

JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

Flerov Laboratory of Nuclear Reactions

## FINAL REPORT ON THE INTEREST PROGRAM

Production and spectroscopic investigation of new neutron-rich isotopes near the neutron  $N = 126$  shell closure using the multinucleon transfer reactions

**Supervisor:**

Vedeneev Vyacheslav Yurievich

Junior researcher, Laboratory of Nuclear Reactions, JINR, Dubna, Russia

**Student:**

Gasarov Vladimir Vladimirovich

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

**Participation period:**

October 30 - December 10, Wave 9

Dubna, 2023

## Abstract

The MASHA (Mass Analyzer of Super-Heavy Atoms), a mass separator with a resolving power of about  $\frac{m}{\Delta m} = 1700$ , has provided a unique opportunity for the identification of masses of superheavy nuclides. This report contains an analysis of the reaction results of complete fusion reactions  $^{40}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm}$ ,  $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er}$ , and multi-nucleon transfer reaction with doubly magic calcium isotope  $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$ . Utilizing the  $\alpha$ -particle registration method with a sensitive silicon detector, data on the dynamics of these nuclear processes have been obtained. Silicon strip detector was calibrated using one-dimensional histograms, two-dimensional position-energy spectrum of  $\alpha$ -decays of isotopes were drawn.

## 1. Введение

Исследования сверхтяжелых ядер и поиск «острова стабильности» являются важными направлениями в развитии современной ядерной физики. Для более точных измерений физических характеристик сверхтяжелых элементов был разработан масс-сепаратор MASHA в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова в Дубне, Россия. Эта установка, расположенная на одном из выводов пучка циклотрона У-400М, предназначена для измерения масс тяжелейших элементов с одновременной их регистрацией по  $\alpha$ -распадам и/или спонтанному делению цепочки распадов целиком [6].

В ходе экспериментов по изучению химических свойств сверхтяжелых элементов было обнаружено, что коперниций ( $Cn$ ,  $Z = 112$ ) обладает повышенной летучестью по сравнению со своим химическим аналогом – ртутью [1]. На установке MASHA были выполнены комплексные измерения летучих изотопов радона и ртути, образованных в реакциях  $^{40}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm}$ ,  $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er}$ , и  $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$ .

Реакция полного слияния  $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er}$  позволяет получить составное ядро  $^{206}\text{Rn}$ . В реакции многонуклонных передач  $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$  продуктами являются нейтронно избыточные ядра радона, близкие к заполненной оболочке  $N = 126$ , в том числе  $^{212}\text{Rn}$ . Дополнительной мотивацией к эксперименту служило изучение особенностей реакции  $^{40}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm}$  с ядрами-мишенями, находящимися вблизи магических чисел нейтронов  $N = 82$ .

## 2. Синтез сверхтяжелых элементов

Для синтеза сверхтяжелых ядер, чтобы подобраться к «острову стабильности», выбраны реакции полного слияния дважды магического ядра  $^{48}\text{Ca}$  со следующими ядрами:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{245}\text{Cm}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ ,  $^{249}\text{Cf}$ .

Раньше для синтеза всех тяжелых ядер с порядковыми номерами 107 – 112 проводились реакции с магическими ядрами  $^{208}\text{Pb}$  и  $^{209}\text{Bi}$  и массивными снарядом ( $A \geq 50$ ). При этом составное ядро имеет энергию возбуждения около  $E_x \approx 12 - 15$  МэВ (холодное слияние). Переход в основное состояние происходит за счет испускания всего одного нейтрона и  $\gamma$ -фотона. В результате существенно возрастает время жизни составного ядра – это главное преимущество таких реакций. Однако, с возрастанием массы ядра, уменьшается время жизни продуктов реакции, что препятствует синтезу составных ядер [5].

В реакциях синтеза актиноидов и  $^{48}\text{Ca}$  энергия возбуждения  $E_x \approx 35 - 40$  МэВ (горячее слияние) для того, чтобы ядро перешло в основное состояние, испаряется сразу несколько нейтронов, а следовательно, уменьшается время жизни составных ядер.

### 3. Обзор установки

Масс-сепаратор установлен на специально созданном канале выведенных пучков циклотрона У-400М. Циклотрон ускоряет ионы ( $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{36}\text{Ar}$  и др.) с энергией пучка порядка 5 – 7 МэВ/нуклон. В основном продукты реакции осаждаются на поглотителе (расположенном после мишени), состоящем из пористой полиграфеновой структуры. Затем продукты инжектируются в источник ионов, работающий на явлении электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), где ионизируются и передаются в масс-сепаратор, включающий дипольные магниты, квадрупольные и секступольные линзы. Распад короткоживущих изотопов детектируется в фокальной плоскости сепаратора [2].

В первых экспериментах, направленных на измерение масс изотопов 112-го и 114-го элементов, горячая ловушка использовалась для инжекции продуктов полного слияния в источник ионов. Горячая ловушка является краеугольной частью **ISOL**-системы (**I**sotope **S**eparation **O**n-**L**ine) – метода, при котором ионы, образованные в результате реакций слияния охлаждаются до энергий, при которых возможен дальнейший анализ ядер, и отделяются от пучка. К тому же, онлайнность метода указывает на возможность непрерывного и одновременного анализа.

В такой схеме продукты реакций слияния, включая ядра сверхтяжелых элементов, вылетают из мишени, проходят через разделительную фольгу, которая не позволяет продуктам реакции вернуться назад и тормозятся в графитовом поглотителе, нагретом электрическим током до температуры 1500-2000 К. Далее атомы СТЭ диффундируют в вакуумный объем и по трубопроводу доставляются в ЭЦР источник, где ионизируются. Основной поток тяжелых ионов проходит через диагностическую систему, состоящую из апертуры

электростатического датчика индукции и цилиндра Фарадея. За диагностической системой находится вращающаяся мишень, установленная на колесе, состоящем из 12 секторов, собранных в картриджи и вращающихся с частотой 25 Гц.

Для ионизации атомов продуктов ядерных реакций используется ЭЦР источник ионов питаемый резонансным генератором с частотой микроволнового генератора 2,45 ГГц. Атомы ионизируются до заряда  $Q = +1$  (практически 100% однозарядных), ускоряются с помощью трехэлектродной системы до 38 кэВ, собираются в пучок, который затем разделяется магнитооптической системой масс-спектрометра. Эффективность при получении пучка однозарядных ионов инертных газов для такого источника достигает 90 % [6].

Стенки камеры источника ионов покрыты нитридом титана ( $TiN$  – химически инертное соединение), а также стенки ловушки и транспортной линии между ними [6]. Это сделано по причине того, что ртуть имеет большую адгезию к стали. Таким образом, эффективность ионизации и время выхода существенно возросли. Согласно проведенным экспериментам, время сепарации составляет 1,8 сек.

В фокальной плоскости установки MASHA используются кремниевый полосковый детектор кололезного типа и детектор TIMPIX для регистрации продуктов реакции.

В полосковом детекторе сигналы с кремниевых стрипов подвергаются регистрации по независимым спектрометрическим каналам. Затем данные поступают на входы 16-канальных зарядочувствительных предусилителей, расположенных снаружи вакуумной камеры. После чего сигналы, прошедшие предусилитель, направляются на входы 8-канальных усилителей-драйверов с встроенным мультиплексором. После усиления и мультиплексирования данные направляются на три выхода мультиплексора: альфа, фрагментный и цифровой каналы. Эти выходы подключены к 16-канальным высокоскоростным дигитайзерам XIA. Информация считывается и сохраняется контроллером PXI-8119 путем использования программного комплекса сбора и хранения данных для полоскового детектора, измеряющего малые постоянные токи. Программное обеспечение полоскового детектора позволяет получать токи с каждой из 192 полосок, обновляющихся каждую секунду [6].

Разработкой микросхемы Timerix в ЦЕРНе занималась коллаборация Medipix при поддержке EUDET. Чип Timerix ASIC может быть объединен с различными полупроводниковыми датчиками (например, кремний, GaAs, CdTe) различной толщины (например, 300, 700, 1000 мкм). Прохождение части-

цы через детектор вызывает выделение пакета свободных носителей заряда, число которых пропорционально энергии в сенсоре [4]. Далее в микросхеме Timerix происходит усиление сигнала, его анализ, оцифровка и передача данных на персональный компьютер (ПК). Микросхема Timerix изначально являлась модификацией микросхемы Medipix 2 / 2MXR. Размеры пикселей составляют  $55 \times 55$  мкм<sup>2</sup>, а размерность матрицы -  $256 \times 256$  элементов. Каждый пиксель Timerix обладает независимой электронной цепью, позволяющей легко объединять несколько детекторов и обеспечивающей уникальные свойства, такие как линейность и широкий динамический диапазон.

## 4. Экспериментальная часть

Проанализированы данные, полученные с установки MASHA для трех реакций ядерного синтеза. С высокой точностью (благодаря энергетическому разрешению стрипового детектора – 25 кэВ) определены энергии альфа распадов для продуктов реакции и дочерних ядер. Откалиброваны значения энергии, полученные с кремниевого полоскового детектора и проведена идентификация изотопов на двумерном спектре позиция-энергия.

### 4.1. $^{40}\text{Ar} + ^{148}\text{Sm}$

Различные изотопы ртути ( $A = 180, 181, 182, 183, 184, 185$ ) получены в результате реакции полного слияния:

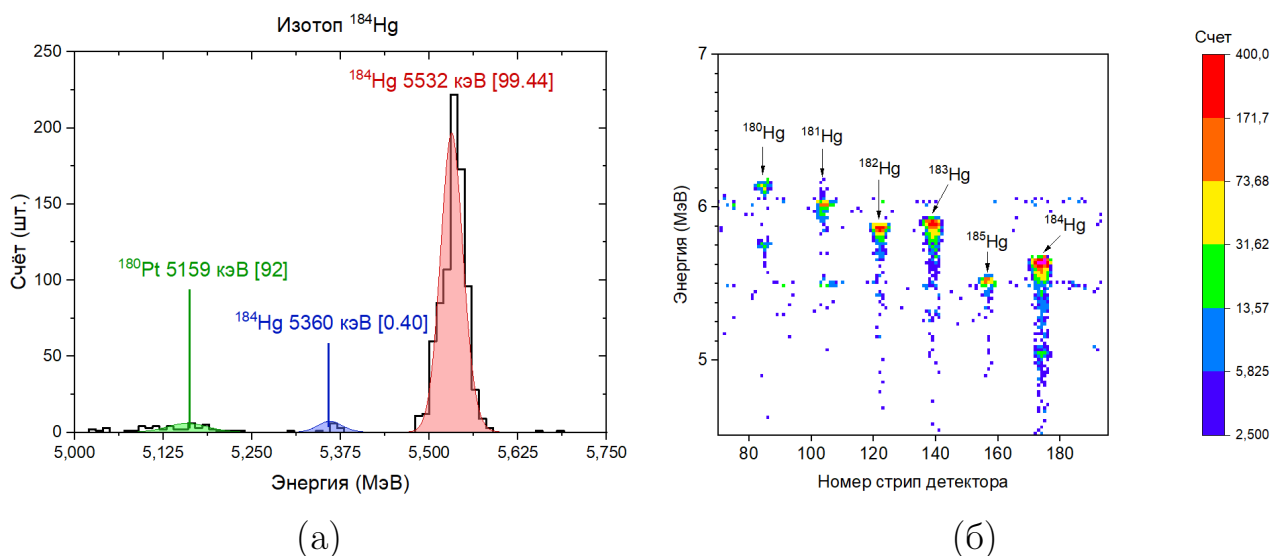
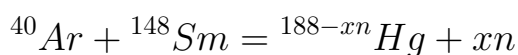


Рис. 1: Графики: (а) идентификация ядер по спектру  $\alpha$ -распадов (один стрип-детектор); (б) двумерный спектр позиция-энергия  $\alpha$ -распадов изотопов ртути ( $A = 180 - 185$ ).

## 4.2. $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er}$

Изотопы радона ( $A = 200, 201, 202, 203, 204, 205$ ) так же получены в результате реакции полного слияния:

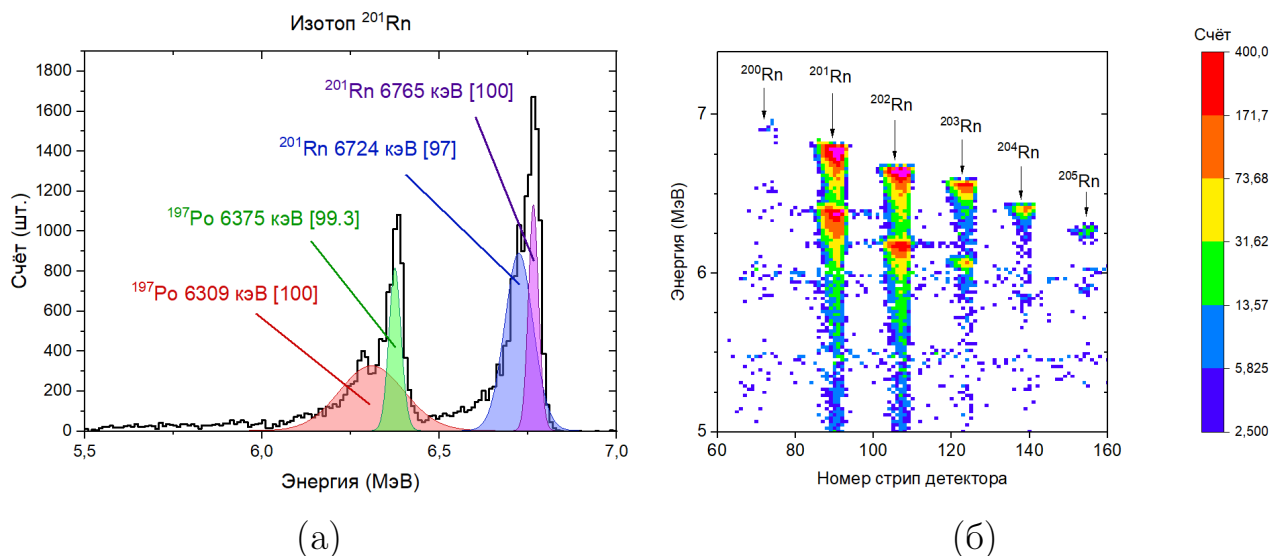
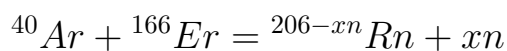


Рис. 2: Графики: (а) идентификация ядер по спектру  $\alpha$ -распадов (один стрип-детектор); (б) двухмерный спектр позиция-энергия  $\alpha$ -распадов изотопов радона ( $A = 200 - 205$ ).

## 4.3. $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$

Изотопы радона ( $A = 212, 218, 219$ ) получены в результате реакции много-нуклонных передач:

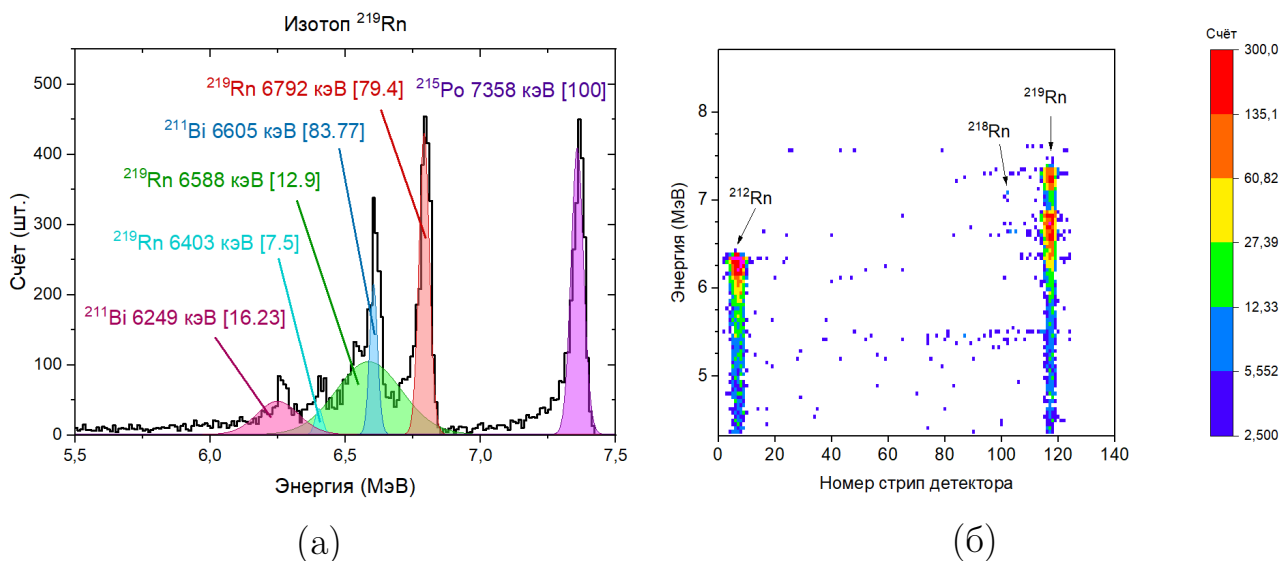
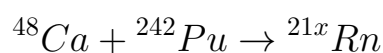


Рис. 3: Графики: (а) идентификация ядер по спектру  $\alpha$ -распадов (один стрип-детектор); (б) двухмерный спектр позиция-энергия  $\alpha$ -распадов изотопов ртути ( $A = 212 - 219$ ).

С помощью программного пакета Origin произведено определение энергий распада на одномерных гистограммах. Экспериментально показано явление степени разветвления (branching ratio) – относительная вероятность распада квантово-механической системы (ядра) по данному каналу распада. Так, изотоп  $^{201}\text{Rn}$  испытывает радиоактивный распад по двум каналам  $\alpha$ -распада –  $T_{1/2} = 3.8$  сек с вероятностью 0.90 и  $T_{1/2} = 7.1$  сек с вероятностью 0.8. Причем, ядра могут распадаться по одному каналу, но иметь разные энергии распада. Например, изотоп  $^{184}\text{Hg}$  претерпевает  $\alpha$ -распад с вероятностью 0.0126, а энергия распада принимает значения 5532 кэВ [99.44] и 5360 кэВ [0.40].

Установка MASHA позволяет разделять ядра по массе и таким образом исследовать конкретные изотопы. Показания стрипового детектора были откалиброваны в соответствии с определенными значениями энергий распада для одномерных гистограмм и сопоставлением этих значений с двумерным спектром. Таким образом можно определить позицию каждого изотопа на двумерном спектре  $\alpha$ -распадов. Так удалось определить, что в реакции  $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er}$  образуется изотоп с малым сечением  $^{200}\text{Rn}$  (6n-испарительный остаток).

В реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$  время жизни изотопов радона с  $A = 213 - 217$  намного меньше 35 мс [6]. Время сепарации изотопов в установке порядка 1,8 сек, поэтому фокальной плоскости достигли только долгоживущие изотопы, что хорошо отображено на Рис. 3(б).

## 5. Выводы

В данной работе описаны основные части установки MASHA, получена информация о модах распада, их энергии и массе. Изучены данные о ядерных реакциях полного слияния и многоуноклонных передач. Реакции первого типа позволяют получать ядра с наибольшим числом протонов в ядре (помогая подобраться ближе к острову стабильности), а так же с большим недостатком нейтронов и составные ядра, которые испытывают преимущественно  $\alpha$ -распад. Реакции второго типа позволяют получить нейтронно-избыточные ядра, близкие к замкнутым нейтронным оболочкам  $N = 126$  и  $N = 152$ , которые в рамках оболочечной теории строения ядер имеют сферическую форму и отличаются повышенной стабильностью.

## Список литературы

- [1] Сечения образования испарительных остатков реакций полного слияния  $^{144}\text{Sm}(^{40}\text{Ar}, xn)^{184-x}\text{Hg}$ ,  $^{148}\text{Sm}(^{36}\text{Ar}, xn)^{184-x}\text{Hg}$ ,  $^{144}\text{Nd}(^{40}\text{Ca}, xn)^{184-x}\text{Hg}$  / В. Ю. Веденеев, А. М. Родин, Л. Крупа [и др]. // Известия РАН. Серия физическая. – 2020. – Т. 84, № 4. – С. 611-615. – ISSN 0367-6765

- [2] MASHA: синтез и свойства ядер // Дубна: наука, содружество, прогресс. – 2010. – № 9. – С. 4-5. – 5 марта
- [3] Chemical characterization of element 112 / R. Eichler, N. V. Aksenov, A. V. Belozerov [et al.] // Nature Letters. – 2007. – Vol. 447. – P. 72-75. – ISSN 1476-4687
- [4] Timepix, a 65k programmable pixel readout chip for arrival time, energy and/or photon counting measurements / X. Llopart [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2007. – Vol. 581, no. 1. – P. 485-494. – ISSN 0168-9002
- [5] Matthias Schädel, The Chemistry of Superheavy Elements / Matthias Schädel. – Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2004. – 318 p. – ISBN 0-306-48415-3.
- [6] The current status of the MASHA setup / V. Yu. Vedeneev, A. M. Rodin, L. Krupa [et al.] // Hyperfine Interact. – 2017. – Vol. 238, Article no. 19. – P. 1-14. – ISSN 0304-3843