

## ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ НА ДИССЕРТАЦИЮ

Курганова Александра Андреевича

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
на тему «Методика регистрации сверхтяжелых ядер многоканальными  
системами кремниевых детекторов».

Диссертационная работа Курганова А. А. посвящена разработке эксперимента НУКЛОН-2 для изучения изотопного и химического состава сверхтяжелых ядер космических лучей (КЛ), а также связанного по методическим решениям с этим экспериментом проекта ДЧС-NICA. В работе проведено моделирование экспериментов в пакете Geant4, на основе моделирования разработаны методики анализа данных, получены требования к электронике, результаты моделирования подтверждены проведенными пучковыми экспериментами. Актуальность темы исследования обусловлена применимостью ожидаемых результатов эксперимента во многих областях науки, в том числе за пределами физики космических лучей, а также тем, что планируемый эксперимент НУКЛОН-2 имеет большое научное значение, так как должен закрыть белое пятно в науке, связанное с полным отсутствием данных по изотопному заряду ядер космических лучей тяжелее германия ( $Z=32$ ) и дать возможность существенно увеличить имеющуюся статистику по химическому составу сверхтяжелых ядер космических лучей вплоть до трансуранов.

Диссертация состоит из восьми глав, включающих литературный обзор и заключение.

Первая глава является вводной и содержит 4 раздела. В первом разделе дан общий литературный обзор текущего состояния физики космических лучей. Во втором разделе описана актуальность исследования изотопного и химического состава сверхтяжелых КЛ, рассмотрены направления исследований, для которых требуются данные этого рода. В третьей части дан обзор имеющихся данных по результатам экспериментов LDEF, HEAO-3-C3, SuperTIGER, CRIS. Показано, что для сверхтяжелых ядер статистика по химическому составу мала, а по изотопному составу ядер для  $Z > 32$  вовсе отсутствует. В четвертой части дано краткое описание планируемого эксперимента НУКЛОН-2 для решения сформулированных задач и закрытия существующих «белых пятен» в данных.

Во второй главе рассматривается модельно-независимый метод анализа данных на предмет детектирования изотопного состава ядер КЛ, применяемый в дальнейшем. Сначала сформулированы задачи перед методиками анализа и моделированием эксперимента: оптимизация конструкции, установление требований к электронике, определение разрешения, моделирование условий пучковых экспериментов. Затем рассмотрен простейший метод анализа и показана его неработоспособность без существенных доработок. Далее, как альтернатива, предлагается более точный модельно-зависимый метод анализа химического и изотопного состава ядер КЛ, работающий в двумерном пространстве E-dE. Определение энергии ядер КЛ в условиях эксперимента тривиально. Разработан и метод фильтрации событий КЛ на предмет отсутствия сильного взаимодействия падающего ядра с веществом детектора.

В третьей главе описано математическое моделирование эксперимента НУКЛОН-2 с использованием системы Geant4. С использованием упрощенной модели эксперимента получены зависимости эффективности анализа изотопов от толщины детекторов и уровня

шумов электроники. Установлена оптимальная толщина детекторов в 2мм и установлен максимально допустимый шум электроники, эквивалентный энерговыделению в детекторе 5 МэВ. Далее представлено полученное описанным методом анализа разрешение изотопов для различных ядер от неона ( $Z=7$ ) до диспрозия ( $Z=66$ ).

В четвертой главе подробно описан созданный прототип спектрометра тяжелых изотопов космических лучей (СТИКЛ) эксперимента НУКЛОН-2, перечислены пучковые эксперименты, в которых он был испытан и исследован, описана модель для его симуляции, необходимая как для обработки данных, так и для планирования условий проведения эксперимента. Также описан процесс моделирования деградера (устройства для предварительного торможения ядер) для эксперимента, показано, что в неупругом взаимодействии с деградером образуются необходимые изотопы, а остальные осколки ядер легко отфильтровываются, чем обоснована возможность проведения эксперимента.

В пятой главе описан процесс подготовки пучковых данных к финальному анализу. Автор использует для калибровки данные электронной калибровки, проведенной при помощи генератора импульсов, для привязки зарядовых единиц к единицам энерговыделения в эВ используется модельно-зависимая калибровка по релятивистским сверхтяжелым ядрам до свинца.

В шестой главе описаны результаты анализа пучковых данных для пучковых тестов с изотопами аргона ( $Z=18$ ) и ксенона ( $Z=54$ ). Показано очень хорошее зарядовое разрешение для ядер с  $Z=13-18$ , изотопное разрешение для ядер аргона составило 0.28 массовых единиц. Для достижения полученного результата автором была применена калибровка модельных данных по экспериментальным путем домножения всех энерговыделений в детекторах на постоянный фактор. Для ксенона эта простая методика уже не работает, поскольку количественная разница между моделированием и экспериментом слишком велика. В качестве альтернативы автор описывает разработанную им модельно-независимую методику, основанную на аппроксимации экспериментальных данных кривой Бете-Блоха с эмпирическими поправками. Метод был проверен на модельных данных. Экспериментальное численное значение изотопного разрешения для ксенона не дано, поскольку недостаток статистики пучкового эксперимента не позволяет его определить. Наличие изотопного разрешения «через один» для модельно-независимой методики продемонстрировано в моделировании. Чисто качественно, экспериментальные данные соответствуют моделированию, на основании чего можно сделать предварительный вывод, что разрешение изотопов через один действительно реализуется в пучковом эксперименте, однако отмечается существенный недостаток статистики для получения окончательных заключений. Сформулированы общие выводы: эксперимент качественно соответствует моделированию; настоятельно требуется дополнительная калибровка и проверка методик анализа в пучковых тестах с большей статистикой и большим количеством различных ядер. Для решения проблемы недостатка экспериментальных данных предложено использовать ресурсы проекта ДЧС-NICA.

В седьмой, последней главе работы, описан проект ДЧС-NICA для изучения радиационного воздействия на электронику и проведено моделирование соответствующего эксперимента. Показана работоспособность проекта как в режиме ядерной томографии, так и режиме определения линейной передачи энергии (ЛПЭ), определена точность определения энерговыделения, влияние паразитных процессов фрагментации на работу установки и пространственное разрешение. Разработана и

испытана в пучковом эксперименте методика пространственной юстировки системы стриповых детекторах, которая будет использована и в проекте НУКЛОН-2. Для эксперимента НУКЛОН-2 имеет большое значение то, что продемонстрирована возможность использования ресурсов проекта ДЧС-НІСА как в основных режимах работы установки (изучение радиационной стойкости микросхем), так и при работе установок прототипа СТИКЛ и ДЧС-НІСА в параллельном режиме при продольном разделении пучка.

В заключении автор подводит итоги работы, подчеркивает недостаток экспериментальных данных отмечает возможность решения проблем в рамках проекта ДЧС-НІСА, возможность чего подтверждает проведенное моделирование. Результаты работы были использованы при написании эскизного проекта НУКЛОН-2 и ДЧС-НІСА.

Диссертационная работа Курганова А.А. на тему «Методика регистрации сверхтяжелых ядер многоканальными системами кремниевых детекторов» является законченным научным трудом, в котором получены важные результаты для современной теоретической астрофизики и для физики космических лучей

В процессе работы над диссертацией Курганов А.А. зарекомендовал себя высококвалифицированным исследователем, обладающим навыками, необходимыми, как для экспериментальных так и теоретических исследований.

Считаю, что представленная к защите диссертация удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным в МГУ. **Рекомендую диссертацию Курганова А. А. к защите.**

Научный руководитель:  
д.ф.-м.н. Панов Александр Дмитриевич

«12» октября 2023 года.