

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Курганова Александра Андреевича  
«Методика регистрации сверхтяжелых ядер многоканальными системами  
кремниевых детекторов»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 1.3.15 - Физика атомных ядер и  
элементарных частиц, физика высоких энергий

### 1. Актуальность выбранной темы

Диссертационная работа Курганова А.А. посвящена исследованию методик регистрации сверхтяжелых ядер. На текущий момент химический состав сверхтяжелых ядер космических лучей изучался в таких экспериментах, как HEAO-3-C3, LDEF, SuperTiger, CRIS. Накопленная статистика для химического или зарядового состава при этом невелика, а данные по изотопному составу для  $Z > 32$  отсутствуют. Поэтому задача разработки методики и соответствующей аппаратуры для измерения химического и изотопного состава для ядер с более высокими  $Z$  крайне актуальна. Конечной целью исследований, результаты которых представлены в диссертации, является разработка нового космического эксперимента НУКЛОН-2 для расширения доступных данных по элементному и изотопному составу ядер космических лучей. Другой проблемой, на которую была нацелена диссертационная работа, является исследование радиационной стойкости микросхем в результате облучения их сверхтяжелыми ядрами. Эта задача является крайне актуальной и практически значимой не только для эксперимента НУКЛОН-2, эксплуатация которого планируется в течение пяти лет, но и других космических комплексов. Для решения этой задачи автором были использованы возможности эксперимента ДЧС-NICA по экспонированию образцов БИС в потоках ядер в широком диапазоне  $Z$ .

### 2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Диссертация состоит из введения, 7 глав и заключения, и структурно может быть разбита на две достаточно независимые части, объединенные единой целью – реализация будущего космического эксперимента НУКЛОН-2 для регистрации тяжелых и сверхтяжелых ядер на основе многослойных тонких кремниевых детекторов. Первая часть диссертации посвящена



решению задач исследования, обоснования и оптимизации конструкции эксперимента НУКЛОН-2 и тестированию его прототипа на ядрах аргона и ксенона. Во второй части решается задача разработки спектрометра ДЧС-NICA, предназначенного для определения заряда, массы и точки попадания ядер пучка ускорителя в образцы БИС. Большое внимание диссертантом уделено созданию методик обработки и анализа данных с этих приборов.

Диссертантом на основе анализа данных по исследованию сверхтяжелых ядер космических лучей, полученных предыдущим поколением спутниковых экспериментов LDEF, HEAO-3-C3, SuperTIGER, CRIS, делается вывод, что химический состав для  $Z > 40$  измерен с малой статистикой, а изотопный состав КЛ для  $Z \geq 33$  не измерялся вовсе. Для заполнения неисследованной области предлагается спутниковый эксперимент НУКЛОН-2 по прямому изучению химического и изотопного состава космических лучей (КЛ) при сравнительно низких энергиях (от 0.1 до 1-3 ГэВ в зависимости от  $Z$ ) вплоть до границы стабильных ядер и исследованию изотопного состава КЛ за пиком железа. В основе эксперимента лежит методика регистрации ядер космических лучей с полным поглощением в калориметре, состоящем из стопки кремниевых детекторов.

В диссертации рассматривается конструкция аппаратной части НУКЛОН-2, состоящей из 48 идентичных модулей СТИКЛ (спектрометр тяжелых изотопов космических лучей), каждый из которых представляет собой стопку 40 плоских кремниевых детекторов, часть из которых образует трековую систему, часть – калориметрическую. Методика регистрации основана на измерении кривой ионизационных потерь частицы вплоть до ее остановки в детекторе и является модификацией классической методики E-dE.

Важную часть диссертации представляет выбор и разработка методики регистрации и анализа в применении к различному элементному и изотопному составу тяжелых ядер. Соискатель на основе традиционного «прямого подхода», заключающегося в использовании для анализа сильно упрощенной формулы Бете-Блоха, показывает, что в таком виде анализ изотопного спектра космических лучей невозможен. Как альтернативу, автор предлагает и исследует возможности модельно-зависимого «двумерного» метода анализа, основанного на прямом сравнении экспериментальных событий с моделированием в пространстве  $E, dE/dx$ .

Другим важным результатом является оптимизация конструкции базового элемента детектора НУКЛОН-2 - спектрометра тяжелых изотопов космических лучей (СТИКЛ). Автором была создана математическая модель, с помощью которой были определены оптимальная толщина кремниевых детекторов – 2 миллиметра – и эффективный уровень допустимых шумов



электроники  $\sim 5$  МэВ. На основе модельного эксперимента по регистрации оптимизированным СТИКЛ изотопов ядер от неона до диспрозия показана работоспособность разработанного ранее модельно-зависимого метода и определено изотопное разрешение эксперимента в зависимости от  $Z$  – от 0.24 до 1.6 единиц массы в диапазоне  $Z$  от 10 до 66.

Для проверки применённых аппаратных решений и подходов к анализу данных диссертантом был создан прототип СТИКЛ, характеристики которого изучались в трех пучковых экспериментах: на ускорителе SPS (CERN) для калибровки аппаратуры с помощью пучка фрагментированного Pb с энергией 150 ГэВ/нуклон и на пучках НУКЛОТРОН (ОИЯИ, Дубна) и SPS (CERN) для анализа изотопного разрешения на изотопах аргона и ксенона соответственно. Важными результатами этих работ были разработка математической модели прототипа для тестирования и настройки анализа, а также моделирования мишени-деградера, устанавливаемого в пучковых экспериментах перед детектором установки для снижения энергии. Результаты продемонстрировали принципиальную возможность проведения пучковых экспериментов с прототипом НУКЛОН-2.

На основе анализа данных пучковых экспериментов с изотопами аргона соискатель получил зарядовое и массовое разрешение и показал, что массовое разрешение составляет 0.28 массовых единиц. При анализе экспериментальных данных с изотопами ксенона был получен важный результат о невозможности использования модельно-зависимой методики. Автором предлагается новая, модельно-независимая методика, основанная на аппроксимации экспериментальных событий функционалом и извлечения заряда и массы частицы из параметров аппроксимации. Показана принципиальная работоспособность этого метода для разрешения изотопов ксенона в моделировании и эксперименте и наличие в принципе разрешения изотопов ксенона, но не соседних, а изотопов, стоящих «через один» по массовому числу. Чтобы удостовериться в работоспособности методики при работе с большими  $Z$ , требуется более подробное изучение модельно-независимой методики и проведение эксперимента на изотопах с другими  $Z$ .

Далее делается странный, с моей точки зрения, вывод о том, что недостаток экспериментальных данных можно восполнить в рамках проекта ДЧС-NICA, которому посвящена значительная часть диссертации. ДЧС-NICA - это проект детекторной части станции по изучению радиационной стойкости микросхем путем облучения их ядрами на ускорителе НУКЛОТРОН, который дает возможность выбора ядер пучка от углерода до золота. Диссертантом проведено моделирование ДЧС, показана работоспособность методик эксперимента, в том числе принципиально новой



методики «ядерной томографии»  $^{136}\text{Xe}$  результатам моделирования ожидаемая ошибка измерения линейных потерь энергии в тестируемых микросхемах не превышает 7% с учетом эффектов многократного рассеяния ядер-снарядов в материале детекторов спектрометра.

Впервые диссертантом предложен новый метод ядерной «томографии» для аппаратуры ДЧС-НИСА, с помощью которого можно определять координаты основных конструктивных элементов и энерговыделение в исследуемых БИС без вскрытия корпуса микросхемы по результатам анализа прохождения пролетных ядер от ускорителя. Получено координатное разрешение, составляющее 42-56 мкм для основного режима работы ДЧС-НИСА и 22-32 мкм для режима ядерной «томографии». Предложена методика юстировки детекторов ДЧС-НИСА, протестированная как в математической модели, так и в пучковом эксперименте. К сожалению, режим ядерной «томографии» экспериментально реализовать не удалось из-за деградера, установленного перед детектором для снижения энергии ядер ксенона.

В завершение диссертант предложил способ проведения совместного эксперимента ДЧС-НИСА и НУКЛОН-2 на пучке комплекса НИСА. Однако к этому предложению достаточно много вопросов в свете предварительных результатов тестирования на пучке ядер ксенона в Дубне.

### **3. Достоверность полученных результатов**

В достоверности и обоснованности основных результатов работы сомнений не возникает. Все характеристики детекторов, детали установок, описания разработанных методик и экспериментальных исследований подробно приведены в тексте диссертации и снабжены обширным иллюстративным материалом. Модельные расчеты были получены в широко распространенных пакетах математического моделирования и проверены на пучковых экспериментах.

Основные результаты, полученные в диссертации, апробированы в докладах на международных и всероссийских конференциях, опубликованы в статьях, в том числе в ведущих научных журналах. Эти работы, как и автореферат, полно и правильно отражают содержание диссертации.

### **4. Научная новизна**

Важнейшим результатом, полученным диссертантом, является оптимизация конструкций детекторов НУКЛОН-2 и ДЧС-НИСА для решения задач по регистрации тяжелых ядер и изотопов КЛ. Продемонстрировано, что изотопное разрешение для тяжелых и сверхтяжелых ядер достигает



оптимума при толщине одного слоя кремниевого детектора ~2 миллиметров при максимально допустимых шумах электроники ~ 5 МэВ. Для прибора ДЧС-НИСА ошибка измерения линейных потерь энергии в тестируемых микросхемах не превышает 7% с учетом эффектов многократного рассеяния ядер в материале детекторов спектрометра.

В диссертации для анализа данных спектрометра НУКЛОН-2 впервые предложен модельно-зависимый метод определения массового состава регистрируемых ядер, который значительно расширил возможности исследования сверхтяжелых ядер по сравнению с использованными ранее методами этого типа и позволяет работать.

Для анализа данных спектрометра НУКЛОН-2 предложен новый, не имеющий аналогов модельно-независимый метод анализа массового состава сверхтяжелых ядер.

Для работы со спектрометром ДЧС-НИСА предложен новый метод юстировки положения координатных детекторов в составе аппаратуры, а также разработан и опробован оригинальный метод ядерной «томографии» для аппаратуры ДЧС-НИСА.

Оценивая диссертационную работу и её завершённость, необходимо сделать ряд **замечаний**:

1. Автор утверждает, что общая постановка эксперимента с ДЧС-НИСА и требования к ускорительному пучку имеют много общего с НУКЛОН-2, но не аргументирует это. Конструктивно ДЧС-НИСА принципиально отличается от детектора НУКЛОН-2.
2. Предложенный метод определения структуры элементов БИС с помощью ядерной «томографии» на ускорительных пучках ядер хоть и является оригинальным, но его эффективность сомнительна по сравнению с традиционными методами дистанционной радиографии, например с методом 2D рентгенографии, и к реальной томографии не имеет отношения.
3. В диссертации в нескольких разделах, в том числе и в Заключение, приводится погрешность угловых установок сдвигов детекторных плоскостей ДЧС-НИСА в результате юстировки на уровне 0.2 микро радиан. Однако из рисунка 57(b) диссертации (стр. 76) следует значение 0.2 милли радиан.
4. В диссертации отсутствует обсуждение случаев пересечения треками ядер нескольких СТИКЛов.
5. Практически на всех рисунках приводятся надписи на английском языке (нарушение требований ГОСТа).
6. На многих рисунках отсутствуют ошибки (рис. 15, 31, 45, 50).
7. Один и тот же рис. 26 в диссертации и рис. 4 в автореферате содержит разные подписи, смысл которых неоднозначен: в диссертации: «Полученное

распределение  $Z$  во втором шаге калибровки»; в автореферате: «Зарядовое разрешение после процедуры калибровки».

8. Рисунок 29: нет подписи оси абсцисс, нет обозначений а) и б), на которые есть ссылки в тексте.

9. Рисунок 30: нет подписей осей. Что означает «нескольких более низких зарядов». Каких?

10. Стр. 66: что такое ошибка координаты  $X$ ? Это RMS, распределение которых изображено на рис. 45?

11. В тексте диссертации при написании «Монте-Карло» где-то используются прописные буквы, где-то – строчные (монте-карло); то же при написании «Пик Брэгга» и «пик брэгга» (стр. 53).

12. Используется два типа обозначений нуклидов ядер:  ${}^A_ZX$  и  ${}_A^ZX$ . (стр. 34 и др.).

13. Рис. 18 (стр. 37) – нет подписей осей.

14. В разделе 7 используется термин юстировка, но чаще «алаймент». Правильно писать транслитерацию «алайнмент». Но лучше – юстировка.

15. Присутствуют фразеологизмы: «Данную нехватку экспериментальных данных было решено решать в рамках проекта ДЧС-НІСА» и др.

Указанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертационной работы. Автор успешно выполнил все поставленные перед ним задачи, а его вклад в полученные результаты является определяющим.

## 5. Заключение

Исследования, проведенные Кургановым А.А. выполнены на высоком методическом уровне, полученные результаты, выводы и рекомендации оригинальны.

Разработанные методы будут крайне важны для проводимых и планируемых экспериментов по регистрации тяжелых и сверхтяжелых ядер в космосе и на земле.

Содержание работы и ее оформление показывают высокую компетентность и квалификацию автора.

Автореферат полностью соответствует положениям диссертации.

Диссертационная работа «Методика регистрации сверхтяжелых ядер многоканальными системами кремниевых детекторов» представляет собой законченную научно-квалификационную работу и в полной мере



соответствует требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий (по физико-математическим наукам), а именно следующим ее направлениям: «п. 2 Конструирование и создание новых экспериментальных установок и аппаратуры для исследований по ядерной физике и физике космических лучей, физике высоких энергий, разработка новых ускорительных установок», а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Считаю, что Курганов Александр Андреевич заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий» за решение научной задачи - разработки методик регистрации тяжелых и сверхтяжелых ядер в космических и наземных экспериментах для спектрометров на основе многослойных тонких кремниевых детекторов.

**Официальный оппонент:**

Профессор отделения ядерной физики и технологий  
офиса образовательных программ  
НИЯУ МИФИ,  
доктор физико-математических наук



Яшин Игорь Иванович  
14 февраля 2024 г.

**Контактные данные:**

Адрес организации: 115409, г. Москва,  
Каширское шоссе, д. 31  
Тел: +7 916 3541646  
Email: [IIYashin@mephi.ru](mailto:IIYashin@mephi.ru)

**Контактные данные:**

тел.: 7(916)354-16-46, e-mail: [iyashin@mephi.ru](mailto:iyashin@mephi.ru)

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:  
01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Адрес места работы:  
115409, г. Москва,  
Каширское шоссе, д. 31  
Тел: +7 916 3541646  
Email: PYashin@mephi.ru

Подпись И.И.Яшина удостоверяю:

Начальник отдела по  
работе с научно-педаго-  
гическими работниками  
Е.Ф.Хохлова

