



Объединенный институт ядерных исследований
Лаборатория Ядерных Реакций им. Г.Н. Флёрва

ОТЧЁТ ПО ПРОГРАММЕ УНЦ ОИЯИ“INTEREST”

**Определение масс сверхтяжелых элементов в
экспериментах по синтезу Sn и Fl по реакциям**
 $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$ и $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$

Руководитель:

Младший научный сотрудник
Веденеев Вячеслав Юрьевич

Студент:

Литвак Иван Леонидович,
Украина

Период участия:

02 ноября - 11 декабря, 2020

Аннотация

The MASHA facility was designed at FLNR, JINR for measuring the masses of superheavy elements (SHE) and determining them by means of classical mass spectrometry in combination with the registration of decay chains. For the study, we chose the reactions $40\text{Ar} + 148\text{Sm}$, $40\text{Ar} + 166\text{Er}$, and $48\text{Ca} + 242\text{Pu}$, which form Hg and Rn, the properties of which are similar to those of SHE. This makes it possible to get an idea of the behavior of SHE Cn, Fl, Og for further study of these atoms at the facility.

1 Введение

Исследования сверхтяжелых элементов требуют высокой точности и скорости определения таких характеристик, как: энергия, моды распада, масса и период полураспада. Для этого на одном из выводов циклотрона U-400M был создан масс-анализатор сверхтяжелых атомов (MASHA) в лаборатории ядерных реакций (ЛЯР) имени Г. Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна, Россия.

В данной работе проведен анализ альфа-спектров испарительных остатков реакций полного слияния $40\text{Ar}+148\text{Sm}$, $40\text{Ar}+166\text{Er}$ и реакции многонуклонных передач $48\text{Ca}+242\text{Pu}$. Для этого создавался пучок ионов 40Ar или 48Ca разогнанных до 5-7 МэВ/нуклон в циклотроне U-400M, которым бомбардировали мишени из 148Sm , 166Er или 242Pu . Продукты распада замедлялись в горячей ловушке. Во время остановки в твердом веществе терморасширенного графита ионы заполняли свои электронные оболочки, становясь нейтральными атомами. Из горячей ловушки атомы диффундировали в ЭЦР источник ионов, в котором ионизировались до зарядового состояния +1 и ускорялись до 40 КэВ. Сформированный ионный пучок разделяется магнитооптическим анализатором отношения массы к заряду и попадает в детектор.

2 Выбор реакций для исследования

Реакция полного слияния $40\text{Ar}+148\text{Sm} \rightarrow (188-x)\text{Hg}+xp$ выбрана, поскольку ртуть является гомологом Коперниция [1] [4]. В то же время ртуть оседает на вакуумных трубах, с медными уплотнениями образует устойчивые соединения - амальгамы, как и с другими цветными металлами. Эти особенности необходимо учитывать при изучении СТЭ, поскольку сечение образования, например Коперниция около 10^{-12} барн. Сечение образования Hg может достигать до 10 или 100 барн, что на 13-14 порядков больше, тем самым систему можно проверить на этом элементе.

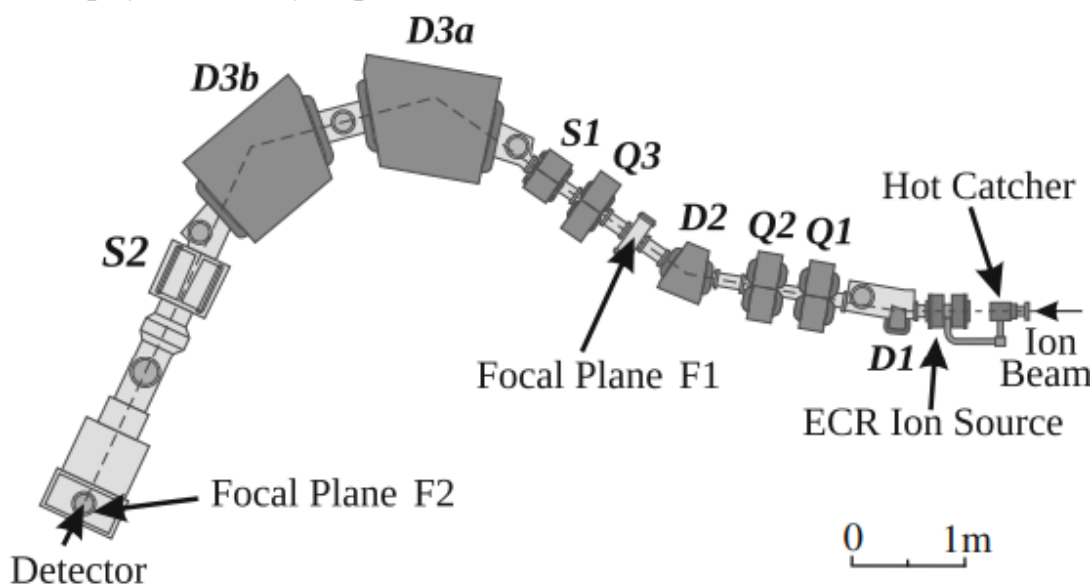
Реакция полного слияния $40\text{Ar}+166\text{Er}$ и реакция многонуклонного переноса $48\text{Ca}+242\text{Pu}$ образуют радон, который является радиоактивным благородным газом. СТЭ Флеровий из-за релятивистских эффектов по химическим свойствам похож на благородные газы [5]. Оганесон же состоит в той же группе, что и радон.

Сечение образования СТЭ очень малы, что требует высокой точности для их исследования. Более легкие гомологи этих элементов имеют на порядки большие сечения. Это позволяет протестировать установку и выработать оптимальные условия для исследования СТЭ.

3 Устройство MASHA

3.1 Ионно-оптическая схема

На рисунке ниже схематически представлена установка MASHA, состоящая из pick-up датчика, мишени, датчика пучка электронной эмиссии, горячей ловушки, ЭЦР источника ионов и магнитооптического анализатора отношения массы к заряду. Анализатор включает четыре дипольных магнита (D1, D2, D3a, D3b), три квадрупольные линзы (Q1, Q2, Q3), две секступольные линзы (S1, S2) и детекторную систему в фокальной плоскости[2].



3.2 ЭЦР источник ионов

Ионный источник работает по принципу электронно-циклотронного резонанса 2,45 ГГц. Входящие атомы продуктов ядерной реакции ионизируются до зарядового состояния $Q = +1$ и ускоряются до 40 КэВ трехэлектродной электростатической линзой. Сформированный ионный пучок разделяется магнитооптическим анализатором отношения массы к заряду. С помощью этого ионного источника можно получить токи пучка, состоящие почти полностью из ($\sim 100\%$) однозарядных ионов. Эффективность ионизации около 90% для благородных газов[2].

3.3 Система мишень + горячая ловушка

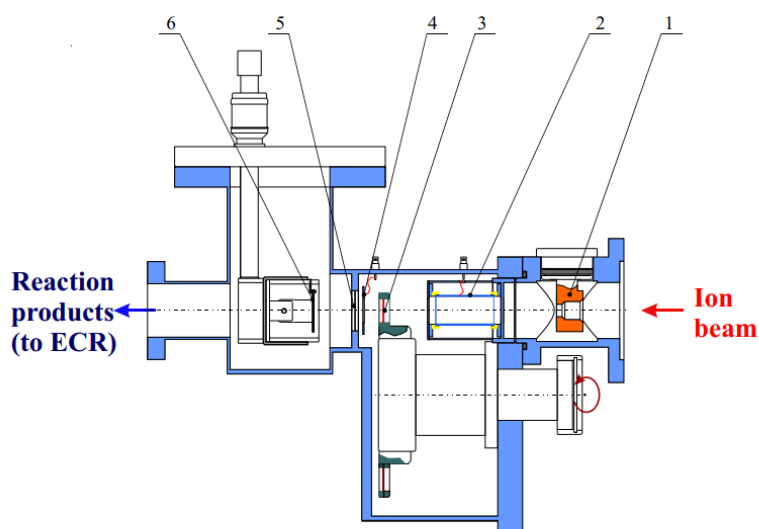
В реакции $40\text{Ar}+148\text{Sm}$ использовалась мишень Sm_2O_3 с обогащением до 98,5% 148Sm . Толщина 148Sm составляла $0,8 \text{ мг/см}^2$. Мишень была создана методом молекулярного электроосаждения на титановую подложку толщиной 3,1 мкм.



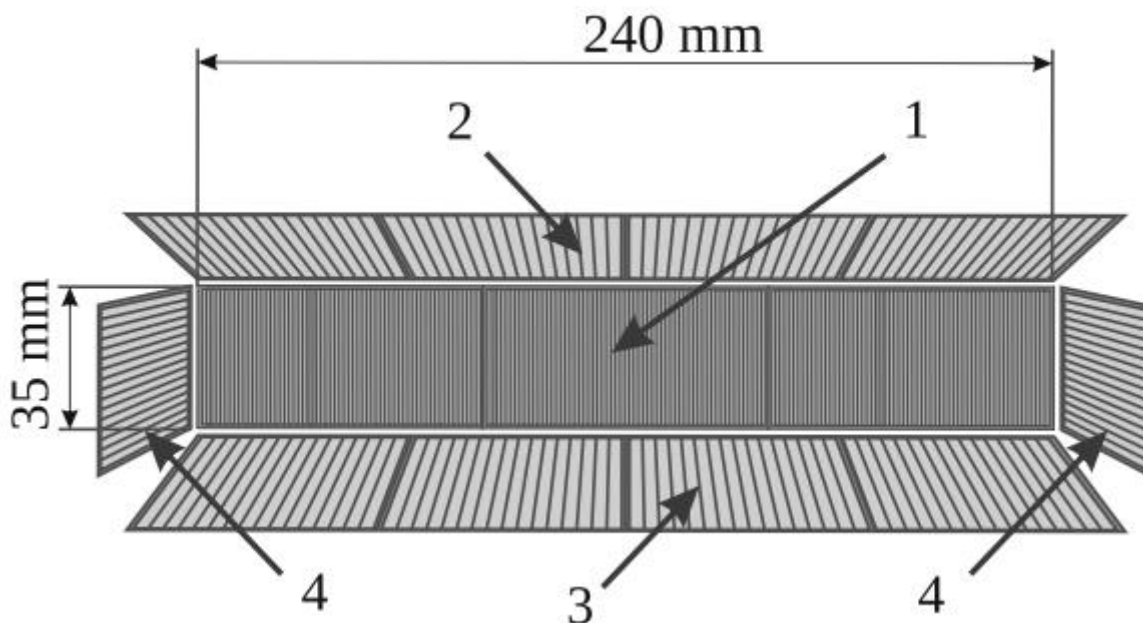
Фото мишени из 242Pu нанесенного на титановую фольгу толщиной 2 мкм

Из мишени продукты реакции проходят через разделительную фольгу и останавливаются в графитовой фольге, нагретой до 1500-2000 К. Фольга из терморасширенного графита плотностью $1,0 \text{ г / см}^3$ и толщиной 0,6 мм использовалась в качестве стопора для продуктов реакции. Стопор - диск диаметром 30 мм. Его устанавливали на расстоянии 30 мм от цели. (больше информации в [2][3][4])

- 1 - диафрагма;
- 2 - pick-up датчик;
- 3- мишень;
- 4 - датчик пучка электронной эмиссии;
- 5 - разделительная фольга;
- 6 – горячая ловушка.



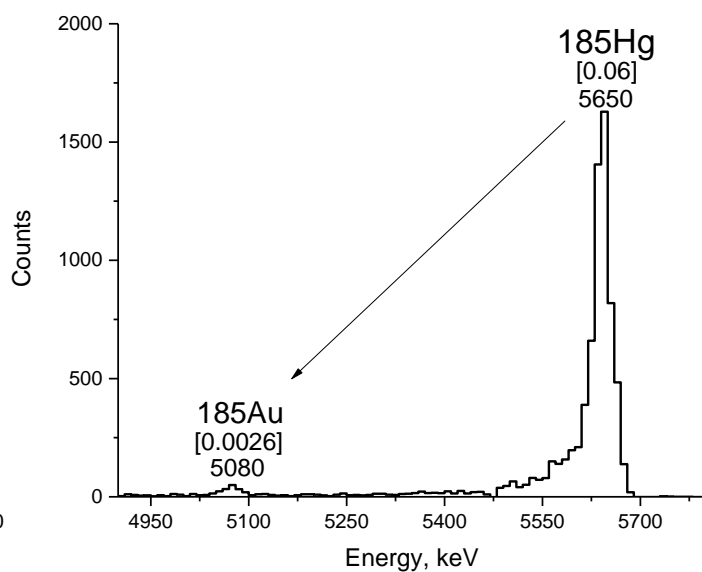
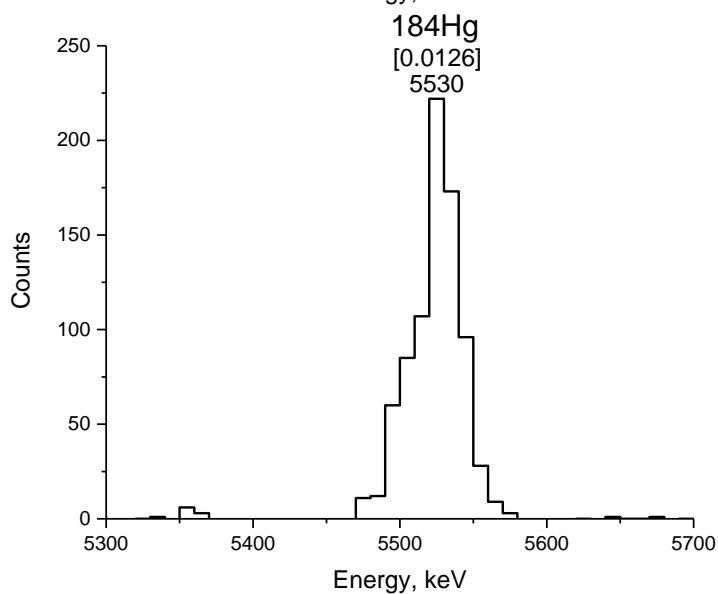
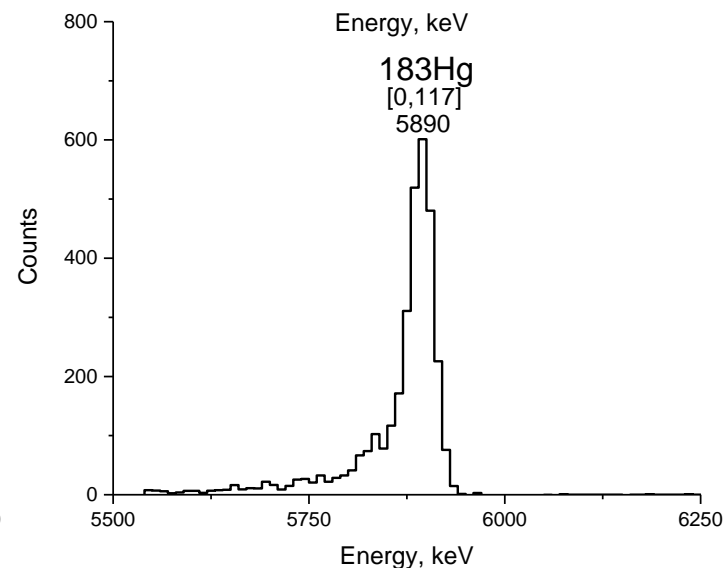
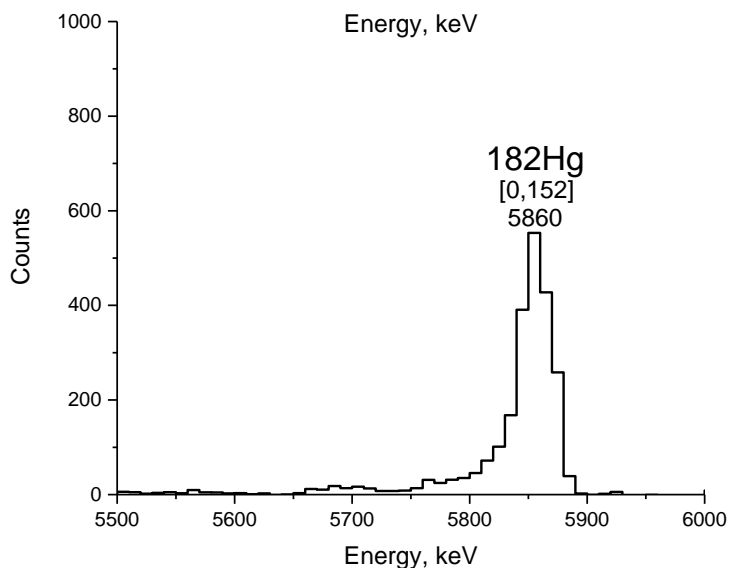
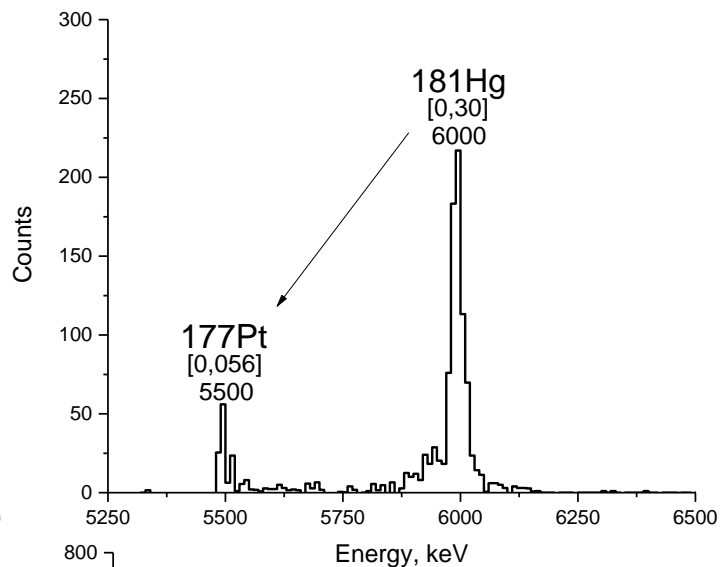
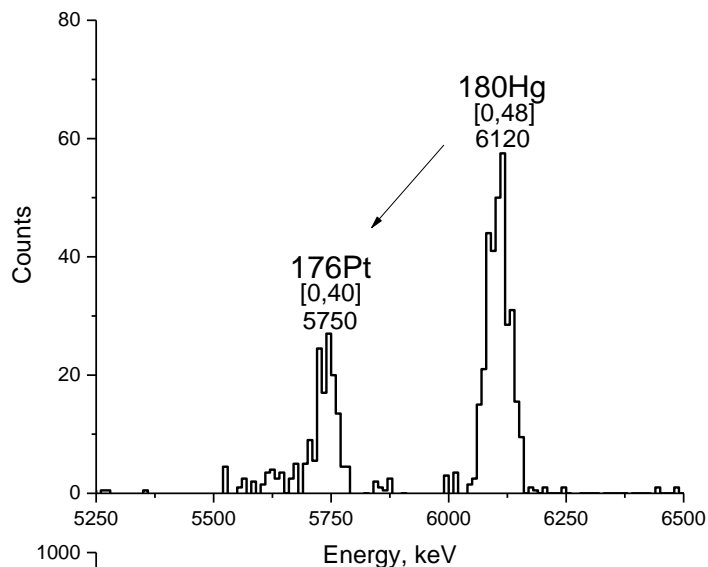
3.4 Детекторы и системы управления



Для регистрации продуктов ядерных реакций в фокальной плоскости масс-сепаратора была установлена кремниевая детекторная система (рисунок выше). Фронтальный детектор (1) имел площадь $240 \times 35 \text{ мм}^2$ и состоял из 192 полосок с шагом 1,25 мм. Для повышения геометрической эффективности детектирования продуктов распада четыре дополнительных детектора (2-4) были установлены вокруг переднего детектора под прямым углом к нему. У боковых детекторов было по 64(2, 3) и 16(4) стрипа. Все детекторы имели одинаковую толщину 300 мкм. Толщина их мертвого слоя на входе не превышала 50 нм. Этот узел детектора был установлен на общем металлическом каркасе. Стандартное смещение детекторов составляло -40 В. Энергетическое разрешение составляло около 30 кэВ для α -частиц из ^{226}Ra . Геометрия сборки позволяла регистрировать не менее 90% α -частиц, испускаемых при распаде одного ядра, если он происходил в середине фронтального детектора(более подробная информация в [2][3])

4 Реакция полного слияния $40\text{Ar}+144\text{Sm}\rightarrow(188-x)\text{Hg}+x\text{n}$

Ниже представлены альфа-спектры продуктов данной реакции, полученные от одной полосы детектора колодезного типа обработанные в программной среде OriginPro



Полученные альфа-спектры использовались для калибровки значений энергии на двумерных спектрах масса-энергия альфа-распада.

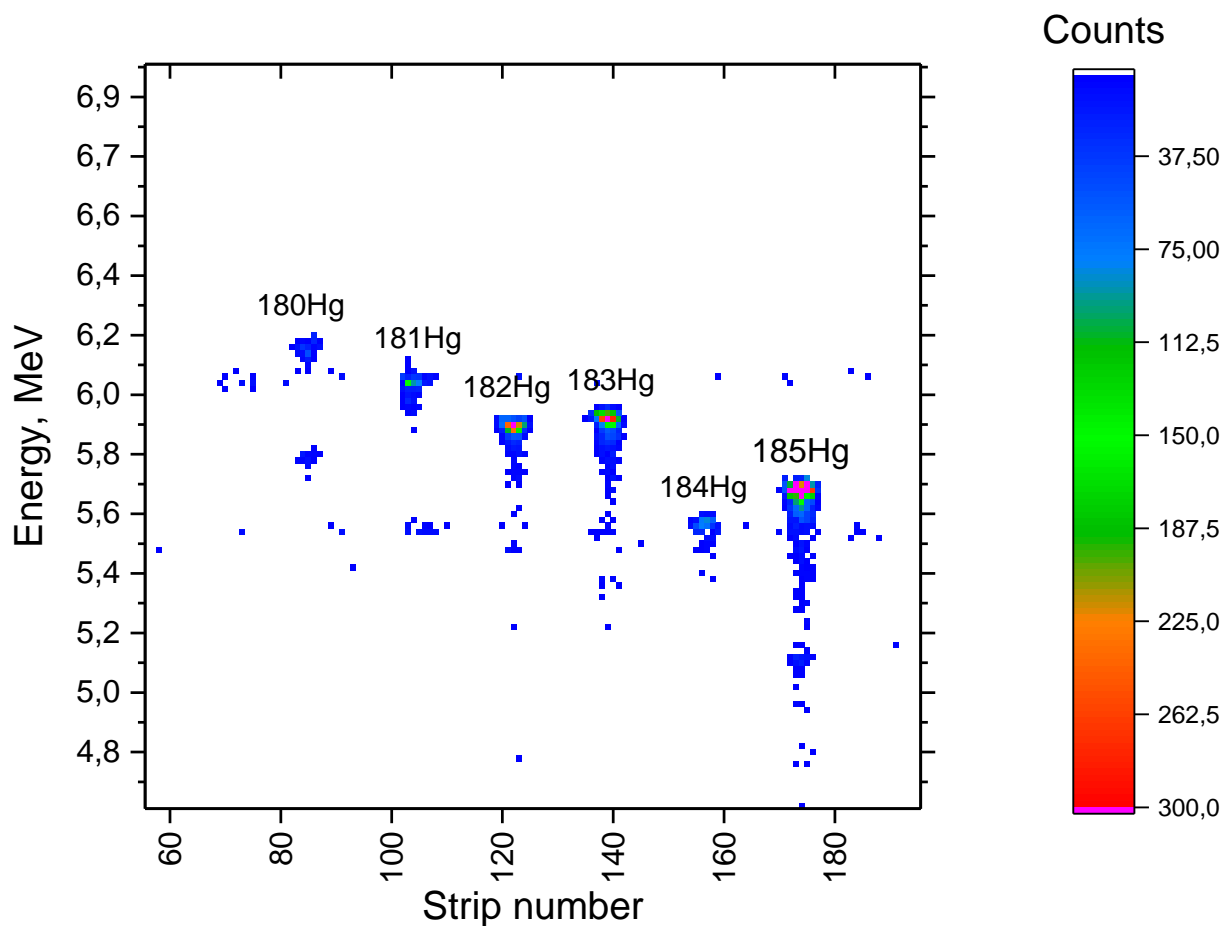
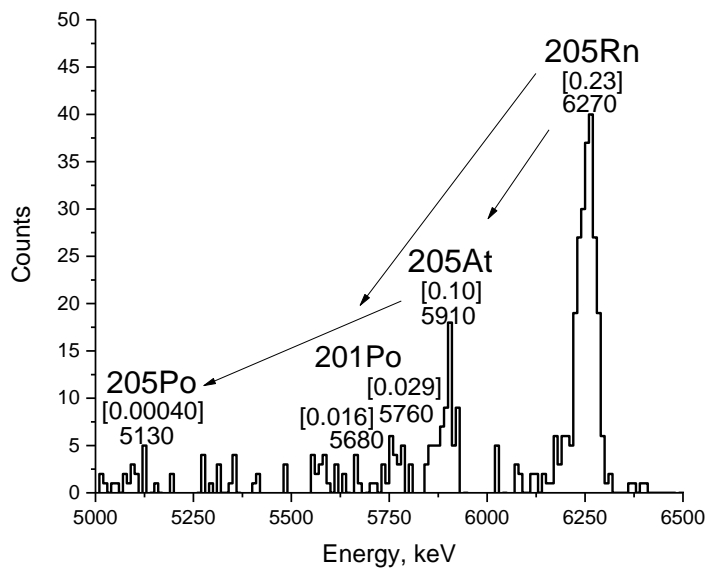
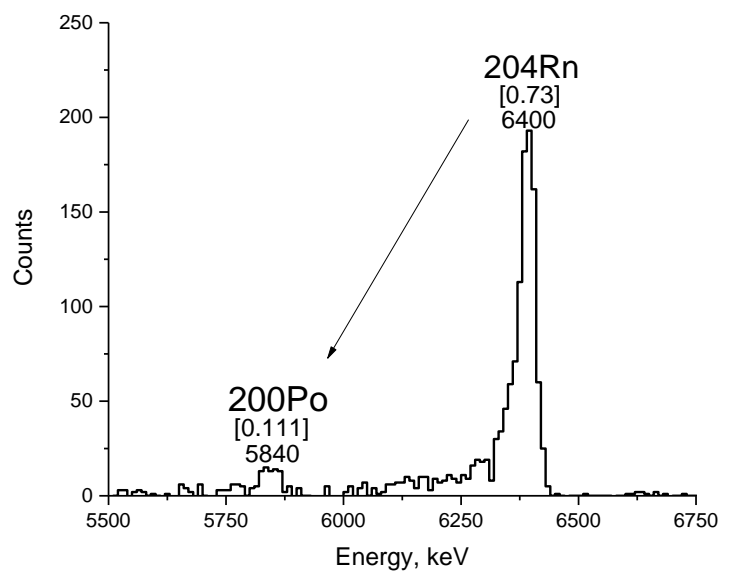
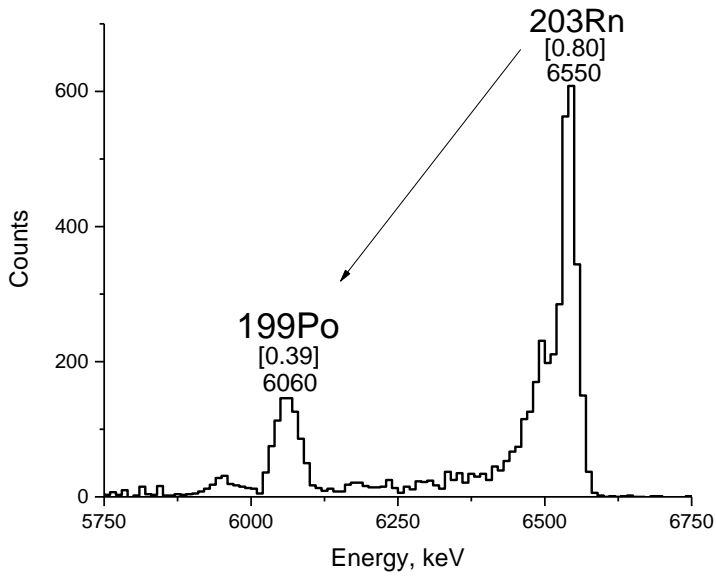
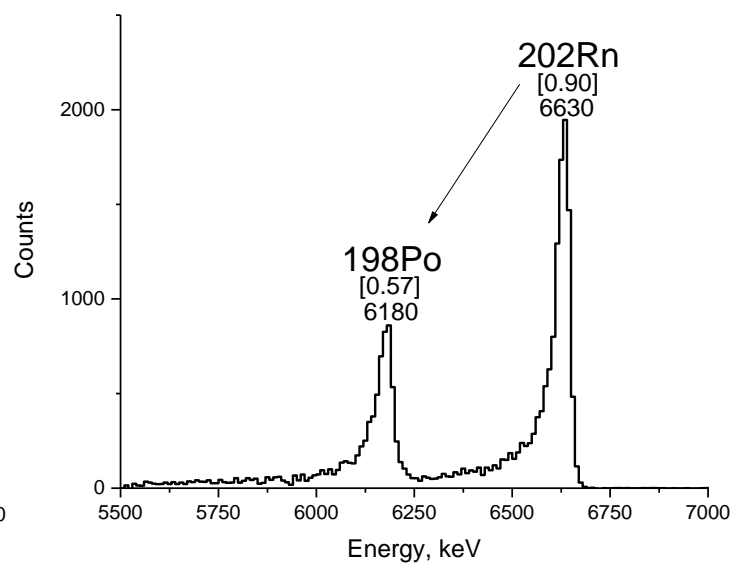
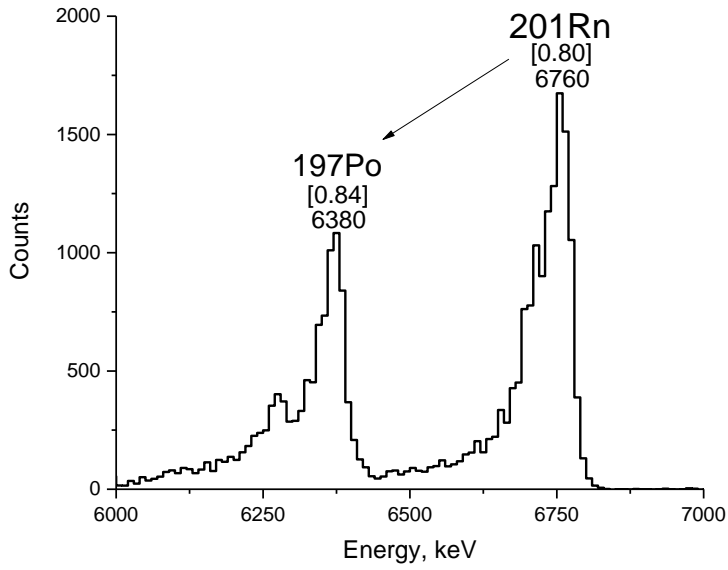


Таблица 1. Сравнение энергии альфа-распада E_α со значениями из литературы $E_{\alpha,l}$

№	Изотоп	$T_{1/2}$, с	E_α , КэВ	$E_{\alpha,l}$, КэВ
1	180Hg	2.58	6120	6119
2	181Hg	10.83	6000	6006
3	182Hg	9.4	5860	5867
4	183Hg	30.9	5890	5904
5	184Hg	49.1	5530	5535
6	185Hg	82,8	5650	5653
7	176Pt	6,3	5750	5753
8	177Pt	11	5500	5517
9	185Au	255	5080	5069

5 Реакция полного слияния $40\text{Ar}+166\text{Er}\rightarrow(206-x)\text{Rn}+x\text{n}$



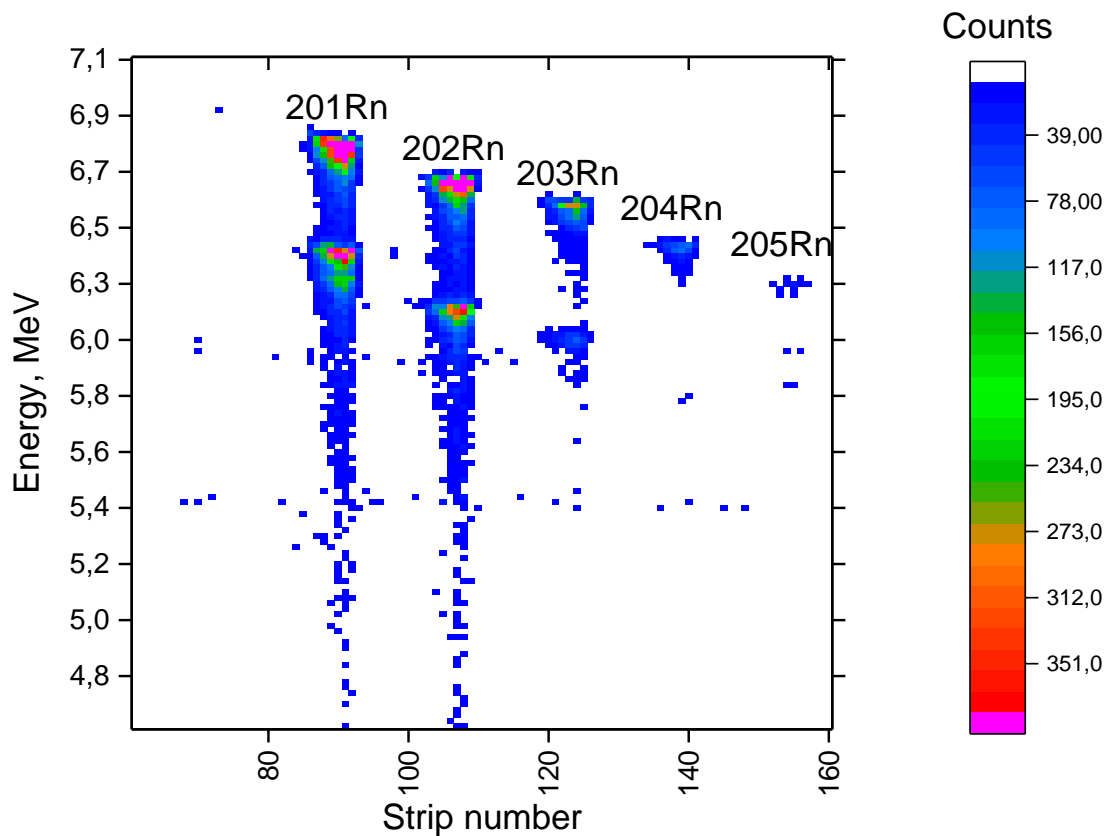
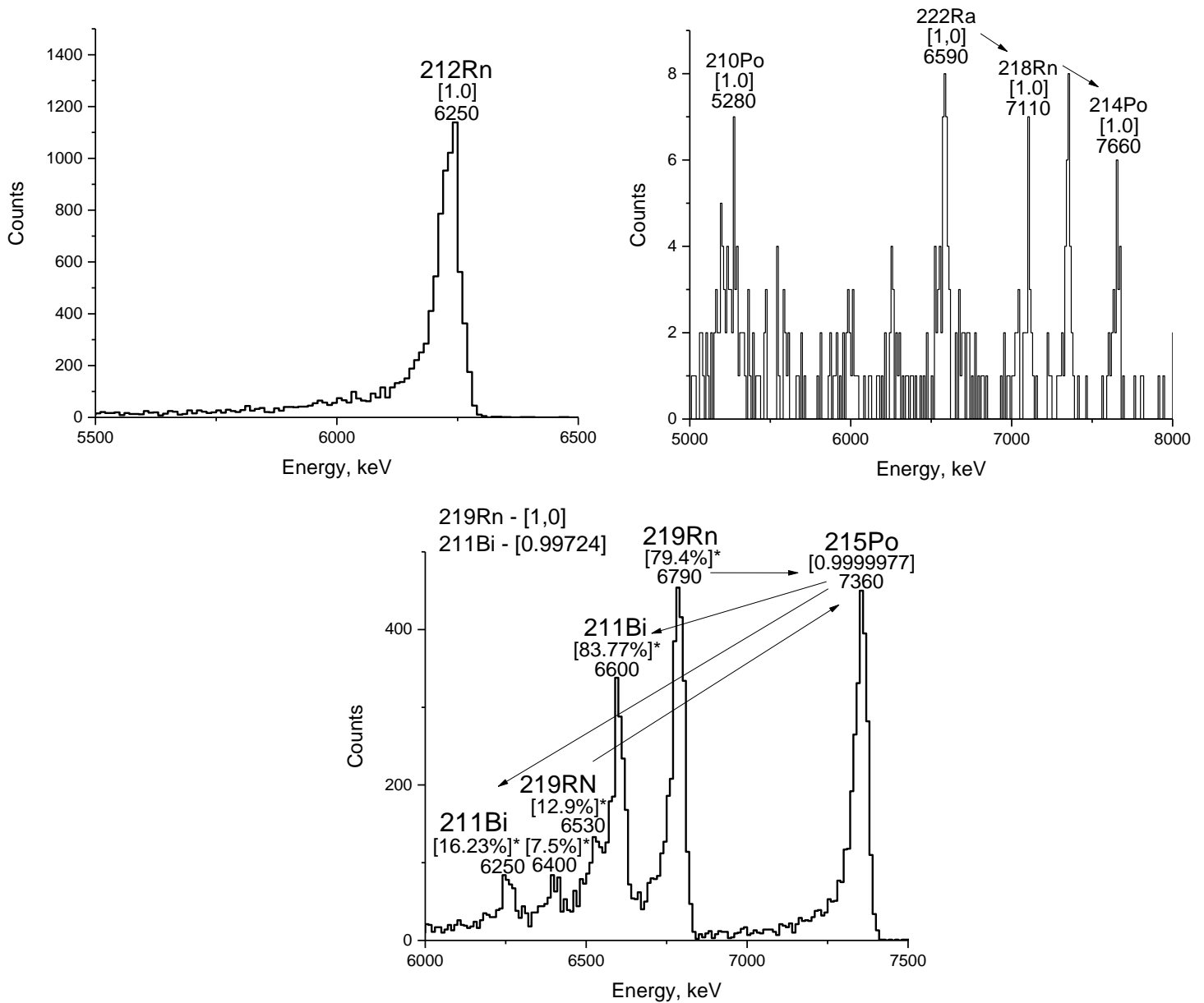


Таблица 2. Сравнение энергии альфа-распада E_α со значениями из литературы $E_{\alpha,l}$

№	Изотоп	$T_{1/2}$, с	E_α , КэВ	$E_{\alpha,l}$, КэВ
1	201Rn	7.1	6760	6725
2	202Rn	10	6630	6639.5
3	203Rn	28	6550	6549
4	204Rn	74.4	6400	6418.9
5	205Rn	170	6270	6262
6	197Po	25.8	6380	6383.4
7	198Po	106.2	6180	6182
8	199Po	250.2	6060	6059
9	200Po	690	5840	5861.9
10	201Po	534	5760	5786
11	201Po	918	5680	5683
12	205Po	5976	5130	5134
13	205At	1572	5910	5902

6 Реакция многонуклонных передач $48\text{Ca}+^{242}\text{Pu}$ с образованием $^{212}\text{-}^{219}\text{Rn}$



Из-за малого времени жизни изотопов радона с массовыми числами 213-217 MASHA не смогла идентифицировать эти изотопы. Что наглядно видно на двумерном спектре масса-энергия альфа-распада данной реакции. Данные изотопы распадаются по пути к детектору, не попадая к нему. Основная задержка (около 2 секунд) происходит в горячей ловушке, откуда ядра диффундируют в ЭЦР источник ионов[4].

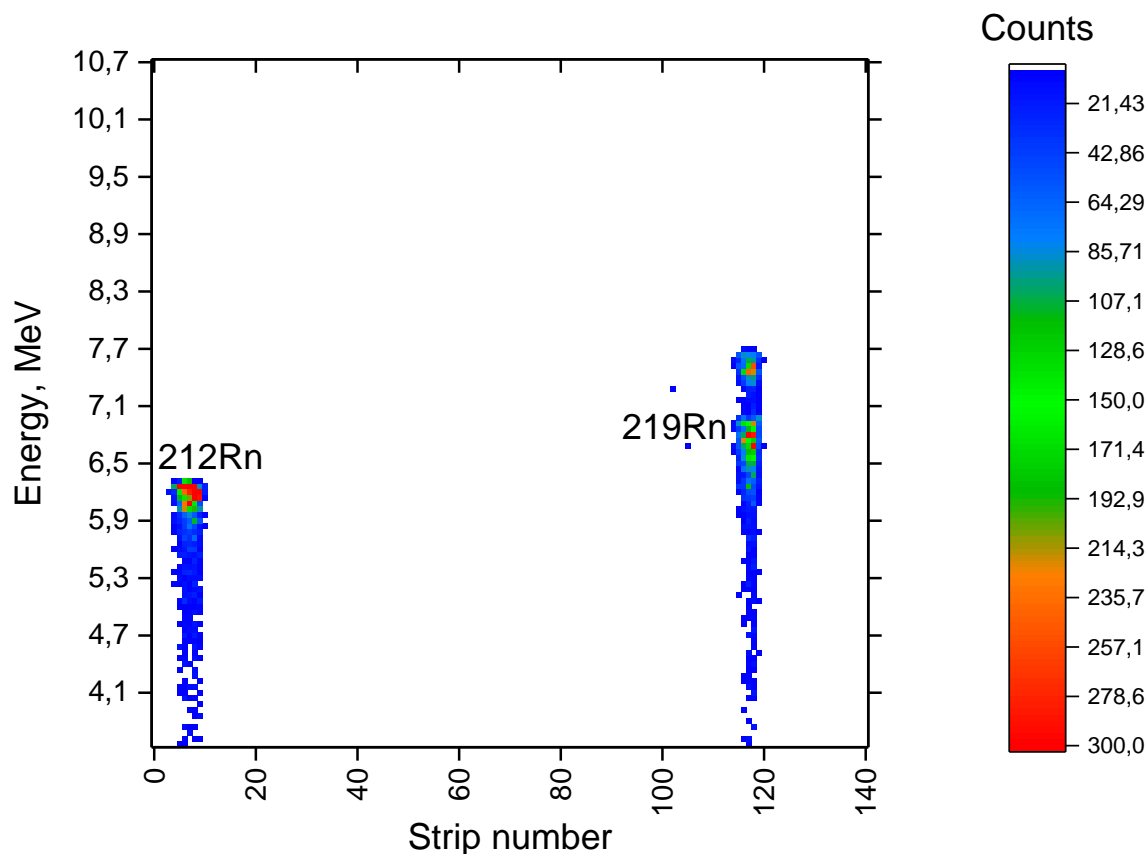


Таблица 3. Сравнение энергии альфа-распада E_α со значениями из литературы $E_{\alpha,l}$

№	Изотоп	$T_{1/2}$, с	E_α , КэВ	$E_{\alpha,l}$, КэВ
1	212Rn	1434	6250	6264
2	218Rn	$35 \cdot 10^{-3}$	7110	7129,2
3	219Rn	3,96	6790	6819,1
4	219Rn	3,96	6530	6552,6
5	219Rn	3,96	6400	6425,0
6	222Ra	36,17	6590	6559
7	214Po	$164.3 \cdot 10^{-3}$	7660	7686.82
8	210Po	138.376Дней	5280	5304.33
9	215Po	$1,781 \cdot 10^{-3}$	7360	7386,1
10	211Bi	128,4	6600	6622,9
11	211Bi	128,4	6250	6278,2

Заключение

Проведен анализ альфа-спектров испарительных остатков реакций полного слияния $40\text{Ar}+148\text{Sm}$, $40\text{Ar}+166\text{Er}$ и реакции многонуклонных передач $48\text{Ca}+242\text{Pu}$. В результате получены альфа-спектры и двумерные спектры масса-энергия альфа-распада. Определенные энергии хорошо согласуются со значениями из литературы. Эти результаты показывают хорошие перспективы использования MASHA для исследования сверхтяжелых элементов.

Благодарности

Благодарю Университетский центр ОИЯИ, за программу INTEREST и возможность поучаствовать в ней. А также Веденева Вячеслава Юрьевича за подробные объяснения и помощь в создании данного отчета.

Список используемых источников

1. Chemical characterization of element 112. R. Eichler, N. V. Aksenov, A. V. Belozerov, G. A. Bozhikov, V. I. Chepigin, S. N. Dmitriev, R. Dressler, H. W. Gaeggeler, V. A. Gorshkov, F. Haenssler, M. G. Itkis, A. Laube, V. Ya. Lebedev, O. N. Malyshev, Yu. Ts. Oganessian, O. V. Petrushkin, D. Piguet, P. Rasmussen, S. V. Shishkin, A. V. Shutov, A. I. Svirikhin, E. E. Tereshatov, G. K. Vostokin, M. Wegrzecki & A. V. Yeremin. Vol 447, 3 May 2007, doi:10.1038/nature05761.
2. Separation efficiency of the MASHA facility for short-lived mercury isotopes. A. M. Rodin · A. V. Belozerov · E. V. Chernysheva · S. N. Dmitriev · A. V. Gulyaev · A. V. Gulyaeva · M. G. Itkis · J. Kliman · N. A. Kondratiev · L. Krupa · A. S. Novoselov · Yu. Ts. Oganessian · A. V. Podshibyakin · V. S. Salamatin · I. Siva'c'ek · S. V. Stepantsov · D. V. Vanin · V. Yu. Vedeneev · S. A. Yuchimchuk · C. Granja · S. Pospisil. Published online: 11 March 2014 © Springer International Publishing Switzerland 2014
3. The current status of MASHA setup. V. Yu. Vedeneev, A.M. Rodin, L.Krupa. *Hyperfine Interactions* 238:19 (2017).
4. MASHA Separator on the Heavy Ion Beam for Determining Masses and Nuclear Physical Properties of Isotopes of Heavy and Superheavy Elements. A. M. Rodina, A. V. Belozerova, D. V. Vanina, V. Yu. Vedenev, A. V. Gulyaeva, A. V. Gulyaeva, S. N. Dmitrieva, M. G. Itkisa, J. Klimanb, N. A. Kondratieva, L. Krupaa, c, Yu. Ts. Oganessiana, V. S. Salamatina, I. Sivá eka, b, S. V. Stepantsova, E. V. Chernyshevaa, and S. A. Yuchimchuka. ISSN 00204412, *Instruments and Experimental Techniques*, 2014, Vol. 57, No. 4, pp. 386–393. © Pleiades Publishing, Ltd., 2014
5. Mendeleev's principle against Einstein's relativity: news from the chemistry of superheavy elements. H W GaEggeler. *Russian Chemical Reviews* 78 (12) 1139 ± 1144 (2009) # 2009 Russian Academy of Sciences and Turpion Ltd.