spectra by the statistical regularization method, Physics of Particles and Nuclei Letters 18, p.439-444 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1547477121040130>

**Б.С. Сайлаубеков<sup>1,2,3\*</sup>, А.И. Свирихин<sup>1,2,4</sup>, М.С. Тезекбаева<sup>1,2,4</sup>,  
Х.М. Девараджа<sup>1,2</sup>, А.В. Исаев<sup>1,2,4</sup>, Р.С. Мухин<sup>2</sup>, Ю.А. Попов<sup>2,4</sup>**

<sup>1</sup>Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>3</sup>Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

<sup>4</sup>Государственный университет Дубна, Дубна, Россия

(E-mail: \*bsailaybekov@jinr.ru, asvirikhin@jinr.ru, tezekbaeva@jinr.ru, devaraja@jinr.ru, isaev@jinr.ru, rmukhin11@gmail.com, yaropov8511@yandex.ru, zhumadilovk@gmail.com)

### **Применение детектирующей системы SFiNx в фокальной плоскости газонаполненного сепаратора GRAND для изучения свойств спонтанного деления трансурановых ядер**

**Аннотация.** В Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) накоплен многолетний опыт исследований в области синтеза и изучения характеристик распада тяжелых спонтанно делящихся ядер. Для расширения возможностей этих исследований создана Фабрика сверхтяжелых элементов (СТЭ), ключевым элементом которой является газонаполненный сепаратор DGFRS-2, оптимизированный для работы с высокоинтенсивными пучками. Использование ускорителя ДЦ-280 в сочетании с сепаратором DGFRS-2 позволило в последние годы провести серию успешных экспериментов с трансурановыми мишенями. Высокая эффективность установки подтверждена регистрацией до 100 событий распада изотопов СТЭ за рекордно короткие сроки (порядка одного месяца), что является значительным достижением в условиях сверхмалых сечений образования.

Успешная эксплуатация сепаратора DGFRS-2 послужила основой для разработки проекта универсального газонаполненного сепаратора GRAND, в фокальной плоскости которого предполагается размещение детекторной системы SFiNx.

В данной статье основное внимание уделяется методике эксперимента и перспективам применения системы SFiNx на сепараторе GRAND для исследования свойств спонтанного деления трансурановых ядер. Представлены результаты тестовых экспериментов на сепараторе GRAND и экспериментов с использованием детектирующей системы SFiNx на сепараторе SHELS. Рассматриваются возможности внедрения данной системы в инфраструктуру Фабрики СТЭ. Ключевым преимуществом предлагаемой методики является возможность регистрации мгновенных нейтронов деления, что открывает новые горизонты для планирования экспериментов по измерению множественности нейтронов спонтанного деления тяжелых и сверхтяжелых ядер. Разработанные экспериментальные методы обладают значительным потенциалом для будущих исследований в этой области.

**Ключевые слова:** газонаполненный сепаратор, нейтронный детектор, множественность мгновенных нейтронов, спонтанное деление, трансурановые ядра.

**B.S. Sailaubekov<sup>\*1,2,3</sup>, A.I. Svirikhin<sup>1,2,4</sup>, M.S. Tezekbayeva<sup>1,2,4</sup>,  
H.M. Devaraja<sup>1,2</sup>, A.V. Isaev<sup>1,2,4</sup>, R.S. Mukhin<sup>2</sup>, Yu.A. Popov<sup>2,4</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan*

<sup>2</sup>*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

<sup>3</sup>*L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

<sup>4</sup>*Dubna State University, Dubna, Russia*

(E-mail: \*bsailaybekov@jinr.ru, asvirikhin@jinr.ru, tezekbaeva@jinr.ru, devaraja@jinr.ru,  
isaev@jinr.ru, rmukhin11@gmail.com, yapopov8511@yandex.ru, zhumadilovk@gmail.com)

## **Application of the SFiNx detection system in the focal plane of the gas-filled separator GRAND for studying the spontaneous fission properties of transuranium nuclei**

**Abstract.** The Joint Institute for Nuclear Research (JINR) has accumulated many years of experience in research on the synthesis and study of the decay characteristics of heavy spontaneously fissioning nuclei. To expand the capabilities of these studies, the Superheavy Element Factory (SHE Factory) was established, the key element of which is the gas-filled separator DGFRS-2, optimized for operation with high-intensity beams. The use of the DC-280 accelerator in combination with the DGFRS-2 separator has made it possible in recent years to conduct a series of successful experiments with transuranium targets. The high efficiency of the setup has been confirmed by the registration of up to 100 decay events of SHE isotopes in a record short time (about one month), which is a significant achievement under conditions of extremely small formation cross-sections.

The successful operation of the DGFRS-2 separator served as the foundation for the development of the universal gas-filled separator GRAND, in the focal plane of which the SFiNx detector system is planned to be placed.

This article focuses on the experimental methodology and the prospects of using the SFiNx system at the GRAND separator to study the spontaneous fission properties of transuranium nuclei. The results of test experiments conducted at the GRAND separator and experiments using the SFiNx detector system at the SHELS separator are presented. The possibilities of integrating this system into the infrastructure of the SHE Factory are considered. The key advantage of the proposed methodology is the capability to register prompt fission neutrons, which opens new horizons for planning experiments to measure the neutron multiplicity of spontaneous fission of heavy and superheavy nuclei. The developed experimental methods possess significant potential for future research in this field.

**Keywords:** gas-filled separator, neutron detector, prompt neutron multiplicity, spontaneous fission, transuranium nuclei.

### **Reference**

1. Hoffman D.C., Spontaneous fission properties and life-time systematic, Nuclear Physics A 502, p.21-40 (1989). [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(89\)90652-0](https://doi.org/10.1016/0375-9474(89)90652-0)
2. Hoffman D.C., Lane M.R., Spontaneous fission, Radiochimica Acta 70/71, p.135-145 (1995). <https://doi.org/10.1524/ract.1995.7071.s1.135>
3. Popeko A.G., Smirnov V.I., Ter-Akopian G.M. et al., Multiplicity of prompt neutrons in spontaneous fission of 238U, Soviet Journal of Nuclear Physics 24(3), p.245-247 (1976)
4. Wild J.F., van Aarle J., Westmeier W. et al., Prompt neutron emission from the spontaneous fission of 260Md, Physical Review C 41(2), p.640-646 (1990). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.41.640>
5. Isaev A.V., Yeregin A.V., Zamyatin N.I. et al., The SFiNx detector system, Physics of Particles and Nuclei Letters 19(1), p.37-45 (2022). <https://doi.org/10.1134/S154747712201006X>
6. Isaev A.V., Mukhin R.S., Andreev A.V. et al., The SFiNx Detector System (Current Status), Physics of Particles and Nuclei Letters 22(2), p.300-303 (2025). <https://doi.org/10.1134/S1547477124702303>
7. Yeregin A.V., Popeko A.G., Svirikhin A.I. et al., GRAND Universal Gas-Filled Separator: First Experimental Results, Physics of Particles and Nuclei Letters 21(3), p.518-525(2024). <https://doi.org/10.1134/S1547477124700511>
8. Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Popeko A.G. et al., DGFRS-2—A gas-filled recoil separator for the Dubna Super Heavy Element Factory, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 1033, p.166640-1-166640-9 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166640>

9. Popeko A.G., Belozerov A.V., Briançon Ch. et al., GABRIELA setup for nuclear spectroscopy of the transfermium element isotopes at the VASSILISSA separator, *Physics of Atomic Nuclei* 69(7), p.1183-1187 (2006). <https://doi.org/10.1134/S1063778806070143>
10. Svirikhin A.I., Isaev A.V., Yeregin A.V. et al., A detector for studying the characteristics of spontaneous fission of short-lived heavy nuclei, *Instruments and Experimental Techniques* 54(5), p.644-648 (2011). <https://doi.org/10.1134/S0020441211040154>
11. Glodo J., Wang Y., Shawgo R. et al., New developments in scintillators for security applications, *Physics Procedia* 90, p.285-290 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.09.012>
12. Popeko A.G., Yeregin A.V., Malyshev O.N. et al., Separator for Heavy Element Spectroscopy - Velocity filter SHELS, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 376, p.140-143(2016). <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2016.03.045>
13. Mukhin R.S., Isaev A.V., Ulanova I.I. et al., Prompt neutron multiplicity from spontaneous fission of <sup>244</sup>Fm, *The European Physical Journal A* 60(11), p.223-1-223-6 (2024). <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-024-01441-0>
14. Isaev A.V., Mukhin R.S., Andreev A.V. et al., Prompt neutron emission in the spontaneous fission of <sup>246</sup>Fm, *The European Physical Journal A* 58(6), p.108-1-108-7 (2022). <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00761-3>
15. Mukhin R.S., Isaev A.V., Andreev A.V. et al., Prompt neutron emission in <sup>250</sup>No spontaneous fission associated with ground and isomeric state decays, *Chinese Physics C* 48(6), p.064002-1-064002-6 (2024). <https://doi.org/10.1088/1674-1137/ad361a>
16. Mukhin R.S., Dushin V.N., Eremin A.V. et al., Reconstruction of spontaneous fission neutron multiplicity distribution spectra by the statistical regularization method, *Physics of Particles and Nuclei Letters* 18, p.439-444 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1547477121040130>

#### **Авторлар туралы мәлімет:**

**Сайлаубеков Б.С.** – хат-хабар авторы, докторант, ғылыми қызметкер, жоба орындаушысы, ҚР Атом энергиясы агенттігінің «Ядролық физика институты» ШЖҚ РМК, Ибрагимов көшесі, 1, 050032, Алматы, Қазақстан, [bsailaybekov@jinr.ru](mailto:bsailaybekov@jinr.ru), +77473192696

**Свирихин А.И.** – физика-математика ғылымдарының кандидаты, жоба орындаушысы, сектор басшысы, Біріккен ядролық зерттеулер институты, Жолио-Кюри көшесі, 6, 141980, Дубна, Ресей, [asvirikhin@jinr.ru](mailto:asvirikhin@jinr.ru), +74962164633

**Тезекбаева М.С.** – физика-математика ғылымдарының кандидаты, жоба жетекшісі, ҚР Атом энергиясы агенттігінің «Ядролық физика институты» ШЖҚ РМК, Ибрагимов көшесі, 1, 050032, Алматы, Қазақстан, [tezekbaeva@jinr.ru](mailto:tezekbaeva@jinr.ru), +77053423129

**Девараджа Х.М.** – PhD, аға ғылыми қызметкер, жоба орындаушысы, Біріккен ядролық зерттеулер институты, Жолио-Кюри көшесі, 6, 141980, Дубна, Ресей, [devaraja@jinr.ru](mailto:devaraja@jinr.ru), +74962164432

**Исаев А.В.** – физика-математика ғылымдарының кандидаты, жоба орындаушысы, топ басшысы, Біріккен ядролық зерттеулер институты, Жолио-Кюри көшесі, 6, 141980, Дубна, Ресей, [isaev@jinr.ru](mailto:isaev@jinr.ru), +74962164306

**Мухин Р.С.** – кіші ғылыми қызметкер, Біріккен ядролық зерттеулер институты, Жолио-Кюри көшесі, 6, 141980, Дубна, Ресей, [rmukhin11@gmail.com](mailto:rmukhin11@gmail.com), +79826924026

**Попов Ю.А.** – топ басшысы, Біріккен ядролық зерттеулер институты, Жолио-Кюри көшесі, 6, 141980, Дубна, Ресей, [уаропов8511@yandex.ru](mailto:уаропов8511@yandex.ru), +74962164392

**Сайлаубеков Б.С.** – автор для корреспонденции, докторант PhD, научный сотрудник, исполнитель проекта, РГП на ПХВ «Институт ядерной физики» Агентства по атомной энергии РК, улица Ибрагимова, 1, 050032, Алматы, Казахстан, [bsailaybekov@jinr.ru](mailto:bsailaybekov@jinr.ru), +77473192696

**Свирихин А.И.** – кандидат физико-математических наук, исполнитель проекта, начальник сектора, Объединенный институт ядерных исследований, улица Жолио-Кюри, 6, 141980, Дубна, Россия, [asvirikhin@jinr.ru](mailto:asvirikhin@jinr.ru), +74962164633

**Тезекбаева М.С.** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, руководитель проекта, РГП на ПХВ «Институт ядерной физики» Агентства по атомной энергии РК, улица Ибрагимова, 1, 050032, Алматы, Казахстан, [tezekbaeva@jinr.ru](mailto:tezekbaeva@jinr.ru), +77053423129

**Девараджа Х.М.** – доктор PhD, старший научный сотрудник, исполнитель проекта, Объединенный институт ядерных исследований, улица Жолио-Кюри, 6, 141980, Дубна, Россия, [devaraja@jinr.ru](mailto:devaraja@jinr.ru), +74962164432

**Исаев А.В.** – кандидат физико-математических наук, начальник группы, исполнитель проекта, Объединенный институт ядерных исследований, улица Жолио-Кюри, 6, 141980, Дубна, Россия, isaev@jinr.ru, +74962164306

**Мухин Р.С.** – младший научный сотрудник, Объединенный институт ядерных исследований, улица Жолио-Кюри, 6, 141980, Дубна, Россия, rmukhin11@gmail.com, +79826924026

**Попов Ю.А.** – начальник группы, Объединенный институт ядерных исследований, улица Жолио-Кюри, 6, 141980, Дубна, Россия, yarpopov8511@yandex.ru, +74962164392

**Sailaubekov B.S.** – corresponding author, PhD student, researcher, project executor, RSE on REM "Institute of Nuclear Physics" of the Agency of the Republic of Kazakhstan for Atomic Energy, 1 Ibragimov street, 050032, Almaty, Kazakhstan, bsailaybekov@jinr.ru, +77473192696

**Svirikhin A.I.** – PhD in physics, project executor, head of sector, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie street, 141980, Dubna, Russia, asvirikhin@jinr.ru, +74962164633

**Tezekbayeva M.S.** – PhD in physics, project manager, RSE on REM "Institute of Nuclear Physics" of the Agency of the Republic of Kazakhstan for Atomic Energy, 1 Ibragimov street, 050032, Almaty, Kazakhstan, tezekbaeva@jinr.ru, +77053423129

**Devaraja H.M.** – PhD in physics, senior researcher, project executor, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie street, 141980, Dubna, Russia, devaraja@jinr.ru, +74962164432

**Isaev A.V.** – PhD in physics, head of group, project executor, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie street, 141980, Dubna, Russia, isaev@jinr.ru, +74962164306

**Mukhin R.S.** – junior researcher, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie street, 141980, Dubna, Russia, rmukhin11@gmail.com, +79826924026

**Popov Yu.A.** – head of group, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie street, 141980, Dubna, Russia, yapopov8511@yandex.ru, +74962164392



Copyright: © 2026 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/>).