

## Представление

### На цикл работ “НОВЫЙ ГАЗОНАПОЛНЕННЫЙ СЕПАРАТОР DGFRS-2”

#### Раздел: НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

##### Авторы

1. Бехтерев В. В. (ЛЯР, ОИЯИ)
2. Воинов А. А. (ЛЯР, ОИЯИ)
3. Иванов Г. Н. (ЛЯР, ОИЯИ)
4. Константинов В. В. (ЛЯР, ОИЯИ)
5. Кузнецов Д. А. (ЛЯР, ОИЯИ)
6. Петрушкин О. В. (ЛЯР, ОИЯИ)
7. Подшибякин А. В. (ЛЯР, ОИЯИ)
8. Попеко А. Г. (ЛЯР, ОИЯИ)
9. Соловьев Д. И. (ЛЯР, ОИЯИ)
10. Шубин В. Д. (ЛЯР, ОИЯИ)

В цикле работ представлены результаты проектирования нового газонаполненного сепаратора DGFRS-2 Фабрики Сверхтяжелых Элементов ЛЯР ОИЯИ, создания его узлов, написания программ транспортировки ионов от мишени к детекторам, а также серии тестовых экспериментов, выполненных в 2019-2022 годах.

В результате экспериментов, начатых с 2000 года на ускорителе У-400 и сепараторе DGFRS, были существенно расширены границы области наиболее тяжелых ядер. Было открыто шесть элементов вплоть до Oг ( $Z=118$ ), изучены свойства более 50 изотопов элементов от Rf ( $Z=104$ ) и выше. Однако синтез элементов с  $Z \geq 118$ , а также расширение области сверхтяжелых ядер – получение изотопов с меньшим или большим числом нейтронов, более глубокое изучение свойств ядер, химических свойств тяжелых элементов столкнулись с серьезными трудностями. Сечения образования новых изотопов и новых элементов значительно падают. Той чувствительности эксперимента, которая считалась рекордной в 2000 году, стало недостаточно для продолжения исследований.

Для повышения чувствительности в десятки раз потребовалось создать новый экспериментальный комплекс «Фабрика СТЭ», базовой установкой которого стал ускоритель ДЦ-280 с интенсивностью в 10 раз выше, чем обеспечивал циклотрон У-400. Первой установкой для синтеза и изучения свойств ядер стал новый сепаратор DGFRS-2, его эффективность транспорта ядер к детекторам вдвое превышает возможности DGFRS.

Общая схема сепаратора и конструкция его оптических элементов разработаны в ЛЯР ОИЯИ, сами магниты произведены компанией SIGMAPHI (Франция). Силами подразделений ЛЯР разработаны и изготовлены узлы ионопровода, система дифференциальной откачки газа между сепаратором и ионопроводом, камеры для вращающихся мишеней, камеры для детекторов, система прокачки газа через сепаратор (совместно с компанией МВФ), система управления вакуумными узлами, система безопасной эксплуатации этой системы, система управления магнитами и т.д.

Сепаратор DGFRS-2 имеет ионно-оптическую схему  $Q_v D_h Q_h Q_v D$ . Квадруполь  $Q_v$  фокусирует вылетевшие их мишени ионы в вертикальном направлении так, чтобы большая часть продуктов реакции полного слияния (ERs) проходила через зазор дипольного магнита  $D_h$ . Этот магнит отклоняет ионы на  $31.5^\circ$  и фокусирует их в горизонтальном направлении. Диполь отделяет ERs от частиц пучка и подавляет большую часть других фоновых частиц (таких как, рассеянные ионы пучка и мишени, продукты неполного слияния и т. д.). Квадруполи  $Q_h$  и  $Q_v$  фокусируют ERs на детектор, расположенный в фокальной плоскости DGFRS-2, в горизонтальном и вертикальном направлениях. Диполь  $D$  с углом отклонения

$10^\circ$  дополнительно подавляет фон от заряженных частиц – альфа-частиц, протонов и т.д., образующихся в реакциях ионов пучка с газом и внутренними стенками DGFRS-2.

Для достижения максимальной трансмиссии ядер через сепаратор к детекторам необходима программа, описывающая движение ионов в магнитных полях сепаратора. Дополнительная сложность при моделировании траектории ионов возникает из-за того, что они движутся в газе при давлении около 1 мбар. При столкновении с атомами газа происходит изменение заряда ионов, их рассеяние на атомах газа, потеря энергии в газе и в материалах детекторной камеры. При этом необходимо учитывать величину и направление магнитного поля во всех точках сепаратора, а также его внутренние размеры. Первая программа была создана при проектировании сепаратора. Вторая модель сепаратора написана на основе программного комплекса GEANT4. Программы позволили с высокой точностью описывать горизонтальные и вертикальные распределения ядер при различных комбинациях токов в магнитах, при варьировании давления газа в сепараторе, вычислять трансмиссию ионов и устанавливать значения токов в различных экспериментах.

Для использования высоких интенсивностей пучка ДЦ-280 была разработана система дифференциальной откачки газа, чтобы обеспечивать высокий вакуум в ионопроводе ДЦ-280 при давлении газа в DGFRS-2 1 мбар. Объемы DGFRS и ионопровода разделялись вращающимся окном из Ti фольги. При повышенной интенсивности пучка ДЦ-280 фольга стала разрушаться в течение минут. Вместо окна установлена система насосов, разделенных коллиматорами, создающими сопротивление потоку газа. Также были разработаны новые блоки для вращающихся мишеней большего диаметра, чем на DGFRS. Блоки с диаметрами мишени 15 и 24 см созданы для работы с изотопами разной степени активности.

Разработаны новые блоки для установки детекторов разных размеров. Из-за повышенной дисперсии магнита значительно снизился фон на детекторах, но возникла необходимость увеличить горизонтальный размер детектора до 220 см. Он собран из двух фокальных детекторов размером  $48 \times 128 \text{ мм}^2$ , имеющих полосы шириной 1 мм спереди и сзади (DSSD) для определения положения ядра на его поверхности. DSSD окружен восемью боковыми детекторами  $60 \times 120 \text{ мм}^2$  для дополнительной регистрации альфа-частиц и осколков деления, которые могут вылететь из него в сторону сепаратора. Вся сборка имеет вид параллелепипеда с пятью гранями и глубиной 120 мм. Для установления факта прилета частицы из сепаратора создана система многопроводных пропорциональных камер, работающих при давлении 1.6 мбар. Система регистрации ядер включает цифровую и аналоговую электронику, работающие независимо и позволяющие отключать пучок после распада материнского ядра для подавления фона при наблюдении распада дочерних ядер.

Разработана система, обеспечивающая постоянный проток газа через сепаратор, стабильное давление газа в нем с варьруемой заданной величиной, безопасное использование различных газов. Проект был реализован компанией МВФ (Россия).

До начала экспериментов по синтезу сверхтяжелых ядер была проведена серия многочисленных тестовых экспериментов.

Измерена дисперсия DGFRS-2, величина совпала с расчетами. Дисперсия определяет точную подстройку дипольных магнитов в экспериментах по синтезу сверхтяжелых ядер.

В серии экспериментов определено оптимальное давление газа в сепараторе, которое заметно влияет на величину трансмиссии сепаратора.

Измерена эффективность сбора ядер на детекторах DGFRS-2. Из сравнения результатов опытов на DGFRS и DGFRS-2 в экспериментах по синтезу ядер Mc (элемент 115) в реакции  $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$  показано, что эффективность нового сепаратора вдвое выше, чем на DGFRS.

Изучены фоновые условия на новом сепараторе. Показано, что они более чем на два порядка ниже того, что было в экспериментах на DGFRS.

Вся серия тестовых опытов, а также первые эксперименты по исследованию изотопов элементов 110, 112, 114 и 115 показала, что новый экспериментальный комплекс позволяет продолжать исследования сверхтяжелых ядер на значительно более высоком уровне чувствительности.

## Список публикаций

1. A.G. Popeko.

**On-line separators for the Dubna superheavy element factory.**

Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **376**, 144–149 (2016).

2. Yu.Ts. Oganessian, V.K. Utyonkov, A.G. Popeko, D.I. Solovyev, F.Sh. Abdullin, S.N. Dmitriev, D. Ibadullayev, M.G. Itkis, N.D. Kovrizhnykh, D.A. Kuznetsov, O.V. Petrushkin, A.V. Podshibiakin, A.N. Polyakov, R.N. Sagaidak, L. Schlattauer, I.V. Shirokovsky, V.D. Shubin, M.V. Shumeiko, Yu.S. Tsyganov, A.A. Voinov, V.G. Subbotin, V.V. Bekhterev, N.A. Belykh, O.A. Chernyshev, K.B. Gikal, G.N. Ivanov, A.V. Khalkin, V.V. Konstantinov, N.F. Osipov, S.V. Paschenko, A.A. Protasov, V.A. Semin, V.V. Sorokoumov, K.P. Sychev, V.A. Verevchkin, B.I. Yakovlev, S. Antoine, W. Beeckman, P. Jehanno, M.I. Yavor, A.P. Shcherbakov, K.P. Rykaczewski, T.T. King, J.B. Roberto, N.T. Brewer, R.K. Grzywacz, Z.G. Gan, Z.Y. Zhang, M.H. Huang, H.B. Yang.

**DGFRS-2 – A gas-filled recoil separator for the Dubna Super Heavy Element Factory.**

Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **1033**, 166640 (2022).

3. D.I. Solovyev and N.D. Kovrizhnykh.

**Simulations of recoil trajectories in Dubna Gas-Filled Recoil Separator 2 by GEANT4 toolkit.**

J. Instrum. **17**, P07033 (2022).

4. Д. И. Соловьев, Н. Д. Коврижных, В. К. Утенков, Ю. Ц. Оганесян, Ф. Ш. Абдуллин, А. А. Воинов, С. Н. Дмитриев, Д. Ибадуллаев, М. Г. Иткис, Д. А. Кузнецов, О. В. Петрушкин, А. В. Подшибякин, А. Н. Поляков, А. Г. Попеко, Р. Н. Сагайдак, Л. Шлаттауэр, В. Д. Шубин, М. В. Шумейко, Ю. С. Цыганов.

**Расчет и экспериментальные характеристики нового газонаполненного сепаратора DGFRS-2.**

Доклад на LXXII Международной конференции «Ядро-2022: Фундаментальные вопросы и приложения».

Вестник РАН. Серия Физическая (принято в печать).