

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

На правах рукописи



ЛЕНИВЕНКО

Василиса Викторовна

**Программно-алгоритмический комплекс для
реконструкции траекторий заряженных частиц и
идентификация ионов
в эксперименте SRC на установке BM@N**

Специальность: 1.2.2 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна – 2024

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий
им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители: **Пальчик Владимир Владимирович**
к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Лаборатории информационных технологий им. М.Г. Мещерякова, Объединенный институт ядерных исследований
Пацюк Мария Александровна
к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина, Объединенный институт ядерных исследований

Официальные оппоненты:

Ким Виктор Тимофеевич
д.ф.-м.н., заместитель руководителя отделения физики высоких энергий, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" – Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константинова (НИЦ КИ – ПИЯФ)

Коротков Михаил Геннадиевич
к.ф.-м.н., доцент, Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ" (НИЯУ МИФИ), преподаватель кафедры ядерной физики и космофизики

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <https://dissertations.jinr.ru>. С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь диссертационного совета ОИЯИ.05.01.2022.П, д.ф.-м.н. Земляная Елена Валериевна

Общая характеристика работы

Диссертационное исследование посвящено развитию методов и комплексов программ для моделирования откликов детекторных систем, реконструкции траекторий заряженных частиц перед анализирующим магнитом и идентификации ионов конечного состояния в эксперименте *Baryonic Matter at Nuclotron (BM@N)* [1] на ускорительном комплексе *Nuclotron-based Ion Collider Facility NICA (NICA)* [2], в рамках анализа данных первого эксперимента *Short-Range Correlations (SRC)* на установке *BM@N*.

Актуальность темы исследования

Несмотря на почти столетнюю историю интенсивных исследований в области ядерной физики и успехи в фундаментальном описании структуры атомного ядра, все еще остается большое количество вопросов, не укладываемых в разработанные модели. Значительная часть таких явлений наблюдается на стыке ядерной физики и физики частиц. В Лаборатории высоких энергий ОИЯИ в 1970х годах вместе с первыми экспериментами на пучке ускоренных до нескольких ГэВ дейтронов началась новая эпоха в изучении ядра в релятивистских условиях. Эксперименты по рождению кумулятивных частиц [3-5] послужили толчком для развития представлений о свойствах плотных скоплений нуклонов и нуклонных корреляций на малых расстояниях. В таких внутриядерных флуктуациях плотности становятся значительными нуклон-нуклонные отталкивания, свойства которых слабо изучены, а также начинают проявляться кварковые степени свободы. На сегодняшний день детали сильного взаимодействия и то, как они проявляются в ядерной материи, является одним из главных вопросов для действующих и планирующихся экспериментов на ускорителях по всему миру.

В ОИЯИ в рамках реализуемого проекта уровня мега-сайенс *NICA* начал работу первый эксперимент на фиксированной мишени – *BM@N*, нацеленный на исследование плотной барионной материи при помощи пучков тяжелых ионов с энергией до 6 АГэВ. В столкновениях с ядерной мишенью при таких энергиях можно получить плотности вещества, в 4 раза превышающие среднюю плотность ядерной материи в обычных условиях. В 2017 году физическая программа эксперимента *BM@N* была расширена тематикой Короткодействующих Двухнуклонных Корреляций (КДК) или *Short-Range Correlations (SRC)* [6-8], направленной на изучение свойств плотной ядерной материи в ситуациях, когда два нуклона ядра сближаются на расстояние около 1 фм и плотность энергии в области перекрытия превышает в 2-3 раза среднюю плотность энергии в ядерной материи. КДК являются

кратковременными флуктуациями, так что в момент сближения нуклоны имеют противоположно направленные импульсы, по модулю превышающие импульс Ферми для данного ядра, а центр масс пары движется с малым импульсом подобно нуклонам в рамках оболочечной модели ядра. Последние годы ведутся активные исследования свойств КДК и влияния наличия короткодействующих корреляций в ядре на такие области науки, как ядерная физика, физика частиц, физика нейтрино, астрофизика и другие. В экспериментах с электронными пучками были открыты некоторые свойства КДК, что послужило материалом для более детальной разработки модели КДК.

Уникальная постановка эксперимента *SRC* на установке *BM@N* позволила впервые исследовать свойства остаточного ядра после квазиупругого жесткого рассеяния $^{12}\text{C}(p, 2p)X$, где $X - ^{11}\text{B}$ в случае рассеяния на одиночном нуклоне и ^{10}B или ^{10}Be в случае выбивания пары нуклонов образующих КДК. Первый набор данных был проведен в 2018 году с использованием углеродного (^{12}C) пучка Нуклотрона с импульсом 4 ГэВ/с, жидководородной мишени и модифицированного спектрометра *BM@N*, представляющего из себя сложную систему из детекторов различных типов, работающих согласованно для записи каждого характерного события взаимодействия ядра из пучка с веществом мишени. Для восстановления кинематики реакции было необходимо по откликам детекторов реконструировать физические параметры частиц начального и конечного состояний: траектории и импульсы, а также провести идентификацию вторичных заряженных частиц.

Системы координатных детекторов – многопроволочных пропорциональных камер (*MWPC*) [9] и кремниевых детекторов (*SiDet*) [10] – расположенные до и после мишени вдоль пучка в эксперименте *SRC* на установке *BM@N* 2018 года, служат для измерения траектории налетающего на мишень ядра углерода, а также для регистрации вторичных ядерных фрагментов. Детекторы располагаются в уникальной конфигурации, которые определяются физической задачей, техническими возможностями установки и параметрами самих детекторов, и нацелены на регистрацию пучковой частицы с зарядом b до мишени и нескольких вторичных треков после мишени. Выбор алгоритма распознавания треков зависит от конфигурации координат и чувствительных элементов в детекторах, а также от специфики эксперимента, фоновых условий, энергии пучковых частиц и типа мишени. Данные особенности, а также условия работы детекторов, в частности, неоптимальное считывание части информации с кремниевых детекторов и повышенная ионизация в пропорциональных камерах, требуют разработки новых

алгоритмов восстановления траекторий заряженных частиц, проходящих через *MWPC* и *SiDet*. Аналогично, в эксперименте *BM@N* разрабатывались специальные алгоритмы реконструкции треков в системах детекторов *GEM* [11], расположенных в магнитном поле, и в детекторах *DCH* [12], регистрирующих частицы после прохождения магнита. Для успешной разработки новых алгоритмов требуется добавить детальное математическое моделирование и реконструкцию отклика *MWPC* и *SiDet* детекторов, которое должно быть реализовано при помощи новых комплексов программ. Это позволит провести идентификацию ионов конечного состояния при помощи метода многомерного фитирования *Multi-Dimensional Fit (MDF)* [13-15] и оценить импульсное разрешение углеродного пучка.

Цели и задачи

Целью работы является разработка методов и программных комплексов для реконструкции траекторий заряженных частиц в системе камер *MWPC* и детекторов *SiDet*, а также для идентификации ионов конечного состояния, необходимых для численного анализа данных эксперимента *SRC* на установке *BM@N*, проведённого в 2018 году. Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие основные задачи:

- разработка алгоритмов реконструкции траекторий заряженных частиц для системы камер *MWPC* и детекторов *SiDet* для эксперимента *SRC* на установке *BM@N*;
- обеспечение возможности работы с моделированными данными для данных детекторов, а также тестирование и проверка алгоритмов реконструкции треков в системах камер *MWPC* и детекторов *SiDet* на экспериментальных и моделированных данных;
- разработка программного обеспечения эксперимента *BM@N* (*BmnRoot* [16]) и оформление комплекса программ в виде классов восстановления траекторий заряженных частиц, а также моделирование отклика детекторов в камерах *MWPC* и детекторах *SiDet*, т.е. унификация реконструкции на экспериментальных и моделированных данных;
- разработка метода идентификации ядер в конечном состоянии для эксперимента *SRC* на установке *BM@N* по прямым отрезкам траекторий ядер до и после анализирующего магнита с применением метода многомерного фитирования *MDF*, который основывается на программе *FUMILI* [14].

Научная новизна

С учетом особенностей установки эксперимента *SRC* на установке *BM@N* (таких как неоптимальное считывание части информации и расположение детекторов *SiDet*, а также повышенная ионизация в камерах *MWPC*) был разработан алгоритм построения трек-сегментов для камер *MWPC* [A2, A3, A6] и алгоритм поиска треков вдоль пучка в системе станций *SiDet* [A2, A5].

Разработан и внедрен алгоритм глобальной реконструкции траекторий заряженных частиц через две детекторные системы *MWPC* и *SiDet* перед магнитом для эксперимента *SRC* на установке *BM@N* [A2, A5].

Впервые проведена идентификация ядерных фрагментов после взаимодействия в мишени для эксперимента *SRC* на установке *BM@N* при помощи минимизации многомерного функционала на основе программы *FUMILI* [14].

С помощью разработанных алгоритмов успешно выполнен численный анализ данных, позволивший получить физически значимые результаты. В том числе, впервые напрямую измерена ширина импульсного распределения КДК-пары, и полученный результат согласуется с результатами исследований по данной тематике на электронных пучках.

Научно-практическая значимость работы

Разработанные алгоритмы реализованы в комплексах программ и внедрены в программное обеспечение эксперимента *BM@N*. С помощью созданных программных средств обработаны экспериментальные данные, набранные на экспериментальной установке в 2017, 2018 и 2022 годах. Всего на текущий момент при помощи созданного программного обеспечения обработано около 500 миллионов экспериментальных событий. Разработанное программное обеспечение доступно по ссылкам: <https://git.jinr.ru/nica/bmnroot/-/tree/dev/detectors/mwpc>, <https://git.jinr.ru/nica/bmnroot/-/tree/dev/detectors/silicon>, <https://git.jinr.ru/nica/bmnroot/-/tree/dev/reconstruction/globaltracking>; Разработанные алгоритмы и программные комплексы протестированы на моделированных и экспериментальных данных. Достоверность реконструированных траекторий заряженных частиц в камерах *MWPC* и детекторах *SiDet* проверялась по данным с других детекторных систем, в

частности, с сцинтилляционных счётчиков. Также использовались данные, полученные с помощью генераторов *DCM-SMM* и ионного генератора. Импульс пучка углерода, оценённый с помощью метода *MDF*, соответствует номинальному значению с точностью 0.7 ГэВ/с (1.46 %). Разработанные алгоритмы являются универсальными и используются как для конфигурации эксперимента *SRC* на установке *BM@N*, так и для основной конфигурации эксперимента *BM@N*.

Методология и методы исследования

Для поиска наилучших параметров в алгоритмах реконструкции треков заряженных частиц, а также для поиска сдвигов в процедуре математического выравнивания детекторов использовались методы математической статистики.

Алгоритмы восстановления сигнала в детекторах и построение трек-сегментов в камерах *MWPC*, а также треков в детекторах *SiDet* разрабатывались и тестировались как на экспериментальных данных, так и на данных моделирования физических событий, основанных на *Geant4* [18].

Программная реализация разработанных алгоритмов выполнена на языке *C++*. Все разработанные алгоритмы и методы реализованы в системе классов и встроены в программное обеспечение *BmnRoot*.

При идентификации ионов конечного состояния использовался метод минимизации многомерных функционалов *MDF*.

Положения, выносимые на защиту

1. Алгоритмы локальной и глобальной реконструкции траекторий заряженных частиц для систем многопроволочных пропорциональных камер (*MWPC*) и кремниевых детекторов (*SiDet*) в условиях неоптимального геометрического расположения и пониженной эффективности считывания *SiDet*, а также повышенной ионизации *MWPC*. Эффективность реконструкции для глобального трека перед магнитом составила 98%.
2. Методика идентификации ионов конечного состояния в исследуемых реакциях минимизацией многомерного функционала для эксперимента *SRC* на установке *BM@N*.

3. Комплекс программ в рамках *BmnRoot* в виде набора классов, реализующий разработанные алгоритмы с возможностью работы как с экспериментальными данными, так и с моделированием.
4. Результаты численного исследования по идентификации ионов конечного состояния в эксперименте *SRC* на установке *BM@N*, полученные на основе разработанных методов и комплексов программ.

Достоверность

Разработанные алгоритмы и программные комплексы протестированы на моделированных и экспериментальных данных. Для моделирования физических данных использовался генератор *DCM-SMM* [19]. Пакет *Geant4* использовался для протягивания частиц через экспериментальную установку, а пакет *BmnRoot* [16] – для реконструкции физических событий. Достоверность реконструированных траекторий заряженных частиц в *MWPC* и *SiDet* проверялась другими детекторными системами, в частности, с помощью сцинтилляционных счетчиков, которые регистрировали суммарный заряд в событии вдоль пучка. Результаты численного анализа согласуются с другими измерениями по тематике *SRC*, проведенными на электронных пучках [8]. Импульс пучка углерода, оцененный с помощью метода *MDF*, соответствует номинальному значению с точностью 0.7 ГэВ/с (1.46 %) [A4].

Апробация работы

Ключевые положения и результаты диссертационного исследования были представлены и обсуждены на международных и российских конференциях, а также на рабочих совещаниях:

- *Collaboration Meetings of the BM@N Experiment at the NICA Facility* – 2021, 2020, 2019;
- Международная научная конференция молодых ученых и специалистов ОИЯИ – 2021, 2020, 2018, 2016;
- Школа-конференция молодых ученых и специалистов ОИЯИ Алуста – 2021, 2016;
- *the 18th International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM 2019)*, Бари, Италия, 2019 - стендовый доклад;

- *the International Conference on Particle Physics and Astrophysics ICPPA – 2018, 2017;*
- *International Conference on Mathematical Modeling and Computational Physics (ММСП), Дубна, 2017;*
- Выступления на внутренних еженедельных совещаниях профильных рабочих групп на постоянной основе.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий имени В.И. Векслера и А.М. Балдина ОИЯИ в рамках Проблемно-тематического плана (тема 02-0-1065-2007/2023), а также при поддержке следующих грантов и стипендий:

- грант ОМУС 2023 год;
- поощрительные стипендии А.М. Балдина – 2022, 2021, 2020 годы;
- грант РФФИ 18-02-40046 «Анализ данных в эксперименте $BM@N$ по изучению короткодействующих двухнуклонных корреляций во взаимодействии пучка ядер углерода с протонной мишенью».

Публикации и личный вклад

По теме диссертации подготовлены 7 научных работ, опубликованных в рецензируемых изданиях, соответствующих требованиям к публикациям положения о присуждении ученых степеней в ОИЯИ (пр. ОИЯИ от 11.02.2022 № 132). Положения и результаты, представленные в диссертации и в публикациях по теме диссертации, получены при определяющем участии соискателя, либо при активном его участии. Программная реализация разработанных методов и алгоритмов, их тестирование и апробация выполнены лично соискателем.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертационная работа включает результаты исследований, соответствующих пунктам 2, 3, 4 указанным в паспорте специальности. Принадлежность диссертации к физико-математическому разделу науки определяется использованием математических (численных) методов в качестве инструмента исследований, направленных на получение новой физически значимой информации как с помощью моделирования физических процессов, так и анализа данных эксперимента в области физики высоких энергий.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, 1 приложения, списка цитируемой литературы (131 пункт). Работа содержит 125 страниц и включает в себя 50 рисунков и 10 таблиц.

Содержание работы

Во **введении** приводится актуальность диссертационной работы, указывается цель и научная новизна исследований, аргументирована практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В **Главе 1** приводится **описание установки $BM@N$** и модернизация этой установки для эксперимента SRC на установке $BM@N$, а также описание отдельных детекторных систем, для которых разрабатывались алгоритмы.

Раздел 1.1 посвящен **обзору существующих методов** реконструкции траекторий частиц в экспериментах физики высоких энергий (ФВЭ). В зависимости от типов детекторов и топологии физических событий.

В **разделе 1.2 описывается эксперимент $BM@N$ и его отдельные подсистемы**. Конструкция спектрометра в 2018 м году реализована таким образом, чтобы максимально эффективно регистрировать траектории заряженных частиц в начальном и конечном состояниях, а также проводить их идентификацию при взаимодействии пучковых ионов C и Ar с жидководородной и свинцовой мишенями. Две пропорциональные камеры, расположенные на расстоянии 1 м друг от друга, использовались для мониторинга пучка до мишени. Кремниевые детекторы использовались для регистрации вторичных треков вблизи мишени. Система отсчета глобальных координат O_{xy} располагалась в начале полюса анализирующего магнита, ось O_z направлена по пучку, ось O_y вертикально, ось O_x дополняет систему до правой тройки векторов. Целью эксперимента является исследование свойств плотной барионной материи во взаимодействиях пучков с кинетической энергией от 1 до 4.5 ГэВ/А средних и тяжелых ионов с фиксированными мишенями. При таких энергиях хорошо проявляются особенности взаимодействия нуклонов друг с другом, свойства странных мезонов и мульти-странных гиперонов. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

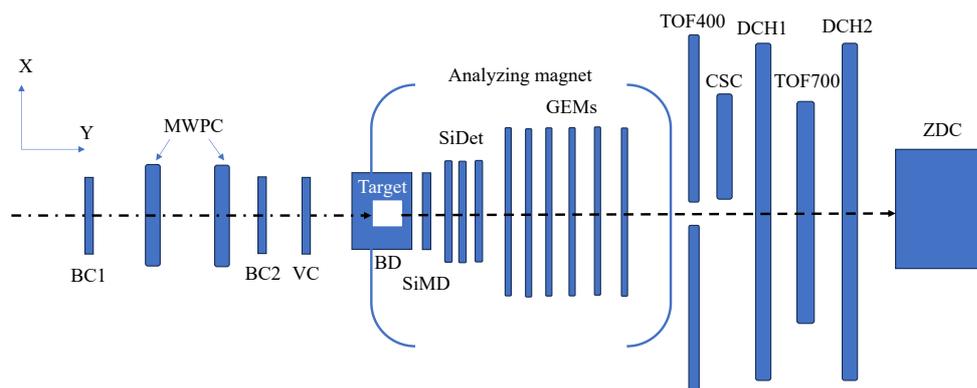


Рис. 1 – Схема экспериментальной установки BM@N в 2018 году: анализирующий магнит, BC1,2, VC, BD – триггерные детекторы, MWPC – многопроволочные пропорциональные камеры, GEM – координатные детекторы на основе газовых электронных умножителей, ECAL – электромагнитный калориметр, CSC – катодно-стриповая камера, времяпролетная система (TOF1 и TOF2), DCH – дрейфовые камеры, ZDC – калориметр центрального взаимодействия.

Раздел 1.3 посвящен описанию Модели Короткодействующих Двухнуклонных Корреляций (КДК).

Раздел 1.4 описывает экспериментальную установку SRC на BM@N. Основной модификацией являлось добавление двухплечевого спектрометра для регистрации протонов конечного состояния после выбивания одного или двух нуклонов в квазиупругой жесткой реакции $^{12}\text{C}(p, 2p)X$ из пучкового ядра ^{12}C на жидководородной мишени. Схема установки представлена на рис. 2. Каждое плечо состояло из сцинтилляционных триггерных счетчиков (X, Y), координатных (GEM) и времяпролетных (TOF) детекторов. Перед попаданием на мишень пучок ^{12}C регистрировался в триггерных сцинтилляционных счетчиках $BC1$, $BC2$ и вето-счетчике (VC), а также мониторировался с помощью пары пропорциональных камер ($MWPC(Pair0)$). После взаимодействия с мишенью вторичные ядерные фрагменты проходили через триггерные сцинтилляционные счетчики $BC3$, $BC4$, три станции кремниевых детекторов ($SiDet$) и вторую пару пропорциональных камер ($MWPC Pair1$), после чего попадали в анализирующий магнит. После магнита ядерные фрагменты детектировались двумя дрейфовыми камерами ($DCH1$, $DCH2$).

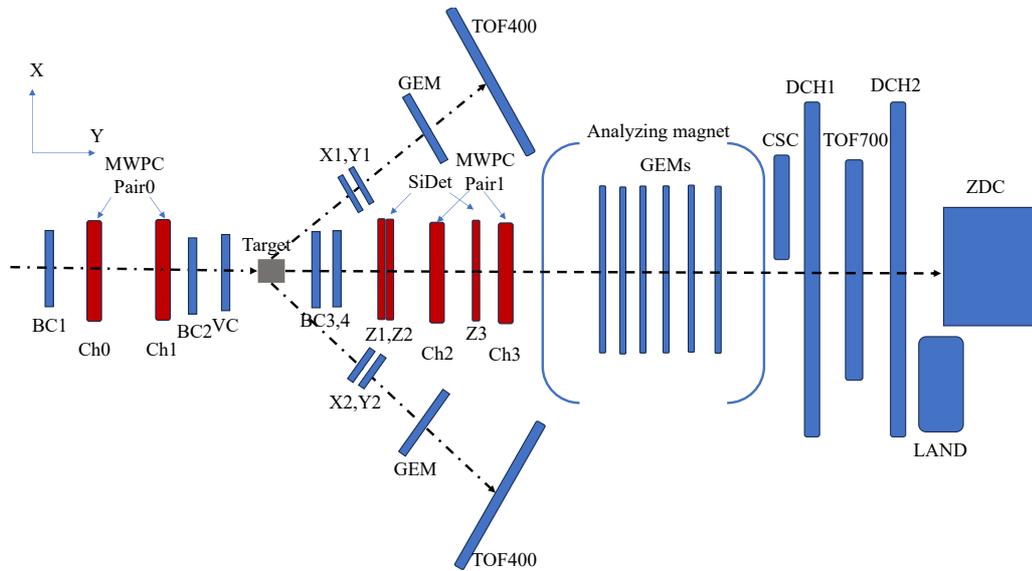


Рис. 2 – Схема экспериментальной установки *SRC* на установке *BM@N* в 2018 году (не в масштабе): пропорциональные камеры MWPC (*Pair0* до магнита и *Pair1* после), пучковые счетчики (*BC*), триггерные скintилляторы (*X, Y*), жидководородная мишень (*Target*), времяпролетная система (*TOF400* и *TOF700*), система координатных детекторов *GEM*, расположенных внутри анализирующего магнита (*Analyzing magnet*) и в плечевом спектрометре установки, кремниевые станции *SiDet* (три станции), дрейфовые камеры (*DCH*), катодно-стриповая камера (*CSC*), нейтронный детектор (*LAND*) и калориметр центрального взаимодействия (*ZDC*). Координатные детекторы, являющиеся фокусом данной работы, выделены красным.

В разделе 1.5 приводится описание MWPC. Камера представляет собой газонаполненный координатный детектор с шестью плоскостями, в каждой из которых 96 параллельных сигнальных (анодных) проволок, которые находятся между двумя катодными плоскостями. Шаг проволоки в каждой плоскости 0.25 см. Расстояние между плоскостями 1 см вдоль оси *Z*. Три пары плоскостей соответствуют трем координатным осям *X, U, V* оси которых расположены под углом 60° друг относительно друга. Одноименные плоскости сдвинуты на полшага друг относительно друга. Координаты связаны между собой следующими выражениями:

$$U = \frac{(X+Y)\sqrt{3}}{2}, V = \frac{(X-Y)\sqrt{3}}{2}, \quad (1)$$

откуда следует

$$X = U + V. \quad (2)$$

В разделе 1.6 описывается кремниевый детектор *SiDet*. Детектор *SiDet* основан на использовании кремния, полупроводникового материала. Станции *SiDet* содержали в себе модули. Каждый модуль имел 640 прямых стрипов (перпендикулярных к оси *X*) с одной стороны модуля и 640 наклонных

стрипов под углом 2.5° к прямым с другой стороны модуля. Шаг стрипов составляет 95 мкм для прямых X и 103 мкм для наклонных X' . Расчетное координатное разрешение составляет около 50 мкм для координат X и X' . Координата Y определяется выражением

$$Y = \frac{x - x'}{\operatorname{tg} 2.5^\circ} \quad (3)$$

и имеет расчетное координатное разрешение порядка 1.15 мм.

В разделе 1.7 описывается процедура определения заряда вдоль пучка в эксперименте *SRC* на установке *BM@N*.

В разделе 1.8 дается описание стандартного программного обеспечения эксперимента *BM@N - BmnRoot*.

Вторая глава подробно описывает алгоритмы реконструкции траекторий заряженных частиц, разработанных автором отдельно в системах камер *MWPC*, детекторов *SiDet*, а также алгоритм реконструкции глобальных треков, проходящих через две эти системы и процедуру математического выравнивания детекторов.

Раздел 2.1 описывает реконструкцию траекторий заряженных частиц в системе камер *MWPC* для экспериментов *BM@N* и *SRC* на установке *BM@N*. В случае конфигурации *BM@N* реконструкция выполнялась в одной паре камер до мишени [A3]. В случае реконструкции для эксперимента *SRC* на установке *BM@N* использовалось четыре камеры: две до (*Pair0*) и две после мишени (*Pair1*) [A2, A6]. Алгоритм реконструкции для *Pair0* и *Pair1* состоит из следующих этапов:

1. Реконструкция координат центров кластеров (хитов) в каждой плоскости X, U, V ;
2. Построение кандидатов в трек-сегменты внутри каждой камеры;
3. Фитирование трек-сегментов прямой линией;
4. Сшивка трек-сегментов между камерами.

В связи с большим количеством сработавших проволок на этапе 1 в каждой плоскости камеры в одном событии, алгоритм использовал дополнительно информацию о времени прихода сигнала с каждой проволоки. Временная информация, доступная в экспериментальных данных с помощью считывающей электроники, была использована для отделения срабатываний проволок при пролете реальных частиц от ложных шумов [A7]. Иллюстрация принципа работы двух различных алгоритмов формирования кластеров представлена на рис. 3.

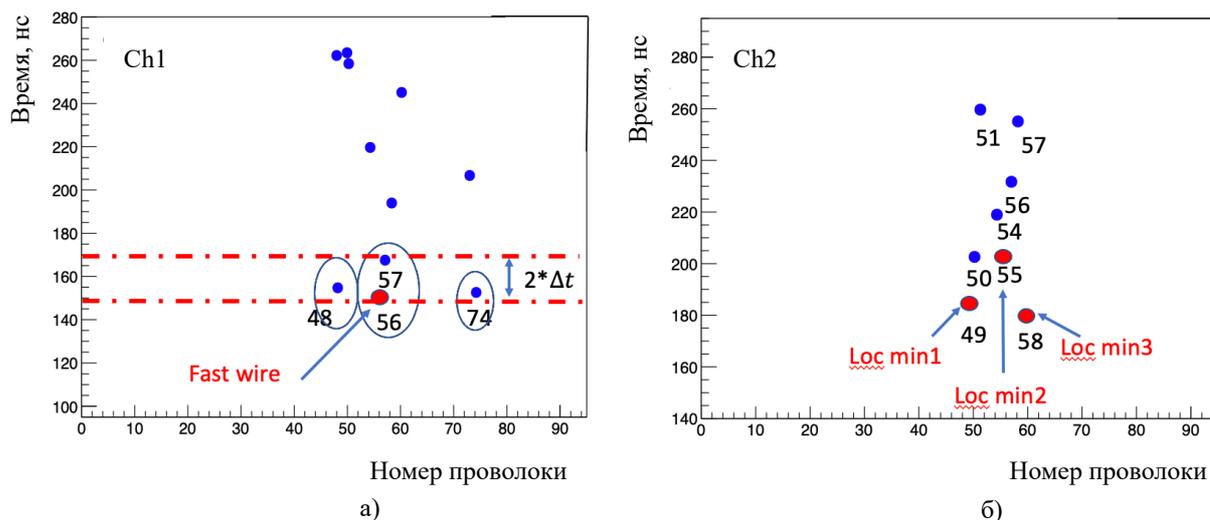


Рис. 3 – Пример формирования кластеров в камерах MWPC до (а) и после (б) мишени полученных при регистрации экспериментальных данных: вертикальная ось – время прихода сигнала на проволоки (нс), горизонтальная ось – номера проволок, штрихпунктирные линии – временное окно, в котором отбираются проволоки для формирования кластеров.

До мишени предполагалось искать один трек иона углерода, поэтому для этих камер в каждой плоскости выбиралась проволока с наименьшим временем (56-я на рис. 3а). Для обработки алгоритмом оставались также проволоки, которые попадают во временное окно $2 \cdot \Delta t$ ($\Delta t = 8 \text{ нс}$ – частота семплирования электроники), размер которого был подобран эмпирическим методом. Остальная информация из данного события не бралась в рассмотрение. В данном примере для дальнейшего рассмотрения остаются кластеры, сформированные из проволок 48, 56-57 и 74.

Главной целью реконструкции в камерах после мишени являлся поиск нескольких траекторий фрагментов в конечном состоянии реакции $^{12}\text{C}(p, 2p)\text{X}$. Алгоритм формировал кластеры из подряд сработавших проволок в пределах одной плоскости, после чего каждый кластер собирался по локальным минимумам времени прихода сигнала. Координатой кластера являлась координата проволоки с наименьшим временем, и она записывалась в хит (координата кластера = хит). Для примера на рис. 3б в хиты записываются координаты проволок 49, 55, 58, отмеченные красным. После нахождения координат в плоскостях камер в единицах проволочного шага, они пересчитывались в единицы длины (см) в глобальной системе координат.

Трек-сегмент является прямолинейным фрагментом траектории заряженной частицы внутри одной камеры *MWPC*. Трек-сегменты искались по совокупности хитов различных плоскостей в камере за одно событие. Кандидаты в трек-сегменты отбирались с помощью условия близости хитов в пространстве последовательно расположенных плоскостей камеры согласно уравнению (2).

Первая пространственная комбинация (геометрическая тройка) собиралась из трех хитов (x_1, u_1, v_1) в трех первых плоскостях X_1, U_1, V_1 , вторая пространственная комбинация (x_2, u_2, v_2) искалась в плоскостях X_2, U_2, V_2 как сопряженная к первой. Иллюстрация первой геометрической тройки представлена на рис. 4.

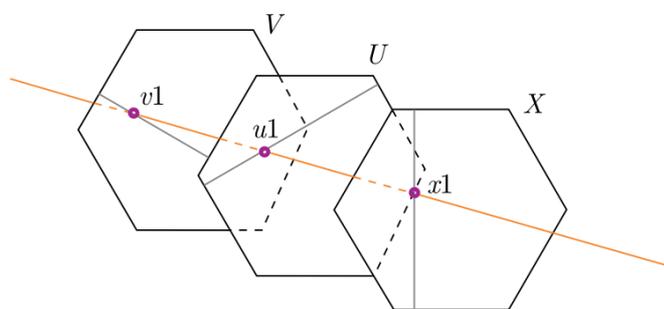


Рис. 4 – Пример формирования пространственной комбинации из хитов с координатами x_1, u_1, v_1 , составляющих геометрическую тройку в камерах *MWPC*.

В *MWPC(Pair1)* условие на формирование трек-сегмента требует минимум четыре хита по шести плоскостям одной камеры. В *MWPC(Pair0)*, где искался один трек-сегмент иона углерода, условие более строгое – минимум пять хитов в одной камере.

Далее трек-сегменты, отобранные на предыдущем этапе, фитировались прямой линией методом наименьших квадратов (МНК). При этом собранные ложные комбинации отсеивались по критерию χ^2 . В случае, если на этапе сборки сегментов имелись общие хиты, то отбирался кандидат с бóльшим количеством хитов или, если число хитов одинаково, лучший кандидат по наименьшему χ^2 .

Эффективность работы каждой плоскости *MWPC* определялась как отношение, где в знаменатель заносится количество реконструированных трек-сегментов, а в числитель количество хитов на плоскость, принадлежащих этому трек-сегменту, т.е. с помощью выражения:

$$Efficiency\ per\ layer = \frac{\sum_i^{Number\ of\ tracks} (1, \text{ if track hit on layer } i)}{Number\ of\ tracks}. \quad (4)$$

Средняя эффективность на слой для камер *MWPC* перед и после мишени составляет 94% и 98%, соответственно.

Отобранные трек-сегменты экстраполировались в среднюю плоскость между двумя камерами, принадлежащими одной паре $Z_m = \frac{Z_1 + Z_2}{2}$ (Z_1, Z_2 – координаты середин камер). Лучшие комбинации отбирались критерием:

$$\chi_{match}^2 = \frac{dx^2}{\sigma_x^2} + \frac{dy^2}{\sigma_y^2}, \quad (5)$$

где dx, dy – разницы между координатами проекций трек-сегментов в среднюю плоскость между камерами Z_m , а σ_i – полуширины распределений dx, dy . Параметры углов трек-сегментов не использовались для сшивки треков из двух камер из-за маленькой базы между плоскостями внутри камеры. Чтобы исключить случайные комбинации пар трек-сегментов, получившиеся треки проходили проверку на геометрическую область мишени.

Прошедшие отбор кандидаты в треки фитировались прямой линией по хитам из двух камер *MWPC*. Максимальное количество хитов на трек, проходящий через пару камер равно 12, минимальное – 8. Полученные таким образом треки записывались и использовались в дальнейшем для реконструкции объединенных треков перед магнитом. Качество полученных треков оценивалось на экспериментальных данных относительно другой детекторной системы. Эффективность восстановления треков в паре камер *MWPC (Pair0)* перед мишенью рассчитывалась относительно идентифицированных ионов углерода (C_{in}) в сцинтилляционных счетчиках *BC1* и *BC2* как отношение, где знаменатель — количество событий с зарегистрированным ионом углерода в *BC1* и *BC2*, а числитель — количество событий, содержащих, кроме этого, хотя бы один трек в *MWPC(Pair0)*:

$$\varepsilon_{MWPC(Pair0)} = \frac{N_{MWPC(Pair0)*C_{in}}}{N_{C_{in}}}. \quad (6)$$

Средняя эффективность реконструкции треков *MWPC(Pair0)* для ионов с зарядом 6 составила на экспериментальных данных $(92.2 \pm 0.1)\%$.

Эффективность восстановления треков *MWPC(Pair1)* оценивалась относительно наличия трека в пропорциональных камерах до мишени (*Pair0*) на событиях, в которых был идентифицирован ион углерода в счетчиках *BC1, BC2 (IonCut1)* и ион с зарядом 6 или 5 или 4 в счетчиках *BC3 и BC4 (IonCut2)*:

$$\varepsilon_{MWPC(Pair1)} = \frac{N_{MWPC(Pair1)*IonCut2*MWPC(Pair0)}}{N_{MWPC(Pair0)*IonCut1}}. \quad (7)$$

Эффективность восстановления $MWPC(Pair1)$ треков составила $(90.4 \pm 0.3)\%$ для не провзаимодействовавших в мишени ионов углерода, $(92.3 \pm 0.4)\%$ / $(92.6 \pm 0.5)\%$ для ионов бора / бериллия в конечном состоянии.

Раздел 2.2 описывает реконструкцию траекторий заряженных частиц в системе детекторов $SiDet$ [A2, A5]. Три станции $SiDet$ располагались между мишенью и анализирующим магнитом (рис. 2). Плоскости детекторов двух станций $Si-1/2$ находились в одном боксе на расстоянии 4 см друг от друга. Третья станция $Si-3$ была размещена на расстоянии 108 см от первых двух. В процессе набора данных считывающая электроника работала неоптимальным образом, поэтому был предложен алгоритм, учитывающий эти особенности. Алгоритм включает в себя следующие шаги.

Вычисление координат хитов в $SiDet$. Группа близкорасположенных последовательно сработавших стрипов одной плоскости X или X' , объединялись в кластеры. Координата центра кластера в плоскости называется хитом и рассчитывалась как центр тяжести ($CoG - centre of gravity$) амплитуд на стрипах данного кластера с помощью выражения:

$$CoG = \frac{\sum_{i=1}^n i * A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}, \quad (8)$$

где A_i - амплитуда сигнала со сработавшего i -го стрипа в отчетах аналого-цифрового преобразования (ADC), n - число стрипов в кластере.

Набор кандидатов в треки в системе $SiDet$.

С учетом неэффективности считывания стрипов X' алгоритм построения треков использовал не только пары хитов XX' в одной станции, но также хиты X или X' по-отдельности. Алгоритм поиска треков создан с учетом близости координат X и X' (угол между ними составляет всего 2.5°) в одной станции таким образом, что на начальном этапе набора сигналов для кандидата в треки использовались хиты X , затем подбирались к ним хиты X' (эффективность считывания которых ниже, чем X). Алгоритм напоминает метод слежения по треку с учетом двух условий:

- близость хитов в первых двух станциях в пределах 10 стрипов с учетом ширины кластера,
- после выбора хитов в третьей станции кандидат в треки должен проецироваться в область мишени с дополнительным допуском.

Варианты перебора хитов в системе *SiDet* представлены в таблице 1, а иллюстрация перебора представлена на рис. 5.

Таб. 1. Варианты перебора хитов для набора кандидатов в треки *SiDet* для эксперимента *SRC* на установке *BM@N*.

Вариант	Логика	Число хитов
I	Все измерения во всех плоскостях: $3X+3X'$	6
II	Нет одного измерения в Si-1 или Si-2	5
III	Нет одного измерения в Si-3	5
IV	Si-1 (X или X') + Si-2 (X или X') + Si-3($X+X'$)	4

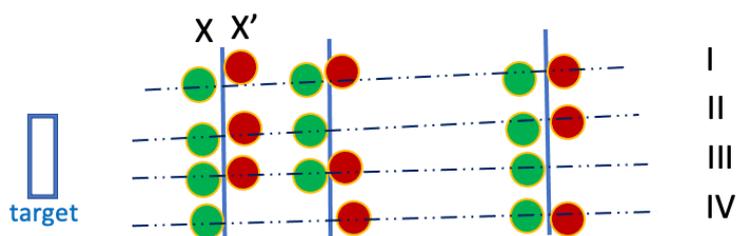


Рис. 5 – Иллюстрация возможных комбинаций в алгоритме набора трека *SiDet*: зеленым изображены хиты X -плоскостей, красным – хиты X' -плоскостей. Примеры возможных вариантов, перечисленных в таблице 1, обозначены римскими цифрами.

Большинство треков содержала шесть хитов, минимальное допустимое число хитов на трек – четыре. Не попавшие на треки хиты в дальнейшем могли быть использованы для построения объединённых треков с учетом информации от трек-сегментов *MWPC* (см. раздел 2.4).

Хиты X и X' , собранные в один трек-кандидат, фитировались по хитам прямой линией и имели параметры треков: свободный коэффициент (bx , by) и углы (ax , ay).

Лучшие из восстановленных треков отбирались по критерию χ^2 . Параметры полученного трека проверялись на геометрические размеры мишени с дополнительным допуском.

Внутренняя эффективность на плоскость для системы детекторов *SiDet* вычислялась как отношение, где в знаменатель заносилось количество реконструированных треков, а в числитель – количество хитов на плоскость, принадлежащих этому треку (4).

На экспериментальных данных средняя эффективность на плоскость для детекторов *SiDet* составила $\sim 94\%$ для X и 85% для X' стрипов.

Эффективность восстановления треков *SiDet* оценивалась относительно трека в пропорциональных камерах до мишени *MWPC(Pair0)* на событиях, в

которых был зарегистрирован ион с зарядом 6 в счетчиках $BC1, BC2$ ($IonCut1$) и ион с зарядом 6 или 5 или 4 в счетчиках $BC3, BC4$ ($IonCut2$):

$$\varepsilon_{SiDet} = \frac{N_{SiTrack} * MWPC(Pair0) * IonCut2}{N_{MWPC(Pair0) * IonCut1}}, \quad (9)$$

и в среднем составила $(81.5 \pm 0.7) \%$ для не провзаимодействовавших в мишени ионов углерода и $(82.6 \pm 0.7) \%$ для ионов бора конечного состояния. Пониженную эффективность можно объяснить невозможностью настройки электроники к определенной амплитуде сигнала, зависящего от заряда частиц, который в эксперименте был в широком диапазоне (от 1 до 6).

Раздел 2.3 описывает процедуру выравнивания детекторных систем до магнита.

Процедура математического выравнивания отдельных детекторов друг относительно друга в системах $SiDet$ и $MWPC$ имела один и тот же порядок действий. Выравнивание проходило на специально отобранных данных: использовались данные без мишени и треки с максимальным количеством хитов. Для $SiDet$ количество хитов равно 6, а для треков $MWPC$ – 12. Отбирались такие события, в которых заряд вдоль пучка до и после мишени $Z = 6$, полученный в сцинтилляционных счетчиках ($BC1-4$). В результате было выровнены детекторные системы $MWPC, SiDet$ относительно друг друга, а также система $Upstream$.

Раздел 2.4 посвящен реконструкции глобального $Upstream$ трека в системе координатных детекторов после мишени и до магнита. В результате были получены реконструированные траектории частиц остаточной ядерной системы до анализирующего магнита, проходящих через три $SiDet$ станции и две $MWPC$ камеры ($Pair1$) [A2, A5, A6].

Траектории частиц реконструировались по-отдельности в камерах $MWPC$ ($Pair1$) и детекторах $SiDet$ (см. разделы 2.2 и 2.3). Алгоритм реконструкции объединенного трека после мишени перед магнитом включал в себя следующие шаги.

Набор в трек-кандидаты.

1. Треки, восстановленные в детекторе $SiDet$, экстраполировались в среднюю плоскость между камерами $MWPC(Pair1)$. В этой плоскости ищались соответствия среди треков, проходящих через $MWPC(Pair1)$.

2. Реконструированные треки в $SiDet$, оставшиеся после первого шага, сопоставлялись с оставшимися трек-сегментами в отдельных камерах второй пары $MWPC$ ($Ch2$ и $Ch3$), которые остались после формирования треков через пару камер. Лучшее сочетание определялись минимальным значением следующего выражения:

$$\chi_{match}^2 = \frac{dx^2}{\sigma_x^2} + \frac{dy^2}{\sigma_y^2} + \frac{dax^2}{\sigma_{ax}^2} + \frac{day^2}{\sigma_{ay}^2}, \quad (10)$$

где dx, dy – разницы между координатами, dax, day – разницы между углами экстраполированных треков в среднюю плоскость Z_m , σ_i – полуширины распределений dx, dy, dax, day , соответствующие разбросу этих величин.

3. По оставшимся хитам в $Si-1/2$ и трек-сегменту в $MWPC (Ch2)$ искались сочетания из 4х хитов в $SiDet$ и оставшихся после предыдущих этапов трек-сегментов $MWPC(Ch2)$ с условием на геометрический размер мишени. Такие объединённые треки увеличивали геометрический аксептанс детекторной системы перед магнитом, т.к. чаще всего использованные хиты и трек-сегменты проходили по краям детекторов $Si-1/2$ и $MWPC (Ch2)$ и не попадали в $Si-3$ и $MWPC (Ch3)$.

Фитирование глобального трека перед магнитом.

При фитировании трека перед магнитом использовались хиты детектора $SiDet$, принадлежащие выбранному треку, а также параметры трек-сегментов или треков $MWPC (Pair1)$. Таким образом, максимальное количество хитов на трек равно 10 (6 хитов $SiDet$ + 4 хита – параметры из камер $MWPC$), а минимальное – 4 (2 хита $SiDet$ + 2 хита – параметры из камер $MWPC$).

Эффективность восстановления треков после мишени оценивалась относительно трека ионного пучка в пропорциональных камерах до мишени $MWPC(Pair0)$ аналогично формулам (7) и (9), однако в числителе суммировались случаи, когда был найден любой трек между мишенью и магнитом, то есть глобальный трек или его составляющие треки в $MWPC (Pair1)$ или $SiDet$:

$$\epsilon_{Upstream} = \frac{N_{[SiTrack \wedge MWPC(Pair1) \wedge Upstream]} * MWPC(Pair0) * IonCut2}{N_{MWPC(Pair0) * IonCut1}} \quad (11)$$

Эффективность восстановления глобальных треков учитывая их составляющие достигла: $(97.7 \pm 0.2) \%$ для ионов углерода, $(97.9 \pm 0.3) \%$ для ионов бора и $(97.7 \pm 0.3) \%$ для ионов бериллия в конечном состоянии.

В разделе 2.5 описывается процедура моделирования детекторных систем $MWPC$ и $SiDet$. Первым шагом в моделировании частицы протягивались от мишени через детекторы и материалы установки с учетом магнитного поля и всех физических эффектов, используя $BmnRoot$ на основе пакета $Geant4$. Простой генератор ионов использовался для тестирования детекторов и алгоритмов в идеальных условиях, а генератор физических

событий *DCM-SMM* (50 миллионов событий) – для реалистичного описания взаимодействия частиц.

Для частиц, прошедших через камеры *MWPC*, генерировались Монте-Карло (МК) точки в каждой из шести плоскостей, которые затем пересчитывались в номера ближайших проволок. Номера проволок, полученные таким образом, как и для экспериментальных данных, подавались на вход алгоритму реконструкции [A2]. Реалистичная эффективность отклика детектора моделировалась с помощью генератора случайных чисел [20] с равномерным распределением.

В отличие от камер *MWPC*, МК-точки от частицы, прошедшей через плоскость детектора *SiDet*, размывались по стрипам гауссовой функцией со стандартным отклонением 30 мкм для X стрипов и 35 мкм для X' стрипов, в соответствии с экспериментальными данными. Дальнейшая процедура реконструкции треков в детекторах *SiDet* являлась такой же, как и на экспериментальных данных [A2].

Эффективность алгоритма была оценена как отношение количества треков, восстановленных алгоритмом, к количеству сгенерированных треков. Эффективность алгоритма для различных систем детекторов относительно двух генераторов показана в таблице 2. Более низкую (96%) эффективность алгоритм имел для генератора *DCM-SMM*, что связано со сложной топологией сгенерированных физических событий. Также было выполнено моделирование исследуемой реакции $^{12}\text{C}(p,2p)X$, при котором рассматривались частицы, прошедшие через всю установку и зарегистрированные в детекторе *DCH*.

Таб. 2. Эффективность реконструкции треков на моделированных данных с использованием генераторов ион и *DCM-SMM* с заданной эффективностью хитов в детекторах 100%.

Генератор	<i>Ch2</i> [%]	<i>Ch3</i> [%]	<i>MWPC (Pair1)</i> [%]	<i>SiDet</i> [%]	<i>Upstream</i> [%]
<i>Ion</i> [^{12}C]	99.9	99.9	99.2	99.9	99.0
<i>DCM-SMM</i>	97.4	98.3	96.4	97.0	96.0

Третья глава описывает процедуру идентификации ионов конечного состояния для анализа исследуемых реакций: $^{12}\text{C}(p,2p)^{10}\text{B}$, $^{12}\text{C}(p,2p)^{10}\text{Be}$, $^{12}\text{C}(p,2p)^{11}\text{B}$. Методом многомерного фитирования (Multidimensional Fit, MDF) была выполнена аппроксимация набора измерений аналитической функцией, которая использовалась для оптимального сопоставления треков ионов до и после магнита на экспериментальных данных и оценки магнитной жесткости ионов P/Z , где P – полный импульс, а Z – полный электрический заряд иона. Метод *MDF* является встроенной функцией программного пакета *ROOT* и основывается на программе *FUMILI* [14]. На сегодняшний день метод *MDF*

широко используется в экспериментах ФВЭ, см., например, [21-22]. Идентификация ионов проводилась с дополнительным использованием информации о заряде в счетчиках ВС3-4 (см. рис. 2).

В разделе 3.1 описывается общий метод *MDF*. В основе *MDF* лежит принцип построения аналитической функции, позволяющий прямо вычислить искомую физическую величину на экспериментальных данных по геометрическим параметрам траектории ионов. Это общий математический метод поиска глобального минимума для сложной функции. В общем виде интересующая величина F записывается в виде суммы из L аналитических функций (в нашем случае использовались мономиалы) $f_l(c_l, \mathbf{x})$ с некоторыми коэффициентами c_l . F_j — известная интересующая величина, которая зависит от N наблюдаемых величин $\mathbf{x}_j = (x_{1j}, \dots, x_{Nj})$ в событии j . Аналитическое выражение для искомой величины будет искоматься в виде:

$$F_p(\mathbf{x}_j) = \sum_{l=1}^L c_l f_l(\mathbf{x}_j), \quad (12)$$

где $f_l(\mathbf{x}_j)$ - выбранное под измерения $F_j(\mathbf{x}_j) \pm \sigma_j$ в точках x_{1j}, \dots, x_{Nj} семейство аналитических функций, c_l – параметры, определяемые фитированием, L – число этих параметров и выбранных функций. Необходимо, чтобы аналитическая функция (F_p) как можно лучше описывала моделирование искомой величины, так, чтобы разница S была минимальна:

$$S = \sum_{j=1}^M (F_j(\mathbf{x}_j) - F_p(\mathbf{x}_j))^2 / \sigma_j^2 \rightarrow \min, \quad (13)$$

где M – число моделированных событий.

В результате минимизации S вычисляются параметры c_l для аналитического выражения интересующей величины (13).

Метод *MDF* используется для поиска двух скалярных функций F_p :

- для выравнивания систем координатных детекторов до и после магнита относительно друг друга подбиралась функция для угла трека в горизонтальной плоскости перед магнитом ($TX0$)
- для определения импульса ионов (с применением информации с зарядочувствительных ВС-счетчиков) подбиралась функция для определения магнитной жесткости ионов (P/Z) по двум прямолинейным участкам траектории до и после магнита.

В разделе 3.2 описывается процедура моделирования исследуемых реакций и работа с методом минимизации многопараметрического функционала *MDF*. При моделировании использовался простейший генератор ионов углерода, проходящих через детекторы *MWPC*, *SiDet* и *DCH* (без размывки измерений в этих детекторах) с учетом вещества, а также карта магнитного поля анализирующего магнита для тока 1800 А.

Треки моделировались с помощью метода Монте-Карло с большим разбросом по импульсам, начальному положению в плоскости XU и углам так, чтобы охватить геометрические размеры детекторов до магнита и размер зазора магнита. Метод MDF является итерационным, поэтому тренировочный набор событий должен быть репрезентативным и, следовательно, охватывать все возможные характеристики треков в терминах импульса, магнитной жесткости, геометрического аксептанса. Всего было смоделировано $M = 10^6$ первичных МК-треков ионов ^{12}C , начинающихся сразу за мишенью, которые были использованы в качестве обучающей выборки для метода. Число варьируемых параметров $L = 30$. Число наблюдаемых величин, которыми являлись геометрические параметры трека иона в одном событии $N = 10$: пять до магнита (положение X_0, Y_0, Z_0 и тангенсы углов TX_0, TY_0) и пять после магнита ($X_1, Y_1, Z_1, TX_1, TY_1$). F_j - известные величины TX_0 для первой функции и P/Z для второй, полученные из моделирования.

Аналитическая функция, полученная из MDF , для угла трека до магнита в горизонтальной плоскости TX_{0mdf} зависела от девяти переменных и определялась через мономиалы как $TX_{0mdf} = F_9 = \sum_{l=1}^{30} c_l \cdot f_l(X_0, Y_0, Z_0, TX_0, X_1, Y_1, Z_1, TX_1, TY_1)$. Функция TX_{0mdf} использовалась в дальнейшем для выравнивания координатных детекторных систем до и после магнита при условии $|TX_{0mdf} - TX_{0exp}| < 5\sigma$, так чтобы $|TX_{0mdf} - TX_{0exp}| \rightarrow \min$. Метод MDF обеспечил точность $\sigma \sim 0.7$ мрад (сравнение функции с моделированием) и $\sigma \sim 1.5$ мрад (сравнение функции с экспериментальными данными). После процедуры геометрического выравнивания систем детекторов были определены значения геометрических поправок для детекторной системы перед магнитом:

$$TX_0 = TX_0 + 8.4 \text{ мрад},$$

$$TX_1 = TX_1 + 9.2 \text{ мрад (DCH)},$$

$$X_0 = X_0 + 2.8 \text{ мм}.$$

Аналитическая функция для магнитной жесткости иона P/Z_{mdf} , полученная методом MDF , зависела от десяти переменных и определялась через мономиалы как $P/Z_{mdf} = F_{10}(X_0, Y_0, Z_0, TX_0, TY_0, X_1, Y_1, Z_1, TX_1, TY_1) = \sum_{l=1}^{30} c_l \cdot f_l(X_0, Y_0, Z_0, TX_0, TY_0, X_1, Y_1, Z_1, TX_1, TY_1)$. На рис. 6а показана корреляция функции P/Z_{mdf} , полученной с помощью MDF , и функции P/Z_{track} из моделирования. Разница между ними ухудшается с ростом P/Z_{track} , что видно из рис. 6в. На рис.6б представлена разница $P/Z_{track} - P/Z_{mdf}$, характеризующаяся точностью $P/Z_{mdf} \sim 0.06$ ГэВ/с/заряд (без учета разрешений детекторов). Распределение магнитной жесткости сгенерированных треков представлено на рис. 6г. Диапазон от 4 ГэВ/с до 12 ГэВ/с соответствует

равномерному распределению по импульсу для ионов углерода от 2 ГэВ/с/нуклон до 6 ГэВ/с/нуклон.

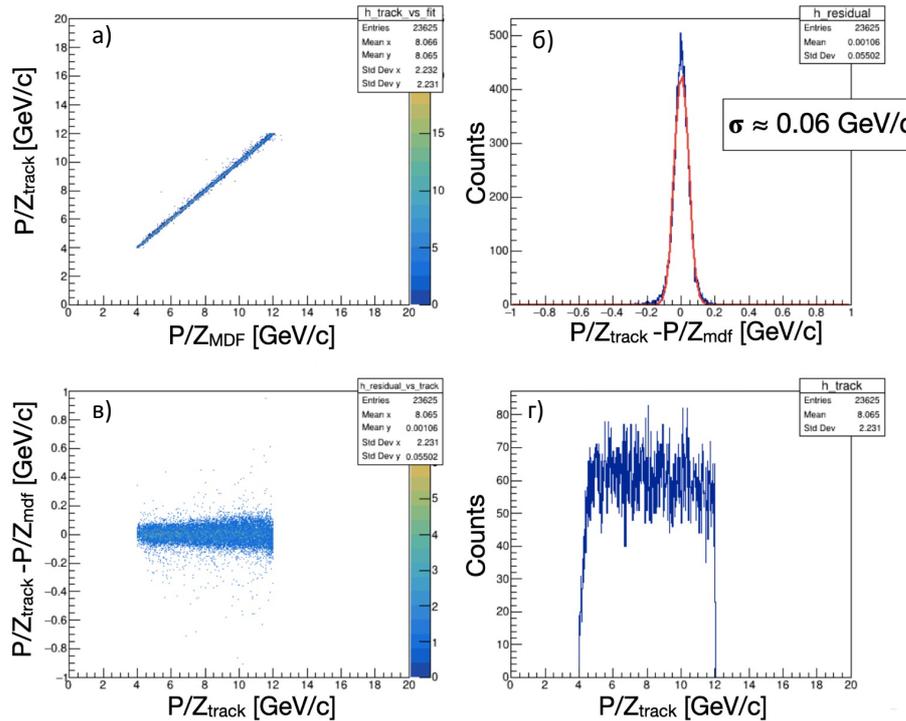


Рис. 6 – Соответствие функции P/Z_{track} из моделирования и P/Z_{mdf} (а) и полученная точность восстановления для P/Z_{mdf} (б). Разница $(P/Z_{\text{track}} - P/Z_{\text{mdf}})$ относительно P/Z_{track} (в) и распределение P/Z_{track} после размывания (г).

В разделе 3.3 описано применение MDF к экспериментальным данным.

Траектории частиц реконструировались с помощью системы детекторов перед магнитом *Upstream* (*Track point 0*) и детекторов после магнита *DCH* (*Track point 1*) [12]. В качестве «*Track point 0*» в моделировании могли быть треки: либо *Upstream*, либо *MWPC(Pair1)*, либо *SiDet*. На рис. 7 показана упрощенная схема траекторий ионов в плоскости O_{XZ} и переменные, которые в дальнейшем использовались в *MDF*.

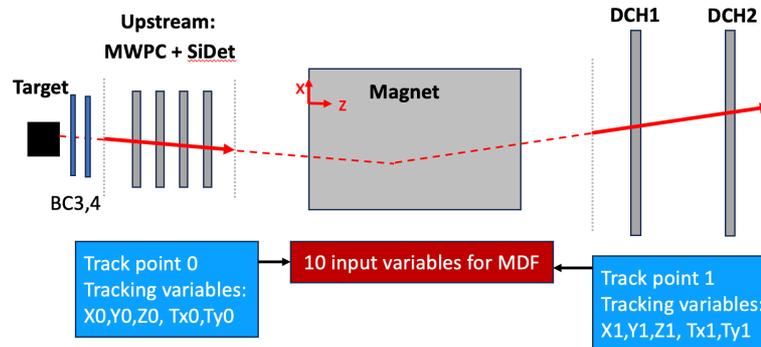


Рис. 7 – Упрощенная схема траекторий ионов, используемых для *MDF*.

В разделе 3.4 приводятся результаты численного анализа, полученные на экспериментальных данных с помощью *MDF* метода. Для проверки результатов выравнивания детекторных систем до и после анализирующего магнита друг относительно друга был реконструирован импульс пучка из Нуклотрона на данных без мишени и оценено его разрешение (рис. 8а). Точность восстановления импульса dP/P (распределение профитировано в пределах 2.2σ , отношение сигнал/шум = 10) составила 1.46%. Полученное значение демонстрирует, что выравнивание детекторных систем до и после магнита относительно друг друга выполнено корректно, т.к. воспроизводится номинальное значение импульса пучка с Нуклотрона с точностью 0.7 ГэВ/с. Полученный результат можно сравнить с оценками импульсного разрешения с использованием других детекторных систем: с помощью центрального трекера *GEM* импульсное разрешение пучка составило 4-5 % [23], а простое вычисление по углу поворота в магните с использованием *MWPC* и *DCH* привело к импульсному разрешению $\sim 2\%$ [24]. В последнем случае не учитывается выравнивание детекторов относительно карты магнитного поля.

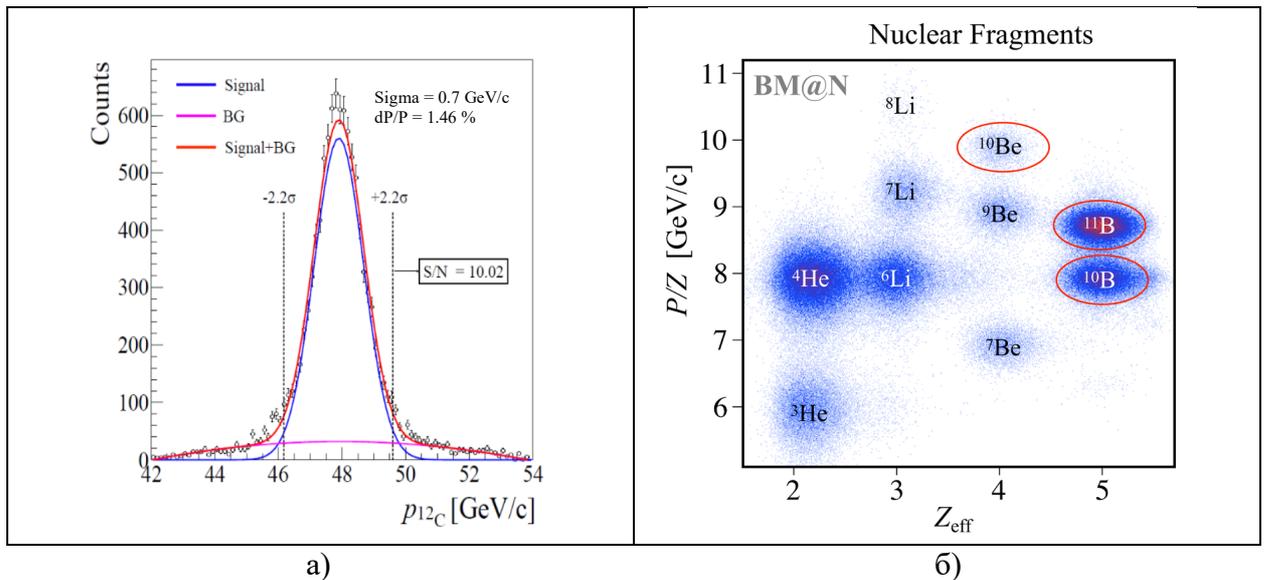


Рис. 8 – Импульс пучка ^{12}C на экспериментальных данных без мишени, определенный методом *MDF*, фитированный суммой функции Гаусса и полинома второй степени (а) и распределение величины P/Z , полученной с помощью метода *MDF* относительно информации о заряде иона Z_{eff} , полученной со сцинтилляционных счетчиков *BC3-4* на экспериментальных данных (б). Красным показаны ионы, рассмотренные в анализе.

Была выполнена идентификация ионов конечного состояния ^{11}B , ^{10}B , ^{10}Be с помощью магнитной жесткости P/Z , полученной с помощью метода *MDF*, и заряда Z_{eff} , полученного из сцинтилляционных счетчиков *BC3-4*, на экспериментальных данных. Выделенные красным ионы (рис. 8б) — реакции, выбранные для анализа [A4]. Статистическая ошибка эффективности

реконструкции треков определялась эффективностью идентификации заряда в счетчиках *BC3-4*. Систематическая ошибка реконструкции треков определялась как отношение фона к суммарному числу входов в гистограмму из распределения *P/Z*. Оценена эффективность реконструкции треков через всю установку *SRC* на установке *BM@N* для не провзаимодействовавших ионов ^{12}C , которая составила 39.5 ± 1.7 (стат.) ± 2.6 (сист.)%. В диссертации перечислены основные физические результаты, полученные с помощью реконструированных ионов ^{11}B , ^{10}B , ^{10}Be .

В Заключение диссертации представлены результаты работы по разработке методов, алгоритмов и программного обеспечения для реконструкции траекторий заряженных частиц и идентификации ионов в рамках эксперимента *SRC* на установке *BM@N*, на базе ускорительного комплекса *NICA* в ОИЯИ, Дубна. Основные достижения включают разработку эффективных алгоритмов для различных детекторных систем (*MWPC* и *SiDet*). Эффективность реконструкции траекторий заряженных частиц перед магнитом составила 98%. Разработаны и успешно внедрены комплексы программ, которые подтверждены соответствующими испытаниями на моделированных и экспериментальных данных. Метод многомерного фитирования (MDF) был применен на экспериментальных данных, что позволило произвести идентификацию ионов конечного состояния в анализе экспериментальных данных. Разработанные методики способствуют изучению нуклон-нуклонных корреляций и квазиупругих рассеяний исследуемых реакций. Все разработки были интегрированы в стандартное программное обеспечение эксперимента *BmnRoot* и доступны для использования. Благодаря проделанной работе успешно выполнен анализ физических данных эксперимента *SRC* на установке *BM@N* набранных в 2018 году.

Список публикаций автора по теме диссертации

- A1. Lenivenko V., Palichik V., Patsyuk M., Reconstruction of simulated and experimental data in coordinate detector systems of SRC experimental setup at *BM@N* // *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2023, v. 20, No. 6, p. 1403–1408.
- A2. Lenivenko V., Patsyuk M., Palichik V., SRC at *BM@N*: reconstruction of tracks upstream and downstream the target using the *MWPC* and Silicon detector systems // *AIP Conference Proceedings*, 2021, v. 2377, p. 030010.

- A3. Lenivenko V., Palichik V., Reconstruction of Charged-Particle Trajectories in Multiwire Proportional Chambers at the BM@N Experiment // *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2018, v. 15, p. 637-649.
- A4. Patsyuk M., Kahlbow J., Laskaris G., Duer M., Lenivenko V., et al., Unperturbed inverse kinematics nucleon knockout measurements with a carbon beam // *Nature Physics*, 2021, v.17, p. 693-699.
- A5. Patsyuk M., Atovullaev T., Corsi A., Hen O., Johansson G., Kahlbow J., Lenivenko V., et al., BM@N data analysis aimed at studying SRC pairs: one-step single nucleon knockout measurement in inverse kinematics out of a 48 GeV/c ^{12}C nucleus // *Physics of Particles and Nuclei*, 2021, v. 52, p. 631–636.
- A6. Galavanov A., Khabarov S., Kirushin Y., Kulish E., Lenivenko V., et al., Studies of Short-Range Correlations in inverse kinematics at BM@N at the NICA facility // *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, v. 1390, p. 012025.
- A7. Khabarov S., Kulish E., Lenivenko V., Makankin A., Maksymchuk A., Palichik V., et al., First glance at the tracking detectors data collected in the first BM@N SRC run // *EPJ Web of Conferences*, 2019, v. 201, p. 04002.

Список литературы

1. Kapishin M., The fixed target experiment for studies of baryonic matter at the Nuclotron (BM@N) // *Eur. Phys. J. A* 52 213, 2016.
2. *NICA White Paper* – <https://nica.jinr.ru/files/WhitePaper.pdf>.
3. Azhgirey L.S. et al, *ZhETP*, 33, 1185, 1957.
4. Ажгирей Л.С., и др., Взаимодействие протонов с атомными ядрами при энергии 660 МэВ и внутриядерное распределение импульсов нуклонов, Препринт ОИЯИ, Р-270, 1959.
5. Балдин А.М., и др., Наблюдение пионов высокой энергии при столкновении релятивистских дейтронов с ядрами, Препринт ОИЯИ, Р1-5819, 1971.
6. Atti C. C., In-medium short-range dynamics of nucleons: Recent theoretical and experimental advances // *Phys. Rept.* 590, 1, 2015.
7. Hen O., Miller G. A., Piassetzky E., Weinstein L. B., Nucleon-nucleon correlations, short-lived excitations, and the quarks within // *Rev. Mod. Phys.* 89, 045002, 2017.

8. Feldmeier H., Horiuchi W., Ne T., Suzuki Y., Universality of short-range nucleon-nucleon correlations // *Phys. Rev. C* 84, 054003, 2011.
9. Sauli F., Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers, // CERN-77-09, 1977.
10. Kovalev Yu., Kapishin M., Khabarov S., Shafronovskaia A., Tarasov O., Makankin A., Zamiatin N., Zubarev E., Central tracker for BM@N experiment based on double side Si-microstrip detectors // *JINST*, 12 C07031, 2017.
11. Zinchenko D., Nikonov E., Zinchenko A., Zinchenko R., Development of the Vector Finder Toolkit for Track Reconstruction in the BM@N Experiment // *Phys. Part. Nuclei Lett.* 21, N 3, 544, 2024.
12. Palichik V., Voytishin N., Reconstruction of Simulated and Experimental Data in the Drift Chambers of the BM@N Experiment, *Phys. Part. Nuclei Lett.* 19, 501–504, 2022.
13. *MDF method* – <https://root.cern.ch/doc/master/classTMultiDimFit.html>.
14. Silin I.N., CERN Program Library, D510, FUMILI, 1983.
15. Eadie W., Gryard D., James F., Roos M., Sadoulet B., Статистические методы в экспериментальной физике, Атомиздат, Приложение 3, стр. 319-326, 1976.
16. Batyuk P., Gertsenberger K., Merts S., Rogachevsky O., The BmnRoot framework for experimental data processing in the BM@N experiment at NICA // *EPJ Web Conf.*, 214, 2019.
17. Benmokhtar F. et al., Measurement of the He-3(e,e-prime p)pn reaction at high missing energies and momenta // *Phys. Rev. Lett.* 94, 082305, 2005.
18. Geant4 – <https://geant4userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/fo/BookForApplicationDevelopers.pdf>
19. Baznat M., Botvina A., Musulmanbekov G., Toneev V., Zhezher V., Monte-Carlo generator of heavy ion collisions DCM-SMM // *arxiv:1912.09277v2*, 2019.
20. Knuth D. E., *The Art of Computer Programming, Seminumerical Algorithms* // Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2, 1997.
21. Basilev S. N. et al., Measurement of neutron and proton analyzing powers on C, CH, CH₂ and Cu targets in the momentum region 3–4.2 GeV/c // *Eur. Phys. J. A* 56:26, 2020.

22. Selyugin O. V., Anomaly in the differential cross sections at 13 TeV // Modern Physics Letters A, V. 36, No. 18, 2021
23. Driuk A., Merts S., Nemnyugin S., Global Tracking in the BM@N Experiment, ISSN 1063-7796, Physics of Particles and Nuclei, Vol. 53, No. 2, pp. 552–555, 2022.
24. Kapishin M., Lenivenko V., Palichik V., Pokatashkin G., Rufanov I., Vasendina V., Voytishin N., Zinchenko A., Tracking system performance of the BM@N experiment, EPJ Web of Conferences 214, 02021, 2019.