

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Курганов Александр Андреевич

**Методика регистрации сверхтяжелых ядер многоканальными
системами кремниевых детекторов**

Специальность 1.3.15 - Физика атомных ядер и элементарных частиц,
физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Отделе космических наук Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: Панов Александр Дмитриевич,
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: Яшин Игорь Иванович,
доктор физико-математических наук,
ФГАОУ ВО Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», профессор

Мухамедшин Рауф Адгамович,
доктор физико-математических наук,
ФГБУ «Институт ядерных исследований РАН»,
заведующий лабораторией

Смирнова Лидия Николаева,
доктор физико-математических наук, профессор,
МГУ имени М.В.Ломоносова, физический
факультет, профессор

Защита диссертации состоится «1» марта 2024 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета МГУ.013.2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: Россия, 119991 Москва, Ленинские горы, д. 1, строение 5 (19-й корпус НИИЯФ МГУ), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале:
<https://dissovet.msu.ru/dissertation/013.2/2792>

Автореферат разослан «___» _____ 2024г.

Телефон диссертационного совета для справок: +7 916 8717750
E-mail (диссертационного совета): galan_lidiya@mail.ru

Ученый секретарь диссертационного совета МГУ.013.2
кандидат физ.-мат. наук



Галанина Л.И.

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень ее развитости

Впервые явление космических лучей (КЛ) – разреженного релятивистского газа стабильных частиц и ядер атомов в космосе, ускоренных до высоких энергий различными процессами во вселенной, было отмечено в начале XX века английским физиком Ч.Вильсоном. Отправной точкой подробного изучения данного явления можно считать эксперименты В.Гесса в 1912 году. С тех пор во многих экспериментах изучались энергетический спектр, химический и изотопный составы, а также угловое распределение частиц КЛ и эксперименты продолжаются до сих пор. Отдельно стоит отметить интерес к химическому и изотопному составу сверхтяжелых ядер КЛ.

Сверхтяжелые ($Z > 26$) и тяжелые ядра КЛ образуются различными путями. Тяжелые ядра образуются преимущественно в недрах звезд путем ядерного синтеза, осуществляемого за счет высоких температур и давления, достаточных для преодоления кулоновского отталкивания. Сверхтяжелые ядра КЛ образуются в основном через процесс нейтронного захвата (r - и s - процессы нуклеосинтеза). Эти процессы имеют существенно иную физику и происходят не в недрах звезд, а в ходе взрыва сверхновых и слияния нейтронных звезд. Тем самым, изучение сверхтяжелых ядер КЛ не только проливает свет на процессы их нуклеосинтеза, но и предоставляет важную информацию о физике взрывов сверхновых, слиянии нейтронных звезд, а также может дать ценную информацию о физике r - и s - процессов.

В некоторых современных моделях предполагается, что взрывы сверхновых часто происходят не одиночно, а в тесных ОВ-ассоциациях. В данных условиях порождаются аномалии в изотопном и химическом составе ядер КЛ, подробное изучение которых позволит исследовать данный процесс и среду, в которой происходит ускорение. Кроме того, в таких коллективных взрывах могут становиться более эффективными нестандартные механизмы ускорения КЛ, изучение которых важно для современной физики.

Важно отметить, что среди изотопов сверхтяжелых ядер КЛ имеется несколько удобных радиоизотопных часов. С их помощью можно установить возраст космических лучей, а при помощи ядер, распад которых происходит через процесс e -захвата, можно определить время, проведенное частицами КЛ до момента существенного ускорения.

Также, ядерная длина взаимодействия сверхтяжелых ядер КЛ меньше, чем у тяжелых ядер. Это означает, что их распространенность чувствительна к локальному окружению Солнца (в пределах 1 кпс). Изучение локального окружения Солнца важно для таких задач, как описание распространения лептонной компоненты КЛ.

Для более полного изучения перечисленных проблем предложен космический эксперимент НУКЛОН-2, основным регистрирующим прибором которого должен стать одноименный спектрометр тяжелых и сверхтяжелых ядер КЛ - НУКЛОН-2. Рассмотрению вопросов оптимизации его конструкции и методик анализа его данных посвящена первая часть представленной работы.

С другой стороны, изучение физики сверхтяжелых ядер важно не только для астрофизики, но и в прикладных целях. Так, например, большой интерес представляет изучение особенностей их взаимодействия с электроникой в рамках исследований радиационной стойкости интегральных микросхем (ИМС), в особенности, предназначенных для установки на космические аппараты. Несмотря на низкий вклад в общую дозовую нагрузку тяжелых и сверхтяжелых ядер КЛ, случайное попадание такой частицы в ИМС может привести к существенной нестабильности или полному выходу из строя компонента электроники. На сегодняшний момент эта проблема весьма актуальна и требуются дополнительные экспериментальные данные, которые, в частности, предполагается получить в ходе работ с детекторной частью станции для облучения

микросхем в ускорительном комплексе NICA (ДЧС-NICA) в ОИЯИ. Вопросы оптимизации конструкции этого прибора и методик анализа его данных также рассмотрены в представленной работе.

В целом, перечисленные астрофизические и прикладные научные задачи показывают необходимость разработки методик регистрации и исследования сверхтяжелых ядер, что определяет **актуальность данной работы.**

Объект и предмет исследования

Объектами данного исследования являются спектрометр НУКЛОН-2 (и его прототип), спектрометр ДЧС-NICA, а также математические алгоритмы обработки данных с этих приборов.

Предмет исследования — изучение в разработанных моделях и в пучковых экспериментах основных физических характеристик указанных спектрометров и методик анализа их данных.

Цели и задачи исследования

Целью исследования является разработка методик регистрации тяжелых и сверхтяжелых ядер в космических и наземных экспериментах для спектрометров на основе многослойных тонких кремниевых детекторов. Задачи исследования, следующие:

1. Разработка математической модели спектрометра НУКЛОН-2, предназначенного для изучения зарядового и изотопного состава тяжелых и сверхтяжелых ядер космических лучей, и представляющего собой ионизационный калориметр полного поглощения из большого числа одинаковых слоев кремниевых детекторов;
2. Разработка модельно-зависимой и модельно-независимой методик обработки данных спектрометра НУКЛОН-2 для разделения регистрируемых ядер по заряду и массе;
3. Проведение оптимизации конструкции этого спектрометра на основе созданной модели и методик обработки данных с целью повышения зарядового и массового (изотопного) разрешения прибора при регистрации тяжелых и сверхтяжелых ядер.
4. Определение, с применением предложенных методик обработки, зарядового и массового разрешения прототипа спектрометра НУКЛОН-2 при регистрации различных ядер в экспериментах на пучках ускорителя;
5. Разработка математической модели спектрометра ДЧС-NICA, предназначенного для определения заряда, массы и точки попадания ядер пучка ускорителя в образцы ИМС.
6. Разработка методики определения взаиморасположения координатных кремниевых детекторов в созданной аппаратуре ДЧС-NICA по данным регистрации в ней пролетных ядер (без остановки в объеме микросхемы), которая позволит реализовать оптимальное координатное разрешение созданного прибора (т.н. методика юстировки).
7. Разработка методики определения расположения конструктивных элементов ИМС по данным регистрации в аппаратуре ДЧС-NICA пролетных ядер, которая позволит определять точку попадания ядер ускорителя в исследуемую ИМС без вскрытия корпуса (т.н. методика ядерной «томографии»).
8. Проверка работоспособности разработанной методики юстировки на экспериментальных данных, полученных в ходе первых испытаний ДЧС-NICA на пучках ядер.

Научная новизна

В работе представлены результаты разработки и испытаний новой аппаратуры: спектрометров НУКЛОН-2 и ДЧС-NICA, а также новые, созданные для этих приборов методики работы и анализа данных. В том числе:

- Для новых спектрометров НУКЛОН-2 и ДЧС-NICA были разработаны математические модели, которые позволили оптимизировать их конструкции;
- Для анализа данных спектрометра НУКЛОН-2 предложен модельно-зависимый метод определения массового состава регистрируемых ядер, который имеет много новых деталей по сравнению с использованными ранее методами этого типа и позволяет работать со сверхтяжелыми ядрами;
- Также, для анализа данных спектрометра НУКЛОН-2 предложен новый, не имеющий аналогов модельно-независимый метод анализа массового состава сверхтяжелых ядер;
- Для работы с аппаратурой ДЧС-NICA предложен новый метод юстировки положения координатных детекторов в составе аппаратуры;
- Также для работы с ДЧС-NICA предложен новый, полностью оригинальный метод ядерной «томографии».

Методология исследования

Методология данной работы основана на математическом Монте-Карло моделировании аппаратуры и условий её работы в экспериментах НУКЛОН-2 и ДЧС-NICA. Моделирование выполнено в пакете CERN Geant4. Алгоритмы анализа созданы с использованием пакета CERN ROOT с опорой на математическое моделирование. Прототип спектрометра НУКЛОН-2 и аппаратура спектрометра ДЧС-NICA испытаны на пучках ядер ускорителей в Дубне и CERN.

Положения, выносимые на защиту

Для спектрометра НУКЛОН-2:

1. По результатам моделирования, для конструкции прибора, состоящего из одинаковых слоев кремниевых детекторов, изотопное разрешение для тяжелых и сверхтяжелых ядер достигает оптимума при толщине одного слоя кремниевого детектора ~ 2 миллиметров (для максимально допустимого шума электроники – 5 МэВ).
2. Согласно результатам работы созданных методик обработки данных, модельное изотопное разрешение для ядер от неона до диспрозия в оптимальной конструкции прибора составляет от 0.24 до 1.6 атомных единиц массы (а.е.м.).
3. Массовое разрешение в результатах обработки экспериментальных данных, полученных на пучке ядер аргона с прототипом спектрометра НУКЛОН-2 и предложенными методиками обработки, составило 0.28 а.е.м.

Для аппаратуры ДЧС-NICA :

4. По результатам моделирования ожидаемая ошибка измерения ЛПЭ в тестируемых микросхемах не превышает 7% с учетом эффектов многократного рассеяния ядер-снарядов в материале детекторов спектрометра.
5. Конструктивные сдвиги и повороты координатных детекторов в аппаратуре ДЧС-NICA компенсируются при применении предложенной методики юстировки, с ожидаемыми ошибками не превышающими 0.04 мм и 0.2 микрорадиан соответственно.
6. Созданная методика ядерной «томографии» для аппаратуры ДЧС-NICA позволяет определять координаты основных конструктивных

элементов исследуемых ИМС без вскрытия корпуса микросхемы по результатам анализа прохождения пролетных ядер от ускорителя.

Теоретическая и практическая значимость

Разработанные автором методики для анализа данных спектрометра НУКЛОН-2, а также проведенная оптимизация спектрометра позволит получить новые данные по изотопному составу сверхтяжелых ядер, а также улучшить статистику химического состава ядер космических лучей.

Работа автора по созданию методик для работы с аппаратурой ДЧС-НИСА позволит получить больше экспериментальных данных по воздействию высоких ЛПЭ на современные интегральные микросхемы, что, в свою очередь, может способствовать разработке новой радиационно-стойкой элементной базы, в том числе, для использования в космических аппаратах.

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту результаты и положения получены лично автором или при его определяющем участии:

1. Для спектрометра НУКЛОН-2 автором выполнено моделирование его изотопного разрешения с различными толщинами кремниевых слоев.
2. Для спектрометра НУКЛОН-2 автором разработаны модельно-зависимая и модельно-независимая методики обработки данных для анализа изотопного состава регистрируемых ядер.
3. Модельно-зависимая методика обработки данных для спектрометра НУКЛОН-2 применена автором в ходе обработки экспериментальных данных, полученных на пучке ядер аргона с прототипом спектрометра НУКЛОН-2.
4. Для аппаратуры ДЧС-НИСА автором выполнено моделирование точности измерения линейной передачи энергии (ЛПЭ).
5. Для аппаратуры ДЧС-НИСА автором разработана методика юстировки плоскостей детекторов. Работоспособность данной методики проверена автором при её применении к экспериментальным данным, полученным в ходе первых испытаний аппаратуры ДЧС-НИСА на пучках ядер.
6. Также, для аппаратуры ДЧС-НИСА автором разработана т.н. методика ядерной «томографии».

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов, представленных в работе, подтверждалась в ходе пучковых экспериментов с прототипом спектрометра НУКЛОН-2 и с аппаратурой ДЧС-НИСА. В частности:

- в ходе эксперимента с пучком ядер аргона было подтверждено модельное значение изотопного разрешения конструкции спектрометра НУКЛОН-2, а также проверена работоспособность модельно-зависимой методики анализа данных;
- в ходе эксперимента с пучком ядер ксенона была подтверждена работоспособность модельно-независимой методики обработки данных;
- в ходе испытаний аппаратуры ДЧС-НИСА на пучке ядер ксенона подтверждена работоспособность предложенной методики юстировки на пролетных ядрах.

Апробация работы

Материалы диссертации были доложены на международной и нескольких российских конференциях, в том числе:

- 35th International Cosmic Ray Conference, Busan, Корея, Республика, 12-20 июля 2017;
- 26th Extended European Cosmic Ray Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference, Барнаул/Белокуриха, Россия, 6-19 июля 2018;
- Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности, г.Казань, Россия, 30 июня - 30 сентября 2020;
- IX ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЭКБ-2020», город Москва, Россия, 10-11 сентября 2020;
- 36-я Всероссийская конференция по космическим лучам, НИИЯФ МГУ, Россия, 28 сентября - 2 октября 2020.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 статьях в рецензируемых журналах, индексируемых в базах Web of Science и SCOPUS:

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 7 глав и заключения, содержит 85 страниц, 66 иллюстраций, 3 таблицы и 42 библиографические ссылки.

Во введении даны обоснование актуальности проблемы, представлены цели работы, показана новизна и практическая ценность диссертации, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе кратко приведена история физики космических лучей, рассмотрены структура и особенности спектра космических лучей. Далее вводится проблематика изучения изотопного состава тяжелых и сверхтяжелых ядер КЛ, и показана актуальность и практическая ценность данных исследований.

В разделе 1.4 приводится обзор существующих данных по изотопному и зарядовому спектру тяжелых и сверхтяжелых ядер космических лучей. Приведены результаты экспериментов LDEF, HEAO-3-C3, SuperTIGER, CRIS, упоминаются Ulisses и ISEE 3. Из данного обзора делается вывод, что химический состав ядер КЛ для $Z > 40$ измерен с недостаточной статистикой, а изотопный состав измерялся лишь для $Z < 33$, поэтому изотопный состав, для ядер начиная с $Z=33$, является полностью не исследованной областью. Следовательно, измерение химического и изотопного состава для более высоких Z крайне актуально. Для решения поставленных задач предлагается эксперимент НУКЛОН-2.

НУКЛОН-2 – это предлагаемый спутниковый эксперимент по прямому изучению химического и изотопного состава космических лучей при сравнительно низких энергиях (от 0.1 до 1-3 ГэВ в зависимости от Z), основными задачами которого являются определение химического состава галактических КЛ вплоть до границы стабильных ядер и исследование изотопного состава КЛ за пиком железа.

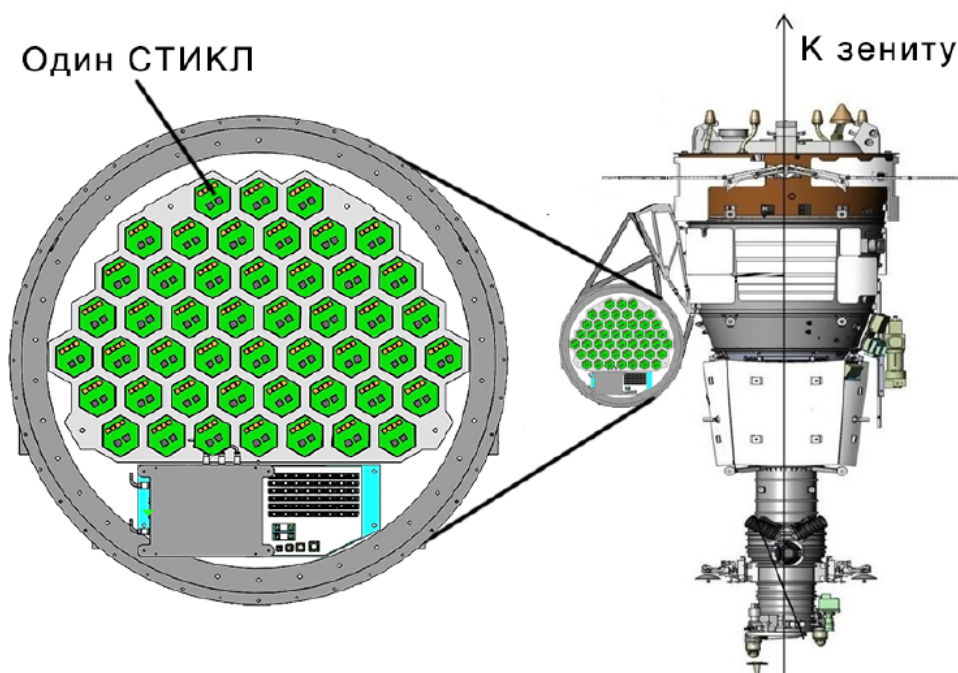


Рисунок 1. Общий вид эксперимента НУКЛОН-2.

Научная аппаратура эксперимента НУКЛОН-2 (рис.1) состоит из 48 идентичных модулей СТИКЛ (спектрометр тяжелых изотопов космических лучей), каждый из которых представляет собой стопку 40 плоских кремниевых детекторов, из которых 8 – трековые, а остальные 32 – калориметрические детекторы толщиной в 2 мм. Каждый детектор при этом представляет собой правильный шестиугольник с внутренним диаметром в 122 миллиметра. Полная высота одного СТИКЛ составляет 242 миллиметра, а его внешний диаметр с учетом электроники – 168 миллиметров. Методика исследования основана на измерении кривой ионизационных потерь частицы вплоть до ее остановки в детекторе и является модификацией классической методики E-dE. Обоснованию оптимальности указанных параметров конструкции аппаратуры НУКЛОН-2 посвящена 3 глава диссертации.

Также в первой главе приведена ожидаемая статистика эксперимента за 5 лет набора данных для зарядов Z от 24 до 92 включительно.

Во второй главе рассмотрены основные задачи, поставленные перед моделированием и анализом данных аппаратуры НУКЛОН-2, а также предложена модельно-зависимая методика анализа данных.

Основные задачи разработки:

- оптимизация толщины детекторов СТИКЛ;
- вычисление допустимого уровня шумов электроники;
- определение модельного и экспериментального разрешений по Z и A ;
- моделирование условий пучковых экспериментов и определение возможности их проведения.

Сначала в главе рассмотрен «прямой подход» через приближенное выражение

$$E \frac{dE}{dx} \approx MZ^2(\ln E + const.)$$

Показано, что такой подход позволяет получить на низких Z зарядовое, но не изотопное разрешение. Есть два пути решения данной проблемы: либо необходимо использовать более точное выражение с эмпирическими поправками (этот метод рассматривается в гл. 6), либо можно сравнивать экспериментальные кривые ионизационных потерь частиц с полученными в моделировании.

В данной главе рассматривается второй путь, и приведена методика сравнения экспериментальных и модельных кривых ионизационных потерь в двумерном пространстве $E-dE$. Методика заключается в построении кусочно-линейных аппроксимаций кривых ионизационных потерь и их ширин для различных изотопов ядер, а затем в вычислении вероятности принадлежности экспериментальной кривой к каждой из гипотез.

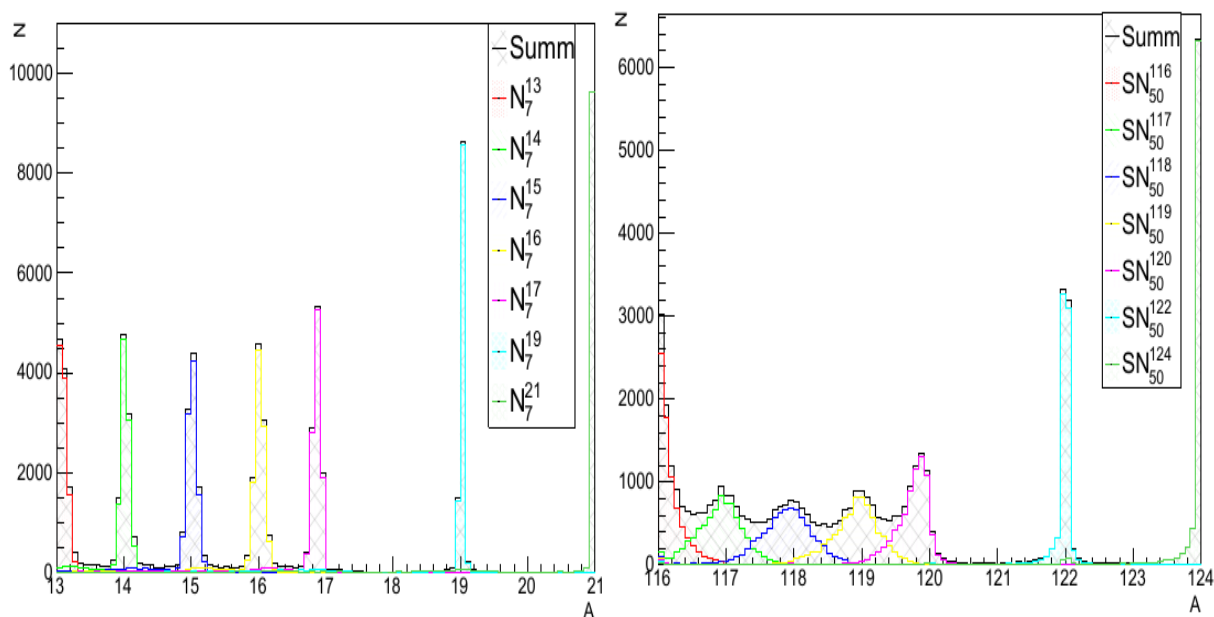


Рисунок 2. Изотопное разрешение для неона (слева) и диспрозия (справа)

В третьей главе описывается математическая модель, созданная с использованием системы Geant4 для оптимизации конструкции матрицы модулей СТИКЛ аппаратуры НУКЛОН-2. Модель позволяет быстро, без перерасчета менять толщину детекторов и сравнивать изотопное разрешение при различных условиях. По результатам работы с моделью, используя методики обработки модельных данных из гл.2, получена зависимость изотопного разрешения для различной толщины кремниевых слоев. Сделан вывод, что в представленной конструкции прибора изотопное разрешение для тяжелых и сверхтяжелых ядер достигает оптимума при толщине одного слоя кремниевого детектора ~ 2 миллиметров. Также, из моделирования работы спектрометра с различным уровнем шумов электроники считывания слоев детекторов, сделан вывод, что уровень допустимого шума электроники в терминах энерговыделения не должен превышать 5 МэВ (реальный ожидаемый шум электроники существенно ниже этой величины). Также приведены (рис.2) полученные в этом моделировании с использованием найденной оптимальной конструкции детекторов и методики обработки из гл.2 результаты разделения изотопов ядер различных зарядов от $Z=7$ (Ne) до $Z=66$ (Dy). Изотопное разрешение в терминах полной ширины пиков на середине высоты (FWHM) составляет от 0.24 до 1.6 атомной единицы массы (а.е.м). Показано, что разрешение соседних изотопов сохраняется до $Z \sim 50$, для больших зарядов изотопное разрешение возможно, если расстояние между соседними изотопами превышает 1 а.е.м.

В четвертой главе описан созданный прототип одного модуля матричного спектрометра аппаратуры НУКЛОН-2. Прототип состоит из 31 кремниевого детектора, из которых 13 последних (по направлению пролета частиц) имеют толщину 1 мм, а первые по пучку 18 детекторов толщиной 675 мкм (рис.3). Каждый детектор снабжен зарядочувствительным усилителем (ЗЧУ) и схемой устройства выборки-хранения аналогового сигнала (УВХ), напряжение с которых считывается многоканальным АЦП.

Отметим, что при создании прототипа использовались детекторы, имеющиеся в распоряжении разработчиков, т.ч. их толщина не совпала оптимальной величиной, полученной в моделировании. Однако, реализованная конструкция прототипа была специально проработана в моделировании, что позволяет соотносить экспериментальные данные с прототипа с результатами моделирования.

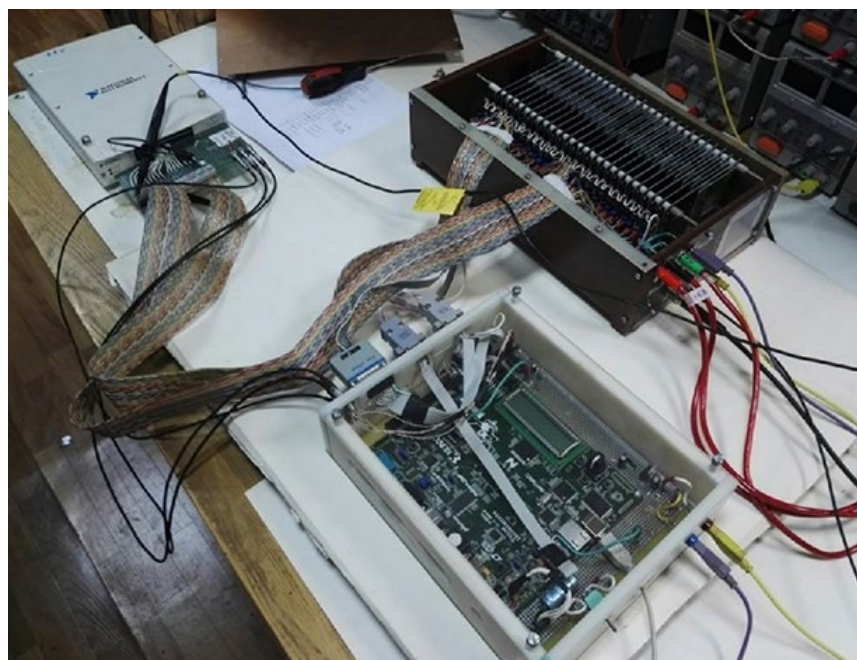
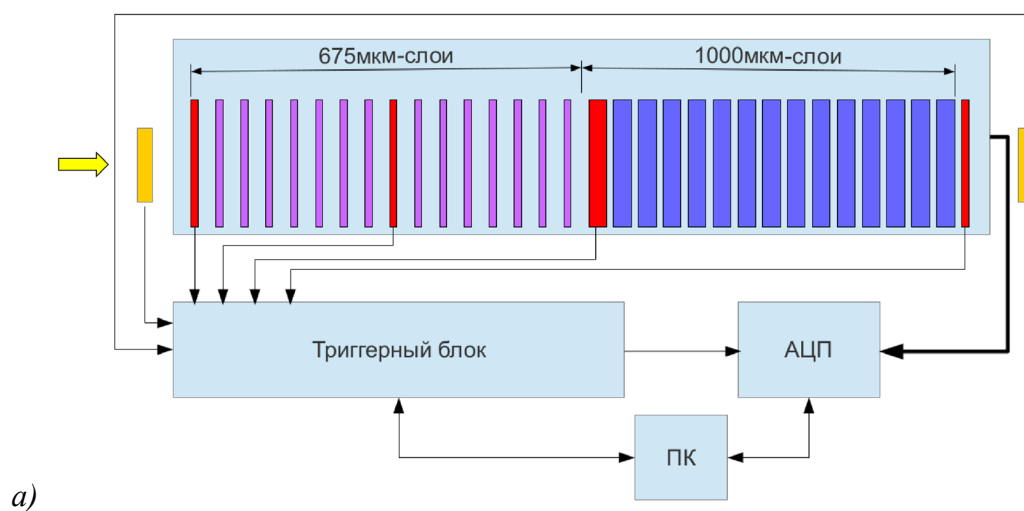


Рисунок 3. Схема (а) и фотография (б) прототипа модуля спектрометра НУКЛОН-2.

Запуск считывания данных из УВХ (т.н. сигнал триггера) формируется при помощи программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) и позволяет настроить аппаратуру на регистрацию как пролетных, так и останавливающихся в калориметре частиц.

Далее в главе описана реализация модели прототипа в системе Geant4, используемая далее и для обработки данных.

Приведена также методика вычисления оптимальной толщины деградера (пластины перед входом в спектрометр, используемой для снижения энергии ядер на входе спектрометра), и результаты моделирования мишени (AZ-диаграммы). Показано, что использование деградера позволяет проводить эксперименты по полной остановке ядер в слоях прототипа с энергиями пучков, существенно превышающими энергию полного поглощения для конструкции прототипа, что значительно расширяет возможности проведения ускорительных экспериментов.

Аппаратура была протестирована в следующих пучковых экспериментах:

- CERN SPS – Пучок фрагментированного Pb с энергией 150 ГэВ/нуклон, частицы пролетные. Результаты эксперимента использовались для калибровки аппаратуры.
- CERN SPS, изотопы Xe с энергией 13 ГэВ/нуклон. Для снижения энергии устанавливался свинцовый деградер толщиной 329мм.
- НУКЛОТРОН, ОИЯИ, изотопы Ar с энергией 3.5 ГэВ/нуклон, со свинцовым деградером толщиной 214мм.

Пятая глава посвящена предварительной обработке данных. В ходе обработки сначала проводится предварительная калибровка детекторов с учетом их электронной калибровки: перевод амплитуд сигналов с детекторов из величины напряжения, измеренного на АЦП, в единицы ионизационного заряда, выделенного частицей в детекторе в процессе ионизации. Здесь предварительность этой калибровки связана с тремя основными моментами:

- предполагается, что передаточная характеристика электронного тракта "ЗЧУ-УВХ-АЦП" линейна;
- считается, что емкости калибровочных конденсаторов, используемых в электронной калибровке, известны с абсолютной точностью;
- считается, что толщины всех детекторов известны с абсолютной точностью.

Для уточнения калибровки используются данные по регистрации широкого диапазона релятивистских (пролетных) ядер. Эти данные получены в специальном калибровочном наборе статистики с тяжелыми релятивистскими ядрами, при этом пролетные ядра с различными зарядами Z_i формируются в процессах фрагментации первичных тяжелых ядер в толщине деградера,

По полученным данным строится зарядовое распределение пролетных ядер - продуктов фрагментации (Z-распределения). При построении зарядового распределения используется тот факт, что ионизационные потери заряженной частицы в веществе (Q_i) пропорциональны квадрату её заряда: $Q_i \sim Z_i^2$. Перечисленные выше малые искажения, присущие предварительной калибровке, не должны существенно исказить эту зависимость. На этом этапе проводится фильтрация экспериментальных событий - события со значительными отклонениями энерговыведения между детекторами выбрасываются. По отфильтрованным данным для каждого датчика строится частотная гистограмма: количество зарегистрированных событий с различными Z_i в зависимости от предварительно восстановленного Q_i . Данная гистограмма представляет собой набор пиков, положение максимума каждого пика - $\max Q_i$, отвечает одному из зарегистрированных ядер фрагментации Z_i . Далее, для каждого датчика производится

сравнение положений экспериментальных пиков $\max Q_i$ с ожидаемым модельным средним энергосодержанием (ΔE_i) каждого из ядер Z_i . Данная зависимость близка к прямолинейной, но отличается, за счет указанных выше нюансов предварительной электронной калибровки. Учет этих нюансов важен для решения дальнейших задач разделения изотопов ядер, для чего зависимость экспериментальных предварительных $\max Q_i$ от модельных средних ΔE_i аппроксимируется полиномом 3й степени с фиксированной точкой (0, 0). Вся процедура позволяет в целом эффективно учесть нелинейность передаточных характеристик усилительных трактов, разнотолщинность детекторов прототипа и разную величину конденсаторов, используемых для электронной калибровки. Пример результирующего экспериментального Z-распределения ядер-фрагментов для исходного пучка релятивистских ядер ксенона после уточнённой калибровки показан на рис.4. Отметим, однако, что в представленной процедуре учет нелинейности передаточной характеристики компенсируется только в пределах измеренного диапазона Q_i , т.е. определяется шириной диапазона зарядов Z_i фрагментационных ядер. Как показано далее в гл.6, это обстоятельство оказывается одним из определяющих при применении данной методики для регистрации ядер ксенона.

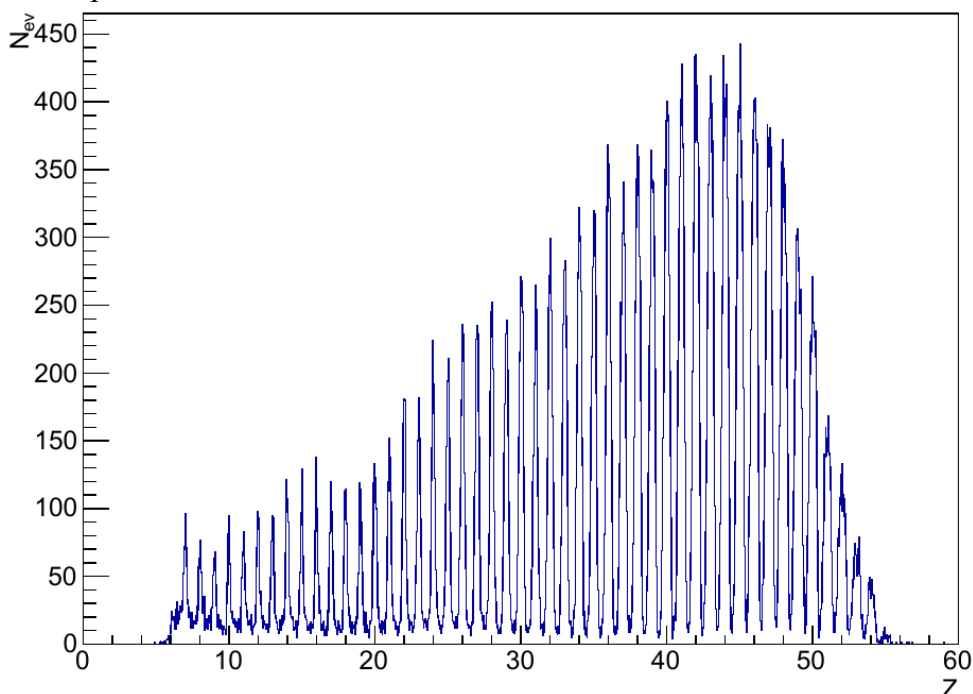


Рисунок 4. Зарядовое разрешение после процедуры калибровки.

В шестой главе рассматривается анализ данных пучковых экспериментов. В начале главы приведены результаты обработки банка экспериментальных данных с пучка изотопов Ar модельно-зависимой методикой, описанной ранее в главе 2. Итоговое изотопное разрешение для Ar составляет 0.28 массовых единиц (рис. 5 справа). Зарядовое разрешение для ядер близких к аргону ($Z=13\div 18$) показано на рис. 5 слева. Полученный результат хорошо соотносится с результатами моделирования изотопного разрешения из гл.3 для толщины датчиков 1мм.

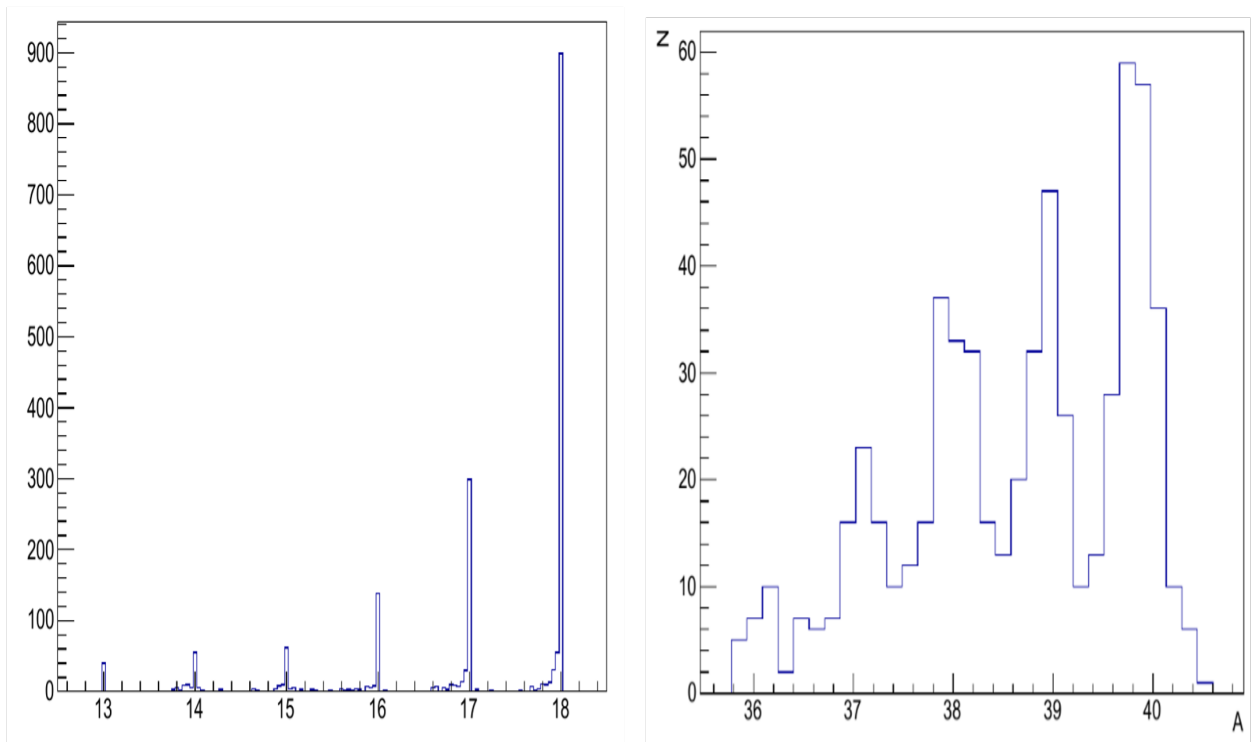


Рисунок 5. Зарядовое разрешение для $Z = 13-18$ (слева) и изотопное разрешение для изотопов Ar (справа)

Изотопы ксенона не удалось разделить модельно-зависимой методикой – различия форм кривых ионизационных потерь в моделировании и эксперименте слишком большие, что приводит к некорректности, и, более того, неработоспособности модельно-зависимой методики. Ситуацию усугубляет также то, что для высоких Z проблематична точная калибровка детекторов и для энерговыделения ксенона в пике Брэгга требуется экстраполяция экспериментальных калибровочных зависимостей гл.5, что существенно снижает точность калибровки.

В связи с обнаруженной проблемой применимости модельно-зависимой методики обработки к экспериментальным данным по тяжелым ядрам (ксенона) в средней части главы 6 (раздел 6.2) предлагается альтернативная модельно-независимая методика анализа данных. Идея модельно-независимой методики заключается в следующем:

Тормозные кривые частиц зависят только от их A и Z . Поэтому, аппроксимируя их семейством двухпараметрических кривых, параметры данных функций p и q должны находиться во взаимно-однозначном соответствии с параметрами A и Z событий, возможно, с внутренней корреляцией между параметрами; при этом параметры p и q не обязательно имеют простой физический смысл. Логичным выбором семейства кривых является функция Бете-Блоха, однако, явно нужны будут эмпирические поправки, поскольку помимо ионизационных процессов на тормозные кривые влияют и другие, такие, как, например, перезарядка ядра. Далее в работе используется функция Бете-Блоха, но с параметрами Z_{fit} и A_{fi} , которые зависят от A и Z , но в данном контексте уже не имеют исходного простого физического смысла, так как сама функция лишь приблизительно представляют экспериментальные данные. Таким образом, используемый аппроксимирующий функционал имеет вид:

$$\frac{dE}{dx}(Z_{fit}, A_{fit}, E) = \frac{Z_{fit}^2}{\beta^2} \left\{ \ln \left[\frac{2m_e c^2}{I} \beta^2 \right] - \ln[1 - \beta^2] - \beta^2 \right\},$$

где

$$Z_{fit}^2 = \frac{4\pi n_e Z^2 e^4}{m_e c^2}; \quad \beta^2(E, A_{fit}) = \frac{(1 + E/A_{fit})^2 - 1}{(1 + E/A_{fit})^2} = \frac{v^2}{c^2}$$

Здесь m_e – масса электрона, I – эффективный ионизационный потенциал вещества детектора, e – заряд электрона, n_e – концентрация электронов вещества детектора, v и c – скорости ядра и света. Данная функция разумно описывает тормозные кривые, однако, некоторые систематические отклонения все-таки имеются. На рис. 6 показан результат для одного события: слева и справа экспериментальные точки лежат чуть ниже фита, в середине – чуть выше, и эта тенденция сохраняется в среднем для всех событий.

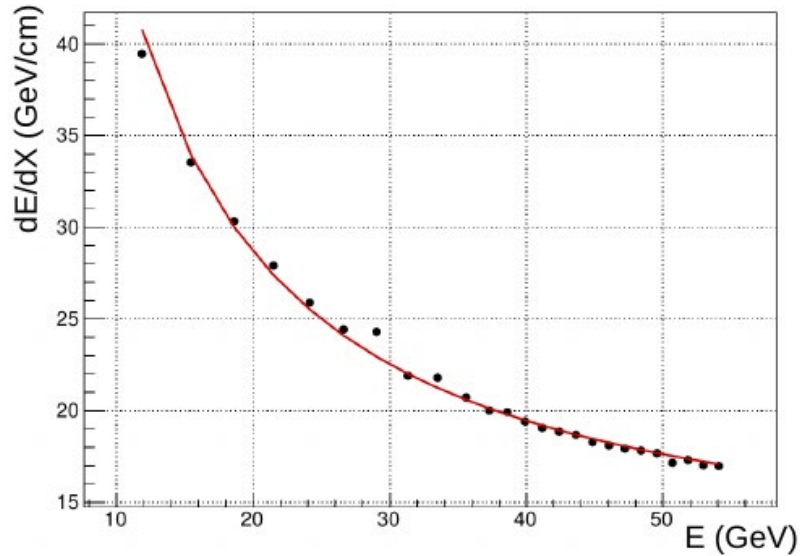


Рисунок 6. Результат аппроксимации события.

На рис. 7 показано как располагаются параметры фитов Z_{fit} и A_{fit} для модельных событий регистрации ядер $Z=18$ (аргон), $Z=17$ и $Z=16$ в прототипе спектрометра НУКЛОН-2. Видны три отдельные зарядовые структуры, в каждой из которых выделяется тонкая структура – пять линий, каждая из которых соответствует своему изотопу. Эти кривые как раз и отражают упомянутое неполное соответствие кривых Бете-Блоха реальному (и модельному) энерговыделению ядер в веществе. В случае полного соответствия вместо трех групп сравнительно узких параллельных полос наблюдались бы просто отдельные 15 точек, по 5 точек (по количеству моделируемых изотопов) для каждого Z . На рис. 8 показана аналогичная картина для ксенона (слева), полученная экспериментально в пучковом тесте. Видны отдельные зарядовые группы, однако изотопные группы на глаз не различимы (разрешение, согласно проведенному ранее моделированию, должно быть заметно хуже, чем у аргона).

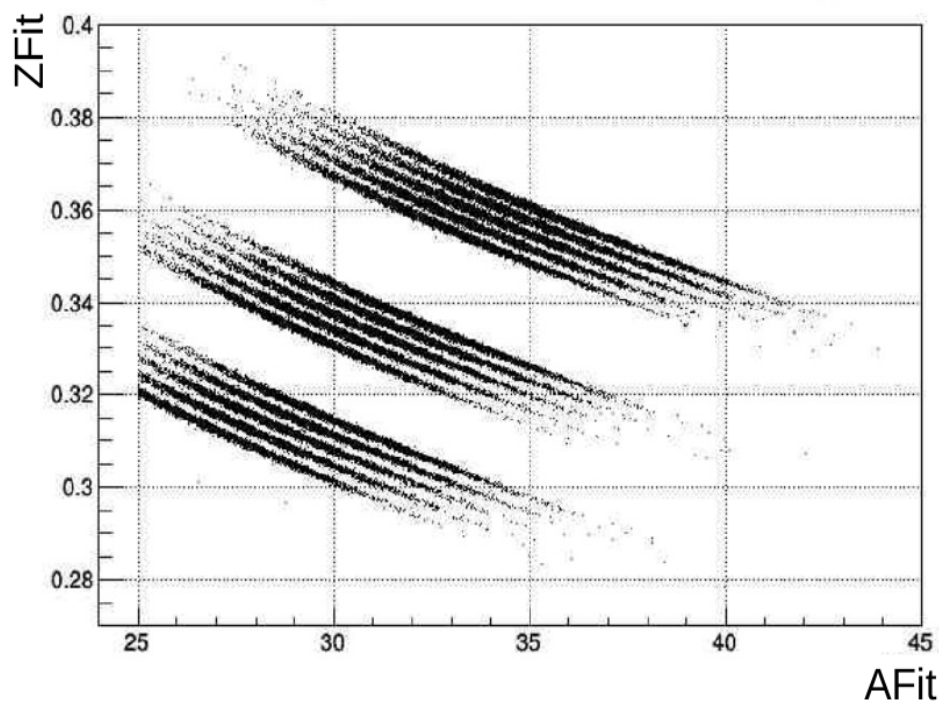


Рисунок 7. События в пространстве Z_{fit} , A_{fit} для аргона (верхняя группа линий) и ядер $Z=17$, $Z=16$ (средняя и нижняя группы линий соответственно).

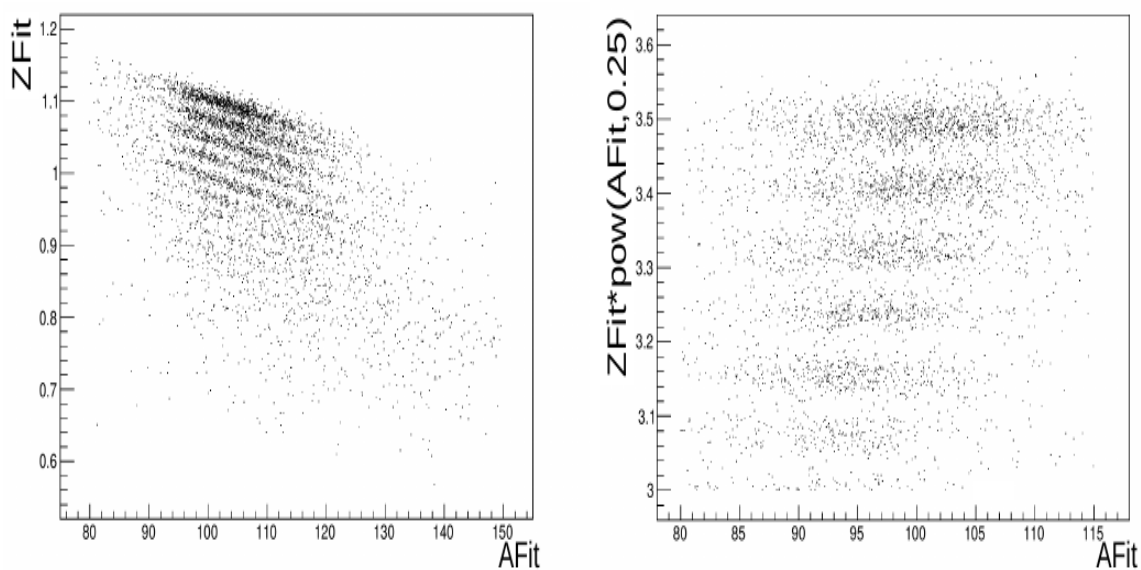


Рисунок 8. Экспериментальные события ксенона в пространстве Z_{fit} , A_{fit} до и после преобразования координат.

Для разрешения изотопов было бы удобно, если бы зарядовые группы были строго горизонтальны. Форма зарядовых групп близка к степенным функциям $Z_{fit}(A_{fit})$, и, действительно, преобразование

$$Z_{fit} \rightarrow Z_{fit}(A_{fit})^{0.25}$$

их выправляет (рис. 8 справа). Необходимое зарядовое облако тогда легко выделить по величине параметра в преобразованном пространстве.

Для улучшения изотопного разрешения далее вводились эмпирические поправки в функцию Бете-Блоха в виде

$$\left. \frac{dE}{dx} \right|_{exp} (E) = [1 + \alpha(E)] \frac{dE}{dx} (Z_{Fit}, A_{Fit}, E).$$

Здесь $\alpha(E)$ – корректирующий коэффициент. Коэффициент коррекции определяется путем сравнения экспериментальных кривых торможения и оптимальной аппроксимации этих кривых функциями Бете-Блоха, и представляет собой среднее отклонение экспериментальной кривой от аппроксимации, полученное по всему массиву экспериментальных данных отдельно для каждого Z . По модулю $\alpha(E)$ достигает 6%. После введения такой коррекции весь массив экспериментальных данных заново аппроксимируется семейством таких поправленных кривых, что позволяет улучшить изотопное разрешение в группах ядер, соответствующих отдельным зарядам. На рис. 9 показано изотопное разрешение величины $Z_{fit} \times A_{fit}^{0.25}$ для ксенона, полученное с откорректированными кривыми Бете-Блоха. Наблюдаемые два пика, указывают, что изотопное разрешение имеется, однако, статистика не позволяет оценить его величину количественно.

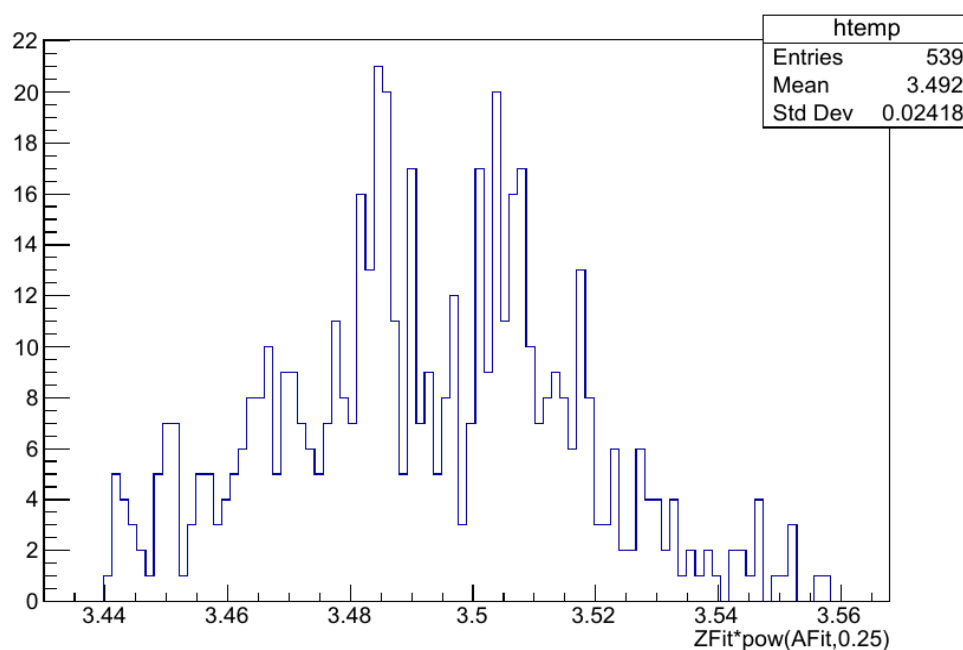


Рисунок 9. Экспериментальное изотопное разрешение для ксенона.

Отметим, что в модельно-независимой методике отсутствует привязка к реальным массовым числам, поэтому на рис.9 трудно сказать, каким массам изотопов соответствуют два наблюдаемых пика. При прохождении деградера, в виде осколков могли возникать, в том числе, экзотические короткоживущие изотопы ксенона, причем в неизвестном количестве. В реальном космическом эксперименте задача такой привязки проще, поскольку в космических лучах могут присутствовать только стабильные и долгоживущие изотопы.

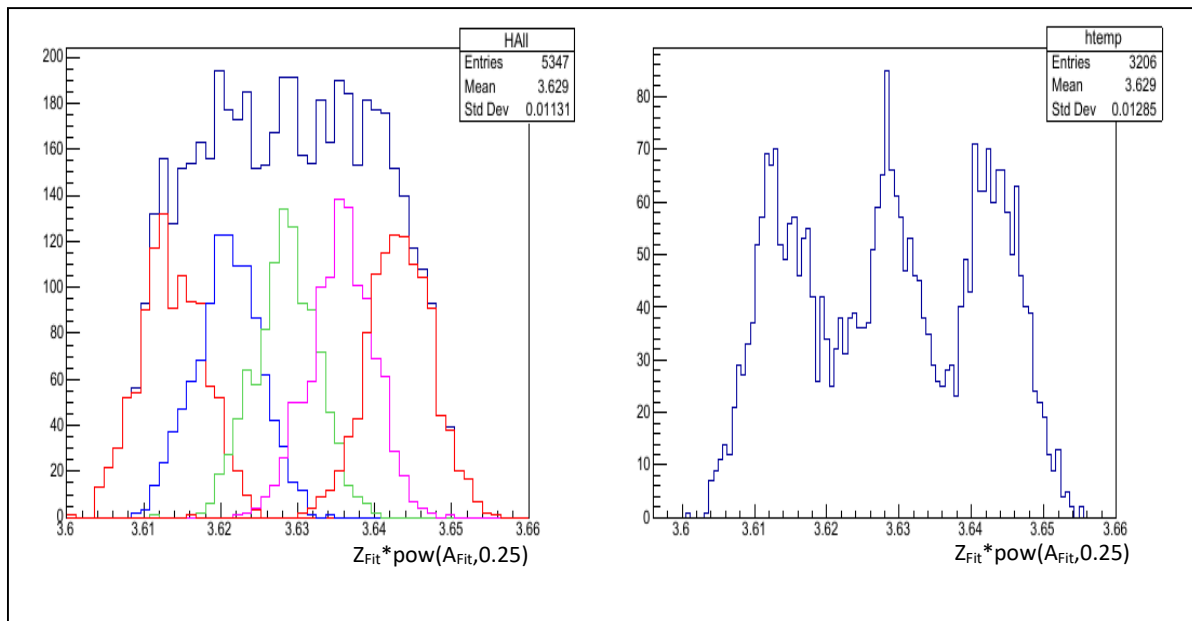


Рисунок 10. Изотопное разрешение в моделировании для ксенона для соседних (слева) и стоящих через один (справа) изотопов.

В разделе 6.3 главы 6 обсуждается изотопное разрешение модельно-независимой методики для изотопов ксенона по результатам моделирования, в этом случае на работу методики не влияет несовершенство экспериментальной аппаратуры и нюансы постановки эксперимента, в частности, можно абстрагироваться от процедуры калибровки аппаратуры.

На рис.10 показаны полученные распределения по параметру $Z_{\text{fit}} \times A_{\text{fit}}^{0.25}$, как для соседних изотопов, так и для стоящих через один. Видно, что в моделировании соседние изотопы ксенона не разрешаются, что соответствует результатам моделирования представленным ранее в главе 3 (для модельно-зависимой методики). Однако, модельно-независимая методика должна уверенно разделять изотопы, расстояние между которыми больше 1 а.е.м. В этой связи можно отметить, что картина, возникающая в эксперименте (Рис. 10), похожа на картину для изотопов "через один" в моделировании (Рис. 11, правая панель).

В заключении 6-ой главы (раздел 6.4) приведены основные выводы из обработки эксперимента НУКЛОН-2:

- требуется более глубокая проверка работоспособности модельно-независимого метода и его калибровка на более обширной экспериментальной статистике.
- полученные результаты дают указание на работоспособность модельно-независимой методики, но имеющаяся статистика не дает возможности делать надёжные количественные выводы;
- требуется проведение эксперимента на изотопах большего количества ядер различных зарядов.

Указанный недостаток статистики экспериментальных данных планируется решить в рамках проекта ДЧС-NICA, рассмотрению которого посвящена 7я глава работы.

Глава 7 посвящена проекту детекторной части станции для облучения микросхем на ускорительном комплексе NICA (далее ДЧС-NICA или ДЧС). ДЧС-NICA – это проект, направленный на исследование влияния радиации на интегральные микросхемы (ИМС), в

особенности на большие и сверхбольшие (БИС и СБИС). ДЧС позволит получать экспериментальные данные по воздействию одиночных тяжелых заряженных частиц на ИМС (т.н. эффекты ТЗЧ), что в перспективе позволит уточнить расчетные модели этих эффектов, используемые при разработке новых микросхем.

Основное отличие проекта ДЧС от других ускорительных экспериментальных установок для изучения ТЗЧ-эффектов заключается в возможности ДЧС одновременно определять величину энергии, выделенной тяжелой частицей (ядром) в микросхеме (т.н. величину линейной передачи энергии - ЛПЭ) и место попадания этой частицы в микросхему (причем для микросхем в корпусе). При этом ожидаемая точность определения ЛПЭ должна быть не хуже 10%, а точность определения места попадания частицы не хуже 50мкм.

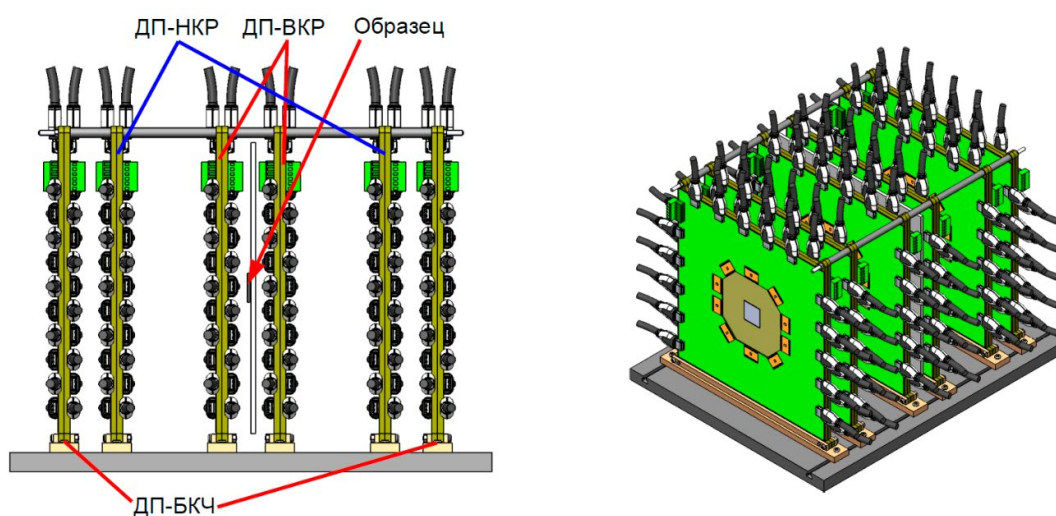


Рисунок 11. Конструкция детектора проекта ДЧС-NICA

В качестве источника тяжелых частиц для ДЧС планируется использование ресурсов ускорительного комплекса NICA. Широкие возможности выбора ядер пучка от углерода до золота (^6C , ^{18}Ar , ^{26}Fe , ^{36}Kr , ^{54}Xe , ^{79}Au) с энергиями до 350 МэВ/нуклон позволяют осуществлять моделирование воздействия разнообразных видов воздействия КЛ на микросхемы в наземных условиях.

Конструкция прибора показана на рис. 11. Посередине установки располагается изучаемый образец (микросхема). По обе стороны от него симметрично располагаются пары детекторных плоскостей с высоким координатным разрешением (ДП-ВКР) — стриповые кремниевые детекторы с шагом стрипов 100 мкм, в каждой паре ориентации стрипов в двух плоскостях взаимно перпендикулярны. Далее - стриповые детекторы с шагом стрипов 1мм (т.н. детекторные плоскости с низким координатным разрешением - ДП-НКР) и внешние плоскости с падовыми детекторами без координатной чувствительности (ДП-БКЧ) для измерения энерговыделения проходящих частиц.

Для прецизионной локализации трека частицы в образце и определения энерговыделения частиц в нем требуется точное позиционирование кристалла образца относительно координатной системы детекторов. Для решения этой задачи аппаратура может работать в специальном режиме, для которого была разработана оригинальная методика - ядерная энергетическая «томография», заключающаяся в определении количества вещества, пройденного частицей на выходе из образца, по потере энергии в

веществе, в зависимости от координат частицы, что позволяет восстановить внутреннюю структуру образца с привязкой к системе координат детекторов.

Особенности конструкции ДЧС и созданной для её исследования математической модели представлены в первых частях 7й главы. Математическая модель ДЧС создавалась в Geant4, испытываемые образцы ИМС в модели рассматривались двух типов: с «крышкой» из никеля и монолитный (рис. 12).

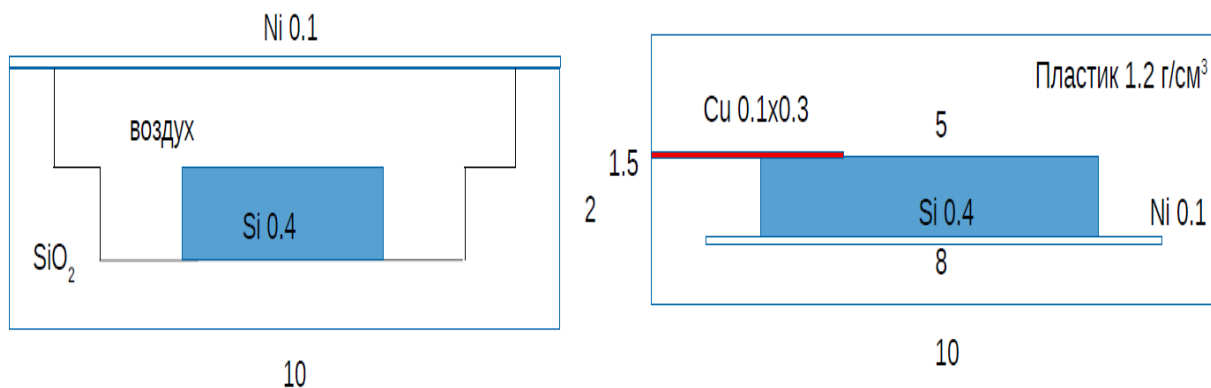


Рисунок 12. Образцы в моделировании ДЧС-NICA. Цифры на рисунках - толщины соответствующих слоев в миллиметрах. Левый рисунок - упрощенный вид (разрез) кремниевой ИМС в керамическом корпусе с металлической (никель) крышкой. Правый рисунок - упрощенный вид кремниевой ИМС в монолитном пластиковом корпусе.

В процессе работы с созданной математической моделью ДЧС был исследован вопрос точности определения величины линейной передачи энергии (ЛПЭ) в образце (см. часть 7.4). Точность и диапазон определения ЛПЭ в образце проверялись в тонком слое кремния монолитного образца толщиной 25мкм для широкого набора энергий с использованием ядер золота: с шагом 1 МэВ/нуклон при энергиях 124-149 МэВ/нуклон и с шагом в 10 МэВ/нуклон при больших энергиях.

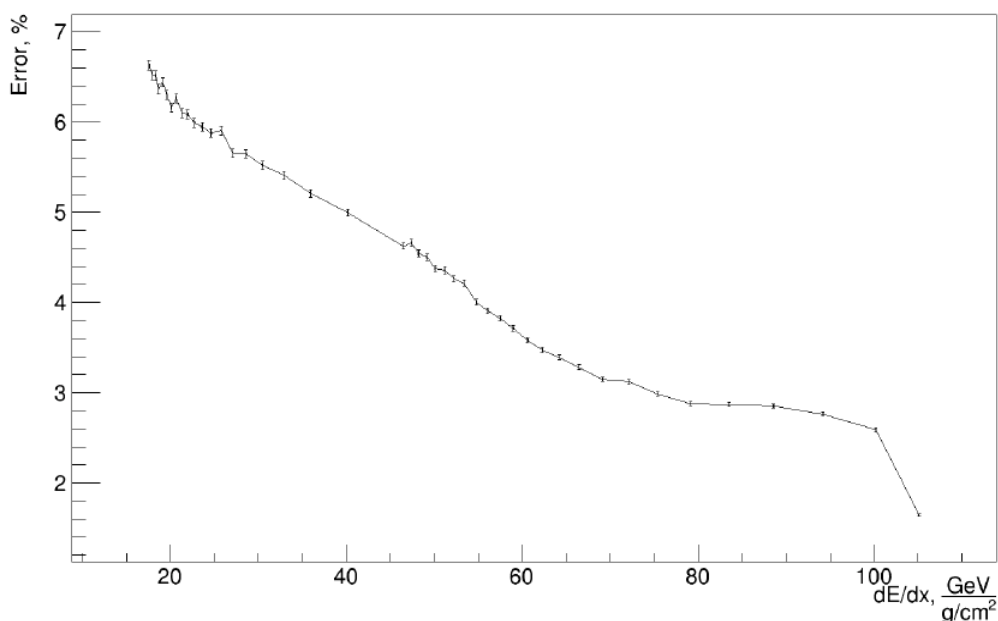


Рисунок 13. Зависимость точности определения ЛПЭ от самой величины ЛПЭ.

На рис. 13 показана полученная зависимость относительной ошибки измерения уровня ЛПЭ от величины ЛПЭ. Видно, что предлагаемая конструкция ДЧС обеспечивает точность определения ЛПЭ в образце в единицы процентов вне зависимости от величины ЛПЭ, и что ожидаемая точность в 10% обеспечивается во всем диапазоне.

Далее в главе 7 (см. часть 7.5) рассмотрено пространственное разрешение установки и методика реконструкции координат ядер-снарядов. К реконструкции координат есть два основных подхода: либо можно использовать первую пару НКР и первую пару ВКР (плоскости используются только до образца) и восстанавливать экстраполяцией положение в образце, либо можно использовать интерполяцию между двумя ВКР у образца. Недостаток второго подхода заключается в том, что он работает, только если частица имеет достаточную энергию, чтобы долететь до второй пары ВКР – то есть, ЛПЭ в образце низкие или установка работает в режиме ядерной «томографии» (см. далее).

На координатное разрешение влияют два фактора – конструкционный (размер стрипов плоскостей) и физические процессы и флуктуации, такие, как множественное рассеяние. Для оценки относительного вклада последнего фактора в моделировании добавлена возможность работы с «бесконечно тонкими стрипами», что позволило регистрировать реальную координату пролета частицы через плоскость. На рис. 14 показана зависимость координатного разрешения в миллиметрах от энергии частиц для первого и второго метода регистрации в двух случаях: со стрипами ("w/strips" - влияют и конструкционный, и физический факторы) и без стрипов ("w/o strips" - бесконечно тонкие стрипы и влияет только физический фактор).

Видно, во-первых, что в любом случае конструкционный фактор является решающим, то есть множественное рассеяние не вносит определяющий вклад. Во-вторых, вторая методика дает лучшее координатное разрешение, чем экстраполяция в первой. В-третьих, координатное разрешение не сильно зависит от энергии до определенного момента, однако ухудшается при приближении к пику Брэгга в стриповых плоскостях.

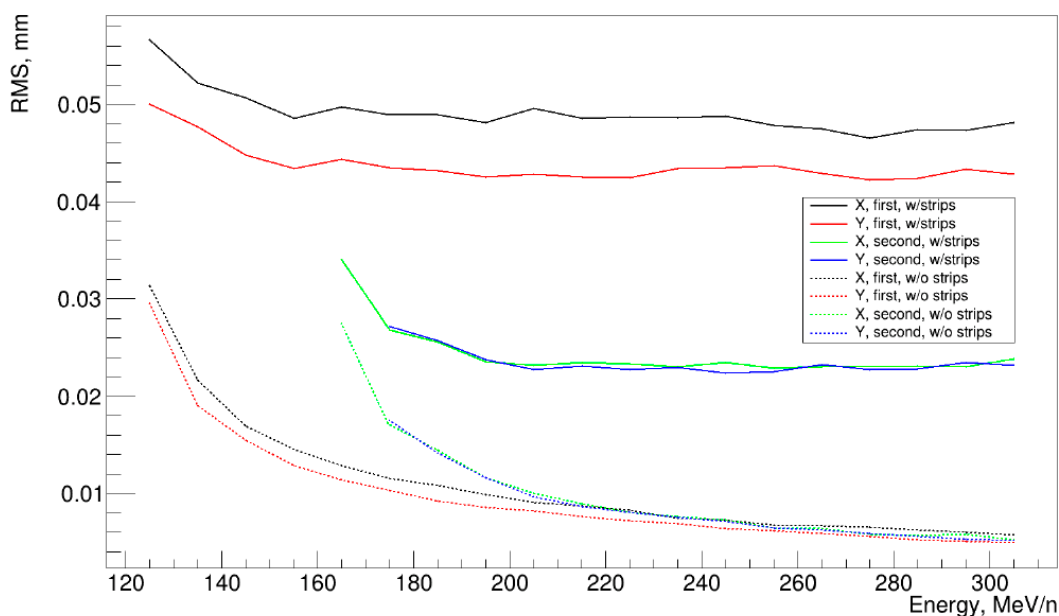


Рисунок 14. Координатное разрешение ДЧС-NICA в зависимости от энергии

Далее (часть 7.6) представлена методики ядерной энергетической «томографии» и результаты (в моделировании) её работы. При обработке использовалась первая методика определения координаты (из двух предложенных в части 7.5), поскольку она дает результаты хуже второй методики, и потому она позволяет получить верхнюю оценку ошибок восстановления координат, кроме того, работает первая методика в более широком наборе энергий, чем вторая.

На рис. 15 показана работа методики ядерной «томографии» для монолитного образца (рис. 12) в моделировании. Слева – трехмерный вид; по осям X и Y отложены реконструированные координаты прохождения частицы, а по оси Z – энерговыведение в первом падовом слое после образца. Справа – аналогичная картина с видом сверху на образец, энерговыведение обозначено цветом. Видно, что отдельные слои монолитного образца хорошо выделяются – видны даже тонкие соединяющие провода. Стоит отметить, что рисунок нарисован лишь для 90000 событий, что порядка количества ядер в двух сбросах ускорителя НУКЛОТРОН, использующегося для работ с ДЧС. В эксперименте при необходимости легко может быть обеспечена значительно более высокая статистика и более высокое качество изображения.

На рис. 16 показана зависимость качества разрешения различных пар слоев для монолитного образца от энергии. Для оценки качества разрешения считалось отношение разницы в энерговыведении различных пар слоев к среднестатистическому отношению, для монолитного образца. При слишком высоких энергиях слои слишком сильно сближаются друг с другом по энерговыведению, и остаются хорошо различимы лишь пары промах/корпус (при промахе образец вообще не задет частицей) и пары корпус/кремний. Для разрешения более тонкой структуры требуется снижение энергии пучка, и уже для энергии 200-220 МэВ/нуклон и ниже все структуры разрешаются хорошо.

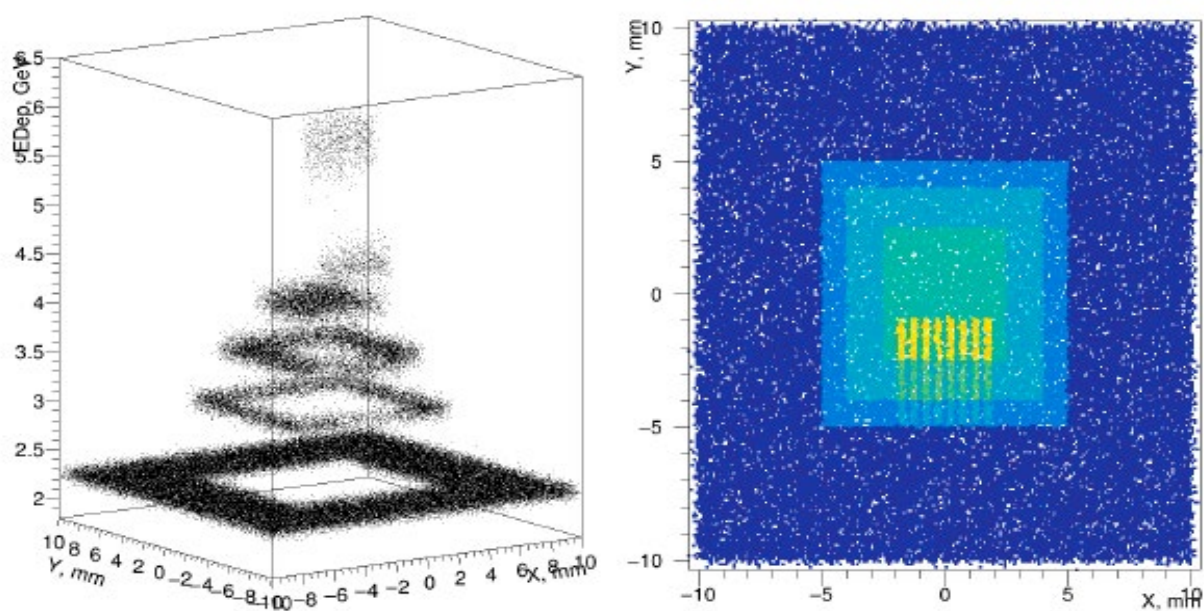


Рисунок 15. Работа методики ядерной «томографии».

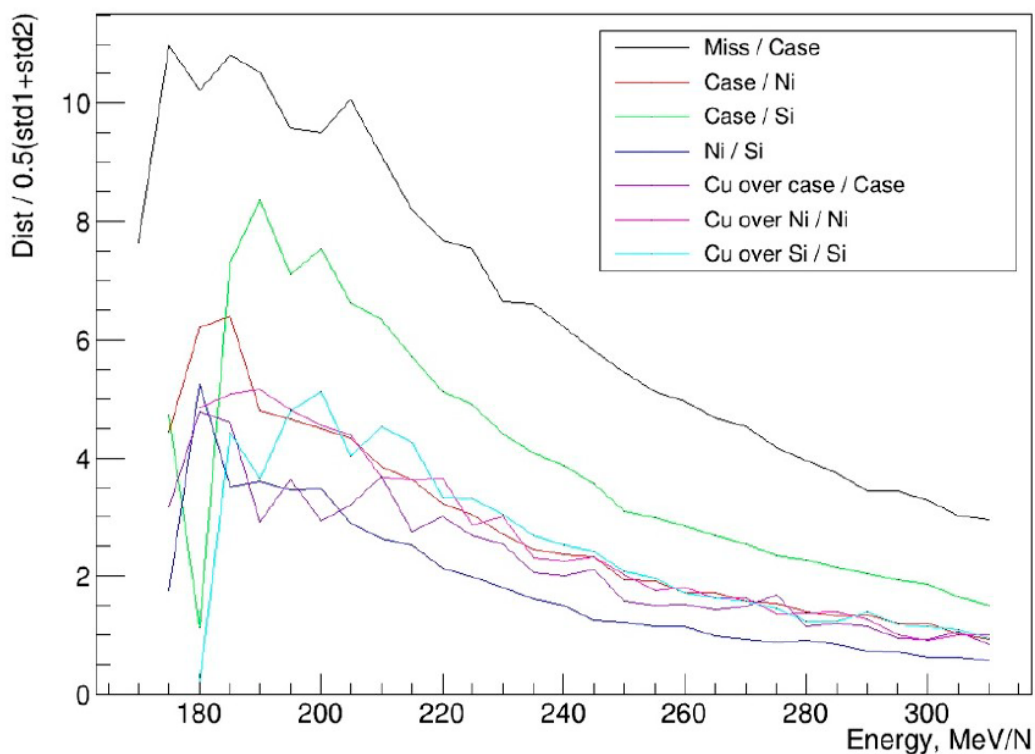


Рисунок 16. Зависимость разрешения различных пар слоев от энергии для монолитного образца. Miss – пролет мимо образца, Case – попадание только в корпус микросхемы, Ni – попадание в никелевую подложку, Si – попадание в кремний микросхемы, Cu – попадание в соединяющие провода. По оси ординат отложено отношение стандартного отклонения к среднему энергвыделению, значение равное или ниже единицы означает отсутствие разрешения.

Конструкционные особенности установки такие, как люфты и допуски при установке координатно-чувствительных детекторов приводят к тому, что расположение стриповых плоскостей относительно друг друга точно неизвестно. Они могут оказаться случайно сдвинутыми на малые расстояния (~ 1 мм) или повернутыми на малые углы (~1°). Для достижения оптимального координатного разрешения системы требуется методика реконструкция данных сдвигов и поворотов из пучковых данных; далее эта необходимая операция называется алайментом (от английского alignment, то же - юстировка плоскостей). Эта методика рассмотрена в разделе 7.7 диссертации.

Алгоритм методики алаймента следующий:

1. Предположить нулевые сдвиги и повороты плоскостей.
2. Провести аппроксимации треков по всем координатным плоскостям при текущих сдвигах и поворотах.
3. Из отклонений полученных треков от точек попадания частицы в стриповые плоскости выяснить сдвиги и углы наклона плоскостей.
4. При недостаточной точности алаймента (аппроксимации все еще плохо попадают в точки попадания частиц) вернуться к шагу 2 и провести следующую итерацию.

Углы и сдвиги плоскостей определялись с помощью графиков зависимостей отклонений аппроксимаций от точек попадания в плоскость (например, с координатной чувствительностью вдоль оси X) от координаты попадания частицы вдоль стрипов (то есть, Y в данном примере). Данная зависимость имеет вид размытой линии $y = kx + b$, где b говорит о сдвиге плоскости, а k – о ее наклоне. Примеры таких зависимостей до и после юстировки в моделировании показаны на рис.17 и рис.18 соответственно. Видно, что все

зависимости после проведения операции юстировки встают на прямую $y = 0$, что говорит об успешном проведении операции.

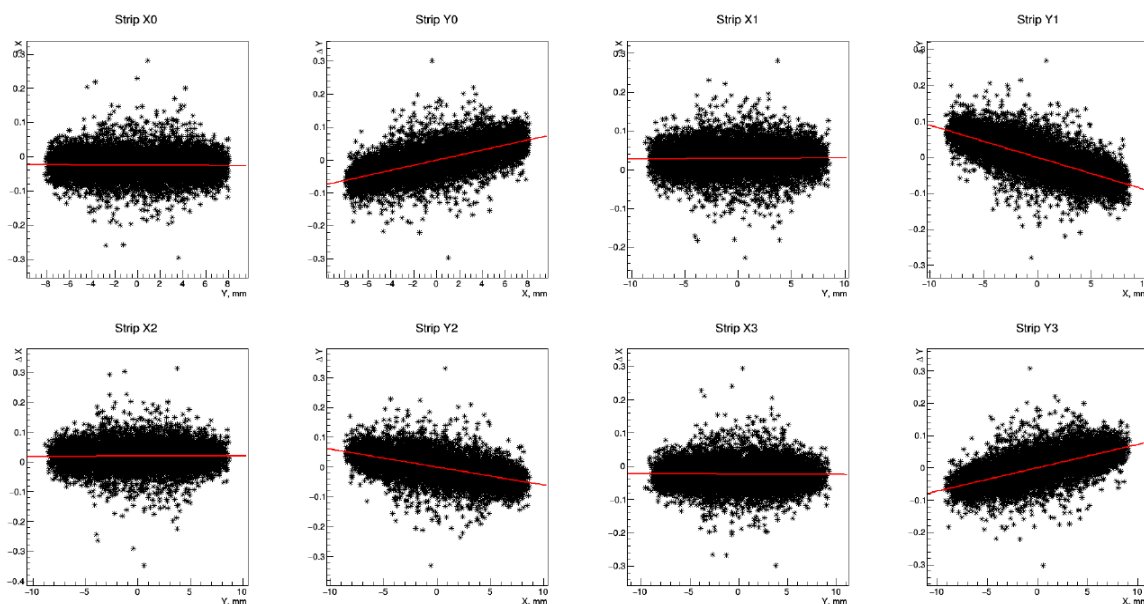


Рисунок 17. Зависимости отклонений аппроксимаций от координаты попадания в плоскость для всех плоскостей в процедуре юстировки до проведения операции.

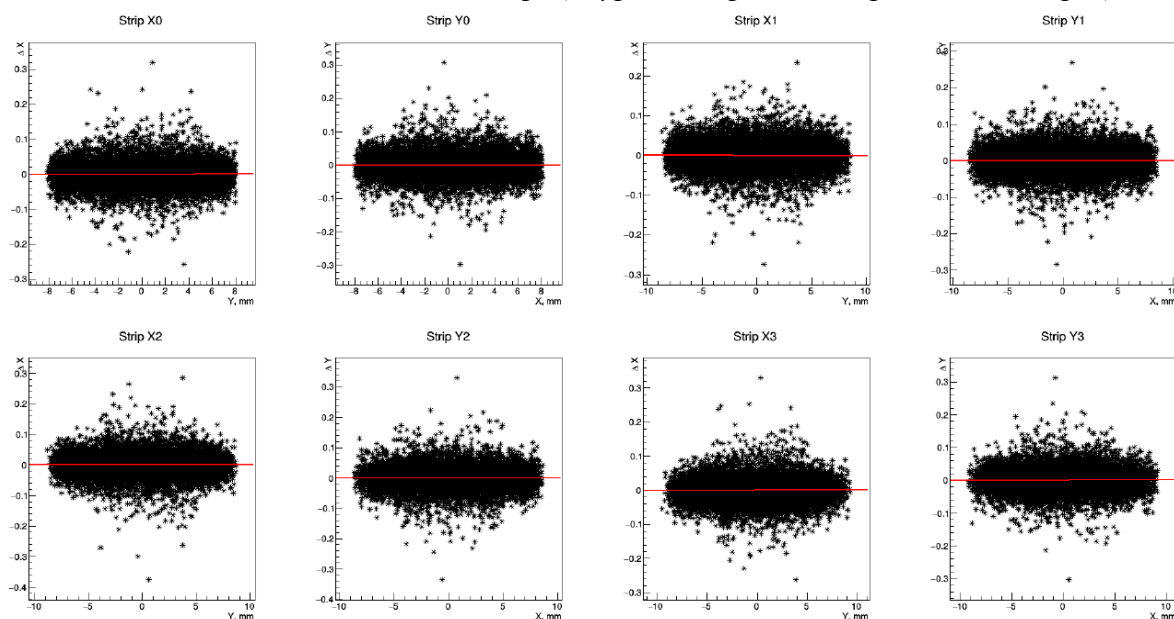


Рисунок 18. Зависимости отклонений аппроксимаций от координаты попадания в плоскость для всех плоскостей в процедуре юстировки после проведения операции.

В работе оценена ошибка восстановления сдвигов и поворотов плоскостей в моделировании. Моделирование показало, что ошибка определения сдвигов не превышает 0.04 мм, а поворотов – 0.2 микрорадиана.

В декабре 2022 года был проведен пучковый эксперимент с детектором ДЧС-NICA. Из пучка выходили частицы ядер ксенона ($Z = 54$) с энергией 3.7 ГэВ/нуклон. Для снижения энергии частиц перед ДЧС-NICA был установлен свинцовый деградер толщиной в 6 см. К сожалению, такая толщина деградера не позволяет провести проверку методики ядерной «томографии» из-за сильных флуктуаций энергии, а также из-за большого количества

событий с ядрами, отличными от первоначального. Однако, на данных этого пучкового эксперимента возможна проверка методики юстировки плоскостей. Результаты этой работы представлены в части 7.8.

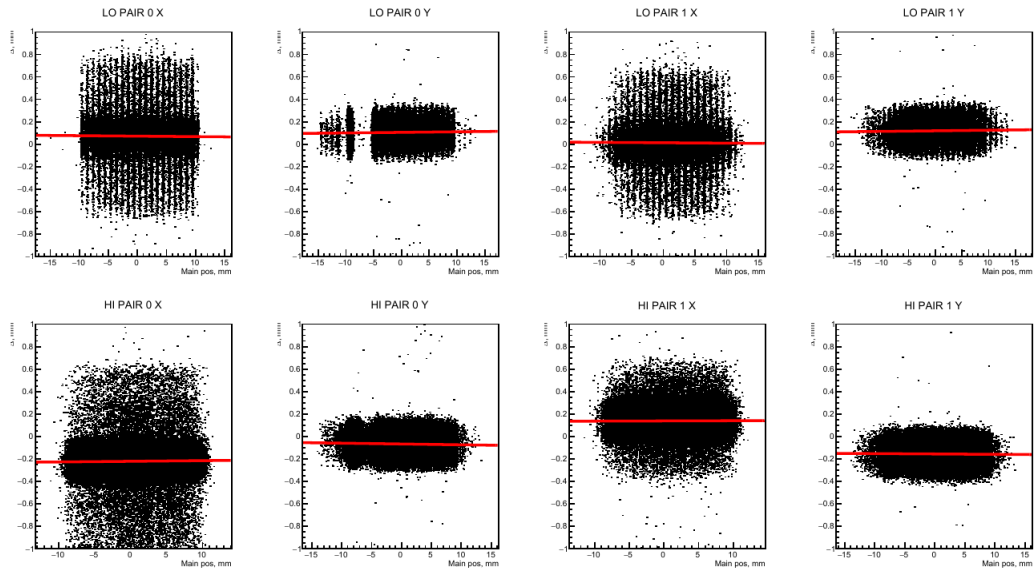


Рисунок 19. Зависимости, аналогичные рис. 18 в эксперименте до юстировки.

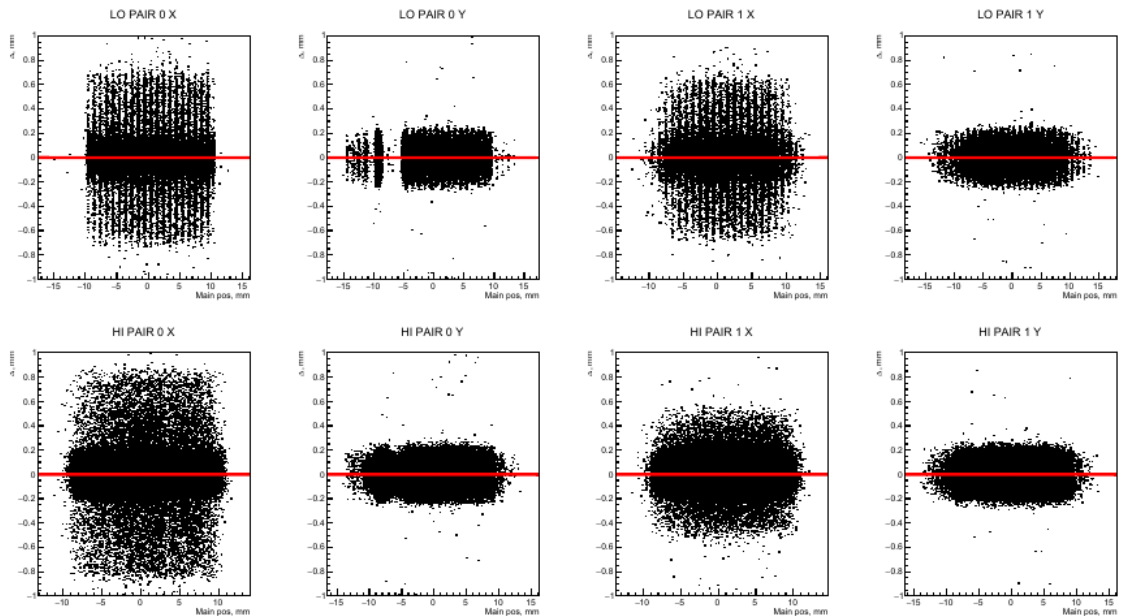


Рисунок 20. Зависимости, аналогичные рис. 19 в эксперименте после юстировки.

Практический интерес в анализе представляют лишь события, где через аппаратуру пролетает только одна частица, без посторонних фрагментов и без фрагментации в области самой аппаратуры. Наличие у детектора ДЧС-NICA координатно-чувствительных плоскостей (ВКР и НКР) позволяет провести очень эффективную фильтрацию событий для получения событий без фрагментации. Для этого на первом этапе проводится фильтрация событий по количеству сработавших каналов (и кластеров каналов) в ВКР. Далее, для оставшихся событий, через кластеры сработавших каналов проводились треки частиц методом наименьших квадратов; при этом использовались данные из всех координатно-чувствительных плоскостей. После этого применялась описанная выше методика юстировки плоскостей. Полученные в эксперименте зависимости до и после юстировки,

аналогичные рис.17 и рис.18, показаны на рис.19 и рис.20. Видно, что процедура алаймента проведена успешно. Итоговые сдвиги составили от 60 до 158 микрон, а повороты - от 0.12 до 0.41 градусов.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

В ходе работ с аппаратурой эксперимента НУКЛОН-2:

- создана математическая модель спектрометра НУКЛОН-2, адекватно описывающая его работу при регистрации тяжелых ядер;
- предложены и реализованы модельно-независимая и модельно-зависимая методики анализа массового состава ядер для эксперимента со спектрометром НУКЛОН-2;
- правильность работы созданной модели спектрометра и методик обработки его данных подтверждена в пучковом эксперименте с прототипом спектрометра НУКЛОН-2;
- определена оптимальная толщина детекторов спектрометра – 2мм и максимальный допустимый шум электроники - 5 МэВ;
- определено модельное разрешение изотопов ядер регистрируемых спектрометром НУКЛОН-2, зависящее от заряда регистрируемого ядра и меняющееся от 0.24 до 1.6 в диапазоне Z от 10 до 66;
- обработаны банки экспериментальных данных пучковых экспериментов с прототипом спектрометра; получено экспериментальное разрешение изотопов аргона – 0.28 а.е.м.;
- из моделирования и из экспериментальных данных с прототипом спектрометра НУКЛОН-2 получены указания на наличие разрешения изотопов ксенона; требуется существенное улучшение статистики для более определенных выводов.

В виду необходимости расширения банка экспериментальных данных по регистрации энерговыделения тяжелых ядер, была найдена возможность дальнейшую экспериментальную работу на эту тему продолжить в рамках проекта ДЧС-НИСА. В этой части работы выполнены следующие основные работы:

- создана математическая модель аппаратуры ДЧС-НИСА подробно исследована в моделировании;
- для созданной модели исследована работа ДЧС в режиме определения ЛПЭ в тестируемом образце ИМС; получена оценка точности определения ЛПЭ - не хуже 7%;
- для созданной модели исследована работа ДЧС в режиме определения координат попадания ядер-снарядов в ИМС, показано, что координатное разрешение составляет от 22мкм до 56мкм в зависимости от энергии ядра-снаряда и метода определения координаты;
- предложена методика ядерной «томографии» и исследована её работа для двух образцов корпусов микросхем - монолитного пластикового и керамического с крышкой;
- предложена методика юстировки плоскостей, позволяющая работать установке с оптимальным координатным разрешением, работа методики юстировки протестирована на экспериментальных пучковых данных.

Список основных публикаций

Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 статьях в рецензируемых журналах, индексируемых в базах Web of Science и SCOPUS:

1. Текущий статус миссии НУКЛОН-2 / О.А.Васильев, Д.Е.Карманов, И.М.Ковалев, И.А.Кудряшов, **А.А.Курганов** и др. // Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2021. — Т. 18, № 1.

Current Status of the NUCLEON-2 Mission / Vasiliev O., Karmanov D., Kovalev I., Kudryashov I., **Kurganov A.**, et al. // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2021, том 18, с. 36-51.] (SJR Scopus 0.267).

2. Результаты предварительного моделирования проекта ДЧС-НИКА / О.А.Васильев, Д.Е.Карманов, И.М.Ковалев, И.А.Кудряшов, **А.А.Курганов** и др. // Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2020. — Т. 17, № 6.

Preliminary Simulation Results for the DPS-NICA Project / Vasilev O., Karmanov D., Kovalev I., Kudryashov I., **Kurganov A.** et al. // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2020, том 17, № 6, с. 871-877(SJR Scopus 0.267).

3. Nucleon-2 mission for the investigation of isotope and charge composition of cosmic ray ions / V.Bulatov, S.Fillipov, D.Karmanov, I.Kovalev, **A.Kurganov** et al. // Advances in Space Research. — 2019. — Vol. 64, no. 12. — P. 2610–2618. (SJR Scopus 0.599).
4. Текущий статус миссии НУКЛОН-2 / **А. А.Курганов**, В. Л.Булатов, О. А.Васильев и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2019. — Т. 83, № 5. — С. 694–695.

Current Status of the NUKLON-2 Space Mission / **Kurganov A.A.**, Bulatov V.L., Vasiliev O.A. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2019, том 83, № 5, с. 635-636 (SJR Scopus 0.211).

5. Nucleon-2 mission for the investigation of heavy cosmic rays' nuclei / V.Bulatov, S.Filipov, D.Karmanov, I.Kovalev, **A.Kurganov** et al. // Journal of Instrumentation. — 2018. — Vol. 13, no. 11. — P. 11–21. (SJR Scopus 0.650).
6. Определение изотопного состава сверхтяжелых ядер галактических космических лучей в эксперименте НУКЛОН-2 / Д.Е.Карманов, **А.А.Курганов**, М.И.Панасюк и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2017. — Т. 81, № 4. — С. 436–438.

Measuring the Isotopic Composition of Superheavy Nuclei of Galactic Cosmic Rays in the NUCLEON-2 Experiment / Karmanov D.E., **Kurganov A.A.**, Panasyuk M.I. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2017, том 81, № 4, с. 401-403 (SJR Scopus 0.211).