

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

На правах рукописи

БУРИЕВ Назиржон Ташпулатович

Б 912

ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕШЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ВОПРОСОВ СОЗДАНИЯ УСТАНОВКИ
"СЛОН" И МЕТОДИКИ ОБЛУЧЕНИЯ ЯДЕРНЫХ ФОТОЭМУЛЬСИЙ В СИЛЬНОМ
МАГНИТНОМ ПОЛЕ НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ЛВЭ ОИЯИ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико - математических наук

Научные руководители

доктор физико-математических наук,

профессор

ТОЛСТОВ Константин Дмитриевич

кандидат технических наук,

старший научный сотрудник

КОВАЛЕНКО Александр Дмитриевич

Дубна 1989

Объединённый институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

с. ф. 1541

2.1.3	Требуемая пространственная однородность и временная стабильность магнитного поля.....	41
2.1.4	Условия облучения.....	50
2.2	Общее описание функциональной схемы установки и требования к её системам.....	52
2.2.1	Функциональная схема.....	54
2.3	Система синхронизации.....	57
2.3.1	Функциональная схема.....	58
2.3.2	Принцип работы и основные характеристики.....	60
2.4	Система стабилизации зарядного напряжения накопителя энергии.....	63
2.4.1	Методическое решение.....	65
2.4.2	Программатор зарядного устройства.....	67
2.4.3	Формирователь уровней стабилизации.....	70
ГЛАВА III	РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР НА КАНАЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ.....	77
Введение.....		77
3.1	Основные требования к пучку и системам контроля его параметров.....	77
3.2	Выбор методики контроля параметров пучка.....	78
3.2.1	Обзор различных методов.....	79
3.2.2	Приборы с зарядовой связью (ПЗС), основные области применения.....	83
3.2.3	ПЗС в системах контроля параметров пучков заряженных частиц.....	86
3.3	Разработка системы контроля профиля и пространственного положения пучка.....	89
3.3.1	Функциональная схема системы.....	90

3.3.2	Разработка цифровой передающей телевизионной камеры на основе ПЭС.....	92
3.3.2.1	Оптимизация режима работы ПЭС.....	94
3.3.2.2	Принципиальная схема ПТК на основе ПЭС.....	96
3.3.3	Передача оптического изображения на ПЭС.....	101
3.3.4	Расчёт, конструкция и изготовление мишени.....	104
3.3.4.1	Выбор сцинтиллятора.....	104
3.3.4.2	Оценка пороговой интенсивности пучка.....	109
3.3.4.3	Конструкция мишени.....	111
3.4	Результаты испытаний.....	113
ГЛАВА IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВОГО МЕТОДИ- ЧЕСКОГО СЕАНСА ПО ОБЛУЧЕНИЮ ФОТОЭМУЛЬСИЙ.....		116
4.1	Условия проведения сеанса.....	116
4.1.1	Рабочие параметры модуля установки и магнитного поля.....	116
4.1.2	Основные характеристики пучка.....	117
4.2	Результаты предварительного просмотра фото- эмульсионных пластин.....	119
4.3	Выводы.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....		124
ЛИТЕРАТУРА.....		127

ВВЕДЕНИЕ

Ускорение на синхрофазотроне ОИЯИ в Дубне ионов до энергии соответствующих нескольким ГэВ на нуклон, позволило начать планомерное изучение в лабораторных условиях столкновений релятивистских ядер и возникающих при этом явлений и закономерностей, характеризующих состояние высоковозбуждённой ядерной материи. Исследование свойств ядерной материи и частиц, рождённых в подобных экстремальных условиях, представляет значительный научный интерес, связанный прежде всего с поиском эффектов многонуклонного взаимодействия, коллективных свойств ядерной материи, проявлением кварковых степеней свободы. Экспериментальное обнаружение подобного рода эффектов невозможно без понимания механизма взаимодействия, без детального изучения характеристик процессов фрагментации и множественного рождения частиц в ядро-ядерных соударениях.

С увеличением энергии ускоренных ядер до $3 \div 4$ ГэВ/нуклон, когда по современным представлениям протон-нейтронная модель ядра не в состоянии описать все особенности взаимодействия и требуется учитывать кварк-глюонные степени свободы, информация о ядерных процессах расширяет наши знания о строении адронов, и в свою очередь исследование элементарных частиц способствует пониманию структуры ядер. Таким образом в этой области энергий тесно увязываются проблемы релятивистской ядерной физики с проблемами современной теории сильных взаимодействий — квантовой хромодинамики.

Вопрос о проявлении различных коллективных механизмов ядерных взаимодействий при высоких энергиях относится к наиболее интересным проблемам релятивистской ядерной физики. Для их решения очевидно, необходимо получить значительный объём экспериментальной информации о самых разнообразных характеристиках таких соударений, особенно в мало исследованных процессах множественного

рождения частиц во взаимодействиях релятивистских тяжёлых ионов с достаточно большими значениями массового числа ядра-снаряда.

Ядерная фотоэмульсия, представляющая собой одновременно 4π детектор и мишень с набором целого ряда ядер, в силу наиболее высокого по сравнению с другими, имеющимися в настоящее время методиками, пространственного разрешения (~ 1 мкм), позволяет исследовать указанные проблемы, однако необходимо проводить измерения импульсов вторичных частиц с высокой точностью и надёжно идентифицировать их по зарядам и массам в широком интервале энергий. Эта задача может быть решена только с применением сильных магнитных полей для фотоэмульсионной методики.

Эксперименты по облучению ядерных фотоэмульсий в магнитном поле предпринимались и ранее в различных лабораториях, однако либо из-за недостаточной амплитуды магнитного поля, либо из-за малости объёма, в котором оно формировалось, не было достигнуто и реализовано желаемых преимуществ данной методики.

Особый интерес к созданию установки, способной обеспечить проведение такого эксперимента с возможностью реализации преимуществ данной методики, объясняется желанием получения уникальной информации о процессах взаимодействия релятивистских ядер и возможностью проведения статистического анализа отдельного события с числом вторичных частиц достигающим нескольких сотен, сохраняется и по настоящее время.

На протяжении последних лет в Лаборатории высоких энергий Объединённого института ядерных исследований ведётся сооружение установки (проект СЛОН), предназначенной для изучения ядерных взаимодействий при высоких энергиях методом фотоэмульсий облучённых в сильном магнитном поле пучками релятивистских ядер, выводимыми из синхрофазотрона ОИЯИ.

Настоящая диссертация посвящена исследованию, разработке реализации методики облучения ядерных фотоэмульсий в сильном магнитном поле и некоторым вопросам создания экспериментальной установки СЛОН на канале вывода пучков релятивистских частиц ядер синхрофазотрона ОИЯИ.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения.

В первой главе проведено исследование методики применения сильных импульсных магнитных полей для фотоэмульсионного метода исследования процессов взаимодействия релятивистских ядер. Изложено методическое и физическое обоснование разработки и создания экспериментальной установки, приведены результаты теоретических расчётов точностей измерения импульсов вторичных заряженных частиц и идентификация их и фрагментов ядер по магнитной кривизне трека в фотоэмульсии, ожидаемых при реализации эксперимента на синхрофазотроне ОИЯИ.

Во второй главе излагаются вопросы связанные с определением основных параметров установки и условиями проведения эксперимента, необходимыми для реализации преимуществ данной методики по сравнению с традиционной, разработкой и исследованием некоторых методических и схемных решений, связанных с созданием отдельных систем и элементов (общая функциональная схема установки, система синхронизации, система стабилизации зарядного напряжения накопителя энергии и её элементы и др.) установки, способствующих её реализации в целом.

В третьей главе отражены вопросы исследования и разработки систем контроля параметров пучка и его пространственного положения в канале облучения установки СЛОН. Описана разработанная цифровая передающая телевизионная камера на основе матричного прибора с зарядовой связью, впервые предложенная для целей кон-

троля параметров пучка заряженных частиц с оптическим съёмом информации с поверхности мозаичной спинтилляционной мишени специальной конструкции. Приведены пороговые интенсивности пучков для различных ядер, начиная с которых система позволяет контролировать их параметры, и результаты испытания созданной телевизионной камеры.

В четвёртой главе приведены технические параметры установки СЛОН, полученные при комплексной наладке и экспериментальном пуске первой очереди установки и результаты предварительной обработки и анализа экспонированных фотоэмульсий при проведении первого методического сеанса по облучению ядерных фотоэмульсий размерами $1,5 \times 1 \times 10 \text{ см}^3$ на установке СЛОН пучками релятивистских протонов с импульсом 6 ГэВ/с. Рассмотрены основные направления развития установки СЛОН и перспективы её применения для исследования взаимодействий релятивистских ядер на синхрофазотроне ОИЯИ.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты, полученные в диссертации.

Результаты положенные в основу диссертации докладывались на научных семинарах ЛВЭ ОИЯИ и Таджикского госуниверситета имени В.И.Ленина, на совещаниях международного сотрудничества по исследованиям с помощью ядерных фотоэмульсий (ФЭК ОИЯИ), представлялись на научно-технической конференции молодых учёных и специалистов Тадж.ССР (Душанбе, 1989), на пятой международной конференции по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам (Новосибирск, 1989) и опубликованы в журналах, материалах конференций и изданиях ОИЯИ.

Г Л А В А I

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРИМЕНЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ФОТОЭМУЛЬСИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Введение

Ионизация вещества под действием заряженных частиц — явление исключительное по своей важности для экспериментальной ядерной физики и физики высоких энергий. Именно благодаря ему удалось открыть радиоактивность, зарегистрировать следы ядерных частиц и расщепления атомных ядер, обнаружить космическое излучение, положив тем самым начало современной науке о строении вещества. Совершенствование техники эксперимента, сопровождавшееся созданием принципиально новых ионизационных детекторов и методов измерений, позволило в дальнейшем открыть богатейший мир элементарных частиц, исследование которого продолжается вот уже почти столетие.

Явление ионизации вещества лежит в основе действия большинства детекторов заряженных частиц, которая движется со скоростью v , близкой к скорости света c , теряет в детекторе менее 10^{-12} Дж на 1 г/см^2 вещества. Чтобы преобразовать столь ничтожное количество энергии в макроскопический сигнал, необходим соответствующий механизм усиления. Оно достигается за счёт лавинообразного процесса в метастабильной рабочей среде детектора (камера Вильсона, диффузионная или пузырьковая камеры, ядерная фотоэмульсия), либо под действием ускоряющего электрического поля внутри детектора (газоразрядные счётчики, пропорциональная, искровая и стримерная камеры) и или благодаря внешнему электронному устройству — усилителю, фотоэлектронному умножителю и т.п. (ионизационная камера, пропорциональные, сцинтилляционные, полупроводниковые и черенковские детекторы).

Ионизационные измерения, вообще говоря, позволяют определить лоренц-фактор частицы. Чтобы определить массу частицы с известным зарядом z , нужно знать другую характеристику, например импульс p или энергию E , которые измеряют по энергосвыделению в спектрометрах полного поглощения или по отклонению в магнитном поле.

Современные ионизационные детекторы — многопроволочные пропорциональные и дрейфовые, пузырьковые и стримерные камеры, а также ядерные фотоэмульсии помещённые в магнитное поле позволяют одновременно измерять ионизационную способность, координаты и импульс частицы, что позволяет реконструировать пространственную картину взаимодействия и производить полный кинематический анализ события. Тем самым многие детекторы, хотя и имеют ограниченную область использования, обеспечили себе прочное место в экспериментальной физике высоких энергий и их широкое применение можно прогнозировать на длительную перспективу.

Но, качество и полнота анализа в прямой зависимости от точности измерений и от индивидуальных возможностей детекторов, которые заключаются в их способности прецизионно измерять координаты траекторий, импульсы и ионизирующую способность одновременно большого числа частиц и в широком интервале их значений. По этой причине многие действующие и проектируемые крупномасштабные экспериментальные установки, предназначенные для работы на ускорителях высоких энергий, используют гибридные идентификаторы частиц включающие в себя большое число и разнообразие детекторов, позволяющие получать наиболее полную информацию о процессе взаимодействия.

Продолжаются интенсивные работы по автоматизации съёма информации и обработке данных, а также по дальнейшей модернизации самих методик. В этом плане значительный интерес представляет

метод ядерных фотоэмульсий, облучённых в сильном магнитном поле, обладающий наиболее высоким пространственным разрешением и возможностью регистрации частиц в 4 π -геометрии.

I.1 Ядерная фотоэмульсия - 4 π детектор заряженных частиц

Одним из значимых событий в становлении фотоэмульсионного метода является применение стопки безподложечных фотоэмульсий из нескольких слоёв. Впервые это было сделано Киношitou в 1910 году при регистрации α -частиц ^{/1/}. После облучения эмульсионные слои были наклеены на стеклянные пластинки, предварительно покрытые слоем желатины для улучшения качества последующей обработки. В целом этот новаторский способ был развит и усовершенствован более поздними работами как в Советском Союзе, Л.В.Мысовским изготовившим толстослойные ядерные эмульсии в 1927 году ^{/2/}, так и зарубежом и в настоящее время составляют основу фотографического метода.

Изготовление концентрированных эмульсий с большим содержанием бромистого серебра, высокой чувствительностью и мелким зерном (диаметр зёрен, способных к проявлению под действием нескольких квантов $0,1 \div 0,4$ мкм), совершенствование обработки эмульсионных слоёв позволило использовать фотографические эмульсии как высококачественный детектор заряженных частиц с объёмной регистрацией пригодной для получения информации о массе, энергии, взаимодействиях и распадах частиц. На протяжении более 60 лет ядерные фотоэмульсии успешно применяются для регистрации и анализа следов заряженных частиц в широком диапазоне энергий. Для иллюстрации достоинств и возможностей фотоэмульсионной методики имеет смысл перечислить её основные свойства и достоинства.

Прежде всего - эффект накопления событий, высокое простран-

ственное разрешение, высокая чувствительность к ионизирующему излучению, регистрация заряженных частиц в 4 π -геометрии, использование фотоэмульсий как мишени и детектора одновременно. Присутствие в составе эмульсии двух групп ядер, лёгких (C, O, N) и тяжёлых (Ag, Br, Pb), позволяющие одновременно наблюдать события на разных ядрах, зарегистрированные в одинаковых условиях, относительная простота и низкая себестоимость изготовления и обработки эмульсионных камер, возможность применения фотоэмульсии различных размеров, от самых малых (доли см³), до крупных (блоки объёмом до 5 · 10⁴ см³).

Органическая основа и светочувствительная компонента эмульсии имеют сложный элементный состав, при этом практически значимыми по концентрации являются атомы Ag, Br, H, C, N, O. В связи с этим всю совокупность наблюдаемых событий принято подразделять на взаимодействия с тяжёлыми (Ag, Br) и лёгкими (C, N, O) ядрами со средними характеристиками:

$$\begin{aligned} \langle A \rangle_{Ag, Br} &= 94; & \langle \xi \rangle_{Ag, Br} &= 41; \\ \langle A \rangle_{C, N, O} &= 14; & \langle \xi \rangle_{C, N, O} &= 7, \end{aligned}$$

выделив предварительно по общепринятым критериям /3/ столкновения со свободными протонами. Двигущаяся в эмульсии частица ионизирует атомы, что способствует восстановлению некоторого количества атомов серебра в кристаллах галоида и образованию скрытого изображения в виде цепочек зёрен на следе частицы. При этом, зёрна на следе, принадлежащем частице высокой энергии в обработанной эмульсии, оказываются расположенными на одной прямой с точностью до долей микрона /1/. Пространственное разрешение эмульсии как детектора на сегодняшний день является рекордным и составляет ~1 мкм для высокочувствительных эмульсий типа БР-2. Последние характеризуются чувствительностью 28 ± 30 зёрен на 100 мкм следа к ливне-

вым частицам с минимальной ионизирующей способностью.

В настоящее время развиты гибридные методы, т.е. способные совмещать в одной экспериментальной установке фотоэмульсии с другими методиками. Возможность многообразных измерений, точность которых большей частью может быть доведена до высокой степени: углов между следами, длин пробегов, ионизации (плотности зёрен, плотности сгустков, разрывов, ширины следа, плотности числа дельта-электронов и другие) многократного рассеяния. Определение зарядов, масс и энергии частиц в широком интервале их значений.

Благодаря перечисленным свойствам использование фотоэмульсий в экспериментах по физике высоких энергий и ядерной физике на протяжении десятков лет не теряют актуальности.

Однако, фотоэмульсионному методу, как и любому другому методу присуще и недостатки. Основными недостатками метода фотоэмульсий является трудоёмкость обработки зарегистрированных событий, просмотра фотоэмульсионных слоёв (поиск событий) и измерений. В конечном счёте это приводит к трудности набора большой статистики и исследованию редких процессов. С целью преодоления этого рода трудностей, в последние годы широко применяются ЭВМ для подсчёта результатов, при измерениях стали использоваться полуавтоматические приборы типа МПЭ-11 и "ЭМУЛЬСИОН" /4/. В ФИАН разработана автоматизированная система "МИКРОН" /5/, предназначенная для поиска, измерений и обработки событий в ядерной фотоэмульсии.

Активно ведутся исследования с целью придания ядерным фотоэмульсиям новых свойств и уже получены первые результаты - ядерные фотоэмульсии с управляемой чувствительностью /6/, в которой авторам удалось добиться 50 кратного увеличения плотности трека при управлении электрическим импульсным полем напряжённостью $\sim 10^6$ В/см.

В силу своей неуправляемости, фотозумульсии в настоящее время не в состоянии обеспечить решение ряда задач, возникающих в физике высоких энергий. Однако, есть основания предполагать, что всегда будут существовать задачи, решение которых предпочтительнее методом фотозумульсий. В связи с этим уместно отметить, что с помощью фотозумульсий в прошедшие годы были выполнены многие известные работы: открытие π^\pm -мезонов с последующим их распадом на мюоны /7/, K^\pm -мезонов /1/, Σ^+ -гиперона /8/, гиперядер содержащих λ^0 -частицы /9/, очарованные частицы /10/ и многие другие.

1.1.1 Применение ядерных фотозумульсий в исследованиях по физике высоких энергий

Получение в 1970 году на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ (г. Дубна) пучков релятивистских дейтронов позволило начать целенаправленный цикл работ по исследованию процессов взаимодействия ядер. За истекший период в ЛВЭ получены разнообразные характеристики взаимодействий релятивистских ядер ^1H , D , ^4He , ^{12}C , ^{16}O , ^{22}Ne , ^{24}Mg при различных импульсах с ядрами фотозумульсии /11 - 14/. Установлены основные закономерности характеристик расщеплений от массы сталкивающихся ядер. Показано, что эти характеристики имеют сильную зависимость от числа эффективно взаимодействующих нуклонов ядра-снаряда или ядра-мишени. Расчёты на основе каскадно-испарительной модели (КИМ) хотя качественно, а в ряде случаев и количественно воспроизводят ряд характеристик ядро-ядерных взаимодействий, таких как множественность частиц в звезде, но не могут описать корреляционные соотношения множественностей частиц разного типа и другие.

На протяжении многих лет большой вклад в исследования процессов взаимодействия релятивистских частиц и ядер с ядрами фотозумульсии вносит сотрудничество международного фотозумульсионного комите-

та ОИЯИ, включающее институты Монголии, Польши, Румынии, Чехословакии и более десяти институтов и университетов Советского Союза. В частности за последние годы сотрудничеством набран и обработан большой объём экспериментальных данных по взаимодействию с ядрами фотозумульсии протонов /15/, дейтронов /16/, α -частиц /17/, ядер углерода /18/. По взаимодействию релятивистских ядер ^{22}Ne с ядрами фотозумульсии при импульсе $P_0 = 90 \text{ ГэВ/с}$ на нуклон были исследованы процессы неупругого столкновения /18/ и приведены сведения о множественностях, фрагментации и свойствах распределения поперечных импульсов фрагментов ядра-снаряда. В работе /19/ исследованы корреляции между продуктами фрагментации релятивистского остаточного ядра-снаряда, получены зависимости основных характеристик процесса фрагментации от массы фрагментирующего ядра и степень его разрушения от массы ядра-мишени. Для взаимодействий ядер ^{22}Ne при импульсе $P_0 = 4,1 \text{ ГэВ/с}$ на нуклон с ядрами фотозумульсии в работе /20/ исследованы особенности центральных столкновений, а процессы фрагментации и спектры рождения релятивистских протонов и π^\pm -мезонов в неупругих взаимодействиях в работах /21, 22/.

Проведён цикл работ по исследованию процессов полного разрушения ядер свинца релятивистскими ядрами гелия-4 /23/, углерода-12 /24/ и магния-24 /25/ при импульсе $4,5 \text{ ГэВ/с}$ на нуклон. В работе /25/ авторами проведено сравнение процесса полного разрушения ядер свинца под действием ядер углерода и ядер магния при одном и том же импульсе на нуклон и получено, что рост массы ядра-снаряда приводит к:

- а) росту числа однозарядных частиц с $\beta > 0,75$, пропорциональному $A^{1,0}$;
- б) усилению коллимации вылета вторичных частиц;

в) усилению эффектов бокового выброса s и \bar{b} -частиц, и увеличению противоиспускания этих частиц в азимутальной плоскости.

В работах /26, 27/ рассмотрены множественности и угловые распределения заряженных частиц от массового числа ядра-снаряда и от прицельного параметра ядро-ядерного соударения. В /28/ исследованы двухчастичные корреляции между пространственными и азимутальными углами вылета заряженных частиц из неупругих взаимодействий ядер ^{22}Ne в эмульсии, обсуждаются наблюдаемые корреляционные эффекты в поперечной плоскости взаимодействия, в частности, тенденция к вылету частиц разного типа в противоположные в азимутальной плоскости направления, тенденция к увеличению асимметрии вылета частиц в этой плоскости с увеличением степени центральности столкновения.

На экспериментальном материале коллаборации в 1986 - 1989 годах фотоэмульсионным сотрудничеством получен ряд новых результатов, указывающих на проявление коллективных эффектов в релятивистских ядерных взаимодействиях, в частности:

- усиление эффектов, связанных с асимметрией и коллимированностью испускания частиц в азимутальной плоскости как при уменьшении параметра столкновения, так и при увеличении атомного веса ядра-снаряда;

- наблюдение событий с большой плотностью быстрых частиц в пространстве псевдобыстрот $p \gg 100$ в интервале полярных углов вылета этих частиц $(30 \div 60)^\circ$ /29/;

- выделение "особых" событий /30/, в которых не наблюдается вылета быстрых частиц с углами меньшими $(6 \div 7)^\circ$, средний поперечный импульс быстрых частиц для этих событий составляет 0,6 ГэВ/с, что существенно выше как $\langle P_T \rangle$ для всех взаимодействий, так и $\langle P_T \rangle$, полученного по КИМ для такого рода событий ($\langle P_T \rangle \approx 0,35$ ГэВ/с).

Большой цикл исследований с использованием фотоэмульсионной методики в физике высоких энергий для изучения процессов взаимо-

действия релятивистских ядер проводится в институте теоретической и экспериментальной физики г. Москва, физическом институте АН СССР им. П.Н. Лебедева, институте физики высоких энергий АН Казахской ССР, институте ядерной физики АН Узбекской ССР и многих других институтах и лабораториях.

Интерес к фотоэмульсионному методу исследований взаимодействий релятивистских ядер продолжает возрастать и зарубежом. В работах /31, 32/ представлены результаты центральных столкновений ядер ^{16}O с ядрами Ar и V в фотоэмульсии при импульсах 60 и 200 ГэВ/с на нуклон (ЦЕРН) и при импульсе 14,6 ГэВ/с на нуклон (Бракхевенская Национальная лаборатория). Рассмотрены множественности вторичных заряженных частиц в сравнении с протон-ядро столкновениями при эквивалентных энергиях. В работе /33/ исследованы 1718 событий неупругого столкновения протонов при импульсе 800 ГэВ/с с ядрами фотоэмульсии облучённой в Фермиевской Национальной Лаборатории и представлены множественности и угловые распределения вторичных заряженных частиц и проведено их сравнение с данными протон-ядро столкновений при 67, 200 и 400 ГэВ/с.

1.1.2 Другие методы исследования взаимодействий релятивистских ядер и сопоставление их с фотоэмульсионным методом

Несомненно, необходимо учитывать прогресс и других методов исследования процессов взаимодействия релятивистских ядер, основными тенденциями совершенствования которых являются улучшение пространственного и временного разрешения, увеличение точности в измерении импульсных характеристик, гибкость и универсальность. В последние годы разработаны быстроциклирующие пузырьковые камеры с голографическим съёмом информации, позволяющие довести в

идеале пространственное разрешение до 10 мкм, дрейфовые камеры с повышенным разрешением ~25 мкм, полупроводниковые детекторы ~5 мкм и конечно же гибридные установки имеющие многоцелевое назначение /34/.

В ОИЯИ проводится большой объём работ с использованием стримерной камеры - установка СКМ-200 /35/. В работах /35, 36/ представлены экспериментальные данные по рождению π^- -мезонов в центральных и неупругих ядро-ядерных взаимодействиях при импульсе $P_0 = 4,5$ ГэВ/с на нуклон, полученные при облучении мишеней Li, C, Ne, Al, Si, Zr, Pb пучками ядер ^4He , ^{12}C , ^{16}O , ^{22}Ne . Приведены характеристики распределений по множественности π^- -мезонов (средняя множественность, дисперсия, асимметрия), по быстрой и поперечному импульсу в зависимости от жёсткости отбора центральных столкновений.

Не менее обширный фотоматериал получен и обработан в ЛВЭ с помощью двухметровой пропановой пузырьковой камеры, с целью исследования закономерностей множественного рождения частиц в релятивистских адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях, в частности, в /37/ исследованы инвариантные дифференциальные сечения рождения π^- -мезонов в столкновениях ядер дейтерия и углерода с ядрами углерода и тантала при импульсе $P_0 = 4,2$ ГэВ/с на нуклон, в /38/ - множественность, импульсные и угловые характеристики π^- -мезонов во взаимодействиях лёгких ядер (p, D, α , C) с ядрами углерода и тантала при импульсе $P_0 = 4,2$ ГэВ/с на нуклон и в /39/ - при первичном импульсе $P_0 = 10$ ГэВ/с на нуклон.

Однако методика пропановых камер имеет ряд методических ограничений /40/. Такие тяжёлые частицы как протоны, дейтроны и ядра трития, из-за малого пробега $l \lesssim 3$ мм, не регистрируются в пропане при импульсах меньше 150, 250 и 350 МэВ/с соответственно.

Отрицательные пионы с импульсом меньше 70 МэВ/с теряются либо ошибочно относятся к протонам, а положительные пионы уверенно идентифицируются по плотности ионизации только при импульсе менее 500 МэВ/с. К тому же они уступают ядерным фотоэмульсиям в пространственном разрешении. Особенно это существенно для установления ассоциативного рождения короткоживущих частиц, когда необходимо установить, что частица принадлежит именно к данному событию.

Высокое разрешение ~ 25 мкм доступно дрейфовым камерам, которые состоят из дрейфового промежутка, где создается приблизительно постоянный градиент электрического поля между двумя плоскостями нитей, и дополнительно ускоряющего промежутка, где происходит размножение электронов в цилиндрическом поле собирающих электродов. Дрейфовые промежутки бывают различной толщины (от нескольких мм до полуметра) в зависимости от требований эксперимента. Точность измерения координат ограничивается флуктуациями ионизации (б-электронами) и поперечным дрейфом электронов в дрейфовом промежутке.

Еще лучшее пространственное разрешение может быть получено в селеновом детекторе $/4I/$, представляющем собой пластинку монокристаллического кремния с имплантированными металлическими контактами, которые образуют диодную систему. Толщину монокристалла обычно выбирают около 300 мкм. Такой "сэндвич" можно использовать как ионизационную камеру, которая способна пропускать ток плотностью около 1 мкА/см^2 и давать один электрон на каждые 3,6 эВ потерянной энергии. На выходе при этом получается сигнал равный $2,5 \cdot 10^4$ электронов в пластинке толщиной 300 мкм для частицы, производящей минимальную ионизацию. В изготовленном в ЦЕРНе селеновом детекторе $/4I/$ с соответствующей системой электроники отношение сигнал-шум было 30/1, а пространственное разрешение достигну-

то ~5 мм. Изготовленный образец имел площадь поверхности 24 x 36 мм², имел 1200 электродов и 240 считывающих усилителей.

Во многих научных центрах, как в Советском Союзе, так и зарубежом созданы, эксплуатируются и проектируются новые гибридные спектрометры, включающие в состав большое количество разнообразных детекторов. Примером установки такого типа может служить Европейский гибридный спектрометр (EHS) /42/ или установка типа ISIS-2 /43/, EMC /44/, Crystal-Ball /45/ и другие.

С ростом энергии ускорителей осложнилась проблема точного измерения импульсов частиц. Существующие магнитные поля не обеспечивают достаточной точности измерений внутри пузырьковых камер, поэтому измерение импульса частиц переносится во внешнее по отношению к камере пространство, где за счёт больших расстояний точность измерения отклонений увеличивается. Это в свою очередь привело к проблеме создания больших и дорогостоящих гибридных установок.

Полнота и качество исследований взаимодействий релятивистских ядер в прямой зависимости от точности измерения угловых, пространственных и импульсных характеристик и зарядов вторичных частиц, и в этом плане наиболее удобным, простым и перспективным является метод ядерных фотоэмульсий, облучённых в сильном магнитном поле /46/.

Целесообразно сопоставить возможности фотоэмульсий в магнитном поле и новых 4π -детекторов, предназначенных для регистрации событий с большой множественностью вторичных частиц, например установки именуемые "plastic ball" и "plastic wall" /47/. В этой установке мишень помещена в центре сферы диаметром ~4 м, которая состоит из мозаики около 1000 сцинтилляционных детекторов, регистрирующих заряженные частицы с энергией выше 30 МэВ для протонов.

Узкий конус частиц, вылетающих по направлению пучка, регистрируется аналогичными детекторами, выложенными в виде стенки. Этот метод, очевидно, не позволяет получать информацию о распаде не стабильных частиц и регистрировать частицы с энергией меньше 30 МэВ, число которых велико и при полном разрушении ядер составляет около половины от всех. Не регистрируются γ -кванты, но они могут имитировать заряженные частицы при взаимодействии и конверсии в детекторах.

1.2 Сильные магнитные поля и их генерация

Магнитное поле - это, пожалуй, одно из наиболее эффективных средств воздействия на вещество или систему с целью исследования. История физики показывает, что это средство позволяет проникнуть в природу самых разнообразных объектов - от высокотемпературной плазмы до высокоорганизованного мозга /48/.

Генерация импульсного сильного магнитного поля (СМП) - достаточно сложная техническая задача, для успешного решения которой необходимо правильно учесть эффекты, обусловленные взаимодействием нестационарного магнитного поля и проводящей среды. В процессе генерации СМП наиболее существенными эффектами являются магнитное давление и тепловой разогрев. Импульсный характер СМП приводит к возникновению в материале соленоида значительных градиентов температуры при $B > 40$ Т, а магнитное давление $P = I/2 H^2$ в этих полях превосходит предел текучести большинства металлов. В реализованных на сегодняшний день генераторах полей с $B > 80$ Т скорость нарастания поля составляет 10^6 Т/с и более, что приводит к плавлению поверхности проводника из-за его нагрева индуцированными токами. При $B \gtrsim 120$ Т область плавления быстро распространяется внутрь проводника, а при поле с $B \gtrsim 150$ Т начинается испарение

металла с поверхности. С дальнейшим усилением поля возникает "волна испарения", которая проникает внутрь проводника, взрывая его поверхностный слой. В импульсных магнитных полях с $B = 500 \div 1000$ Т магнитное давление достигает значений, характерных для центра Земли, а именно порядка $4 \cdot 10^{11}$ Паскаль /48/.

Длительность импульсов поля "от нуля до нуля" - τ_{00} и амплитудное значение магнитной индукции - $B_M = \mu'_0 H_M$, время нарастания до максимума - τ_{0M} являются важнейшими характеристиками СМП, причём на практике оказывается, что из-за перечисленных выше эффектов, увеличение амплитуды магнитного поля приводит к уменьшению длительности импульса.

Исследования показывают, что постоянные магнитные поля возможно создавать до $\sim 30 \div 35$ Т, импульсные СМП при коротких длительностях (единицы мкс) до нескольких сотен Т, а более высокие поля только методом кумуляции магнитного поля направленным взрывом. Это наглядно иллюстрирует график на рис. I.

Таким образом, задача получения СМП сводится, во-первых к созданию мощных импульсных электрических токов, а конкретнее - к изготовлению накопителей, запасющих энергию, а затем быстро и эффективно преобразующих её в энергию магнитного поля. Во-вторых, необходимо иметь специальное устройство - соленоид, внутри которого и создаётся СМП при прохождении через него импульсного тока. Наиболее часто в качестве накопителя энергии применяется конденсаторная батарея, что объясняется сравнительной простотой её приспособления к условиям проведения экспериментов, а также высокой эффективностью преобразования (80 \div 95 %) запасённой в батарее электрической энергии в энергию магнитного поля.

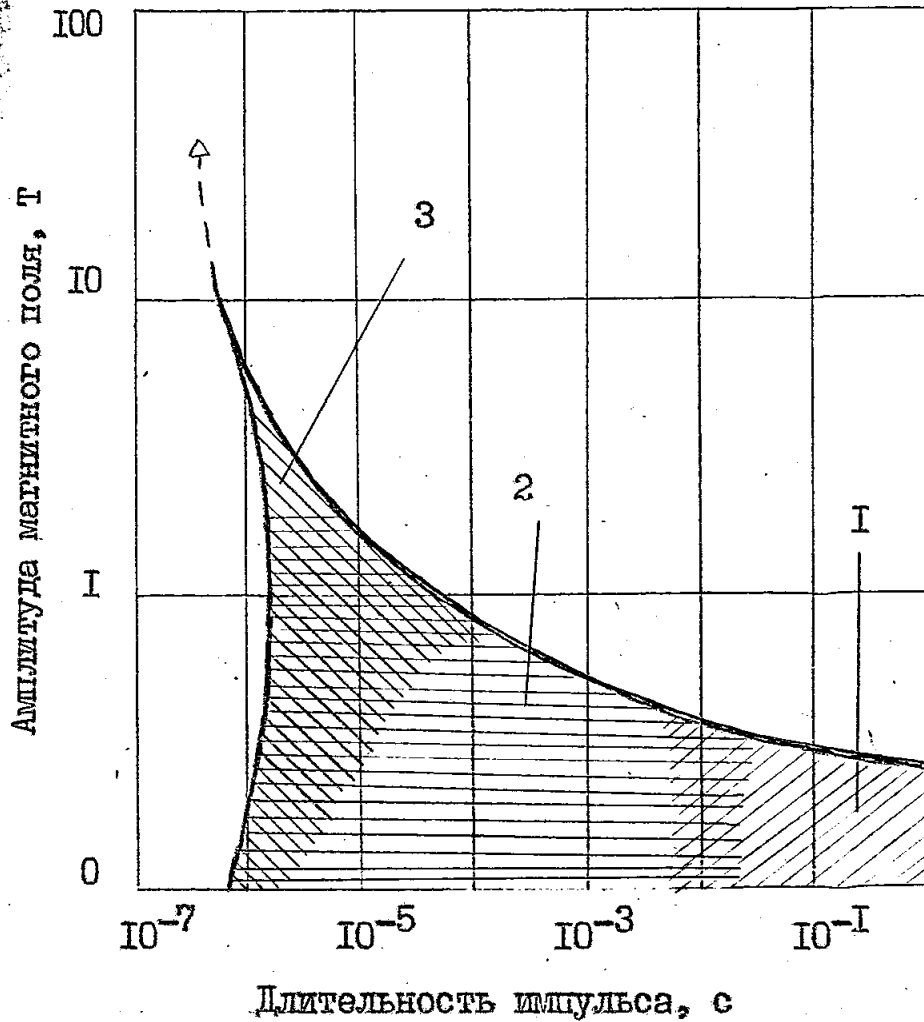


Рис. 1 График зависимости длительности импульса магнитного поля от его амплитуды, области применения источников энергии, служащих для их получения.

- 1 - вращающиеся машины и аккумуляторы;
- 2 - конденсаторные батареи;
- 3 - взрывное сжатие магнитного поля.

При больших длительностях импульса поля (более 0,1 с) с конденсаторной батареей начинают конкурировать электрические роторные машины и сверхпроводящие индуктивные накопители.

Пионерские работы по генерации импульсных СМП были выполнены П.Л.Кашицей в которых он предложил импульсный метод генерации СМП и уже через три года получил достаточно сильные (по тем временам) поля с $B \approx 30$ Т. Длительность импульса в его экспериментах ($\sim 0,01$ с) была вполне достаточной для проведения разнообразных исследований. Научные труды П.Л.Кашицы, посвящённые методам генерации СМП и их практическому применению, отражены в /49/.

История развития техники СМП в 60-е - 70-е годы достаточно подробно изложена в ряде работ. Первой монографией на русском языке, обобщающей опыт конструирования соленоидов, была книга В.Р.Карасика /50/. В 1969 году вышла в свет книга Монтгомери (переведена на русский язык в 1971 году /51/), посвящённая вопросам рационального конструирования соленоидальных систем. Монография Паркинсона и Малколла /52/ представляет собой обзор работ по расчёту, конструированию и технологии создания магнитных систем с полями большой напряжённости. В 1970 году появилась монография Кнопфеля (на русский язык переведена в 1972 году /53/), где подробно рассмотрены методы генерации сверхсильных импульсных магнитных полей. Коллективная монография под редакцией В.С.Комелькова, посвящённая вопросам расчёта и создания мощных ёмкостных накопителей энергии и их основных элементов: конденсаторов, разрядников, токопроводящих кабелей и шин, опубликована в 1971 году /54/. Отдельные этапы развития техники СМП последних лет и перспективы их применения в физическом эксперименте нашли своё отражение в книге А.С.Лагутина и В.И.Ожогина /48/.

Проблемы связанные с техникой генерации СМП остаются актуальными и в настоящее время. За последние годы по этой тематике проводились ряд международных конференций и симпозиумов: в городах Фраскати - 1965 г., Гренобль - 1966 г., Чанья - 1967 г., Варенна - 1969 г., Вашингтон - 1979 г., Новосибирск - 1984 и 1989 гг.

1.2.1 Применение СМП в физическом эксперименте

СМП как средство воздействия на вещество широко применяются в научных исследованиях. Максимальная индукция полученных к настоящему времени постоянных магнитных полей едва превышает 30 Т. Для решения ряда задач, в частности задач по физике твёрдого тела и физике высоких энергий, требуются применение магнитных полей с $B \geq 30$ Т. На данный момент единственным реальным путём достижения столь сильных полей оказывается использование импульсной техники, т.е. создание поля в течение короткого промежутка времени (от 10 до 10^{-7} с). Помимо того, и в области полей с напряжённостью $10 \div 30$ Т часто применяются импульсные магнитные поля. Это связано с тем, что импульсная генерация таких полей технически значительно проста, чем генерация таких же сильных постоянных магнитных полей. Не менее важным стимулом для использования преимущественно импульсных СМП служит и появление новой, цифровой измерительной техники, обладающей необходимым временным и амплитудным разрешением. Это даёт возможность проводить измерения в импульсных полях с весьма малой погрешностью ($0,1 \div 0,4$ %) - такой уровень ранее был достижим только при исследованиях в постоянных магнитных полях и, как правило, вполне достаточен для большинства экспериментов.

Наиболее ранние работы по практическому применению СМП для физических исследований были проделаны П.Л.Капицей /49/, первая

из которых была выполнена совместно с Н.Н.Семёновым. В этой работе был предложен метод определения магнитного момента атома, основанный на взаимодействии атомного пучка с неоднородным магнитным полем. Этот метод был затем осуществлён в известных работах Штерна и Герлаха. Первые работы по наблюдению треков α -частиц в СМП проводились под непосредственным руководством Резерфорда, исследования проводились с помощью камеры Вильсона, помещённой в сильное магнитное поле.

Одним из основных результатов проведённых П.Л.Капицей исследований физических свойств вещества в СМП явилось открытие им в 1928 году линейного закона для зависимости от магнитного поля электрического сопротивления ряда металлов. В его работах исследованы магнитострикция пара- и диамагнитных веществ в СМП и открыта аномально большая магнитострикция монокристаллов висмута. Он же исследовал эффект Зеемана в СМП и наблюдал эффект Пашена - Бака, а также некоторые вопросы связанные с физикой низких температур и сверхпроводящих материалов.

СМП находят широкое применение в исследованиях физических процессов и свойств материалов и в настоящее время. Так, большой интерес представляет изучение магнитооптических и гальваномагнитных эффектов, а также намагниченности и магнитострикции. Применение СМП позволяет исследовать резонансные явления (циклотронный, ферро- и антиферромагнитный резонансы) в миллиметровой и субмиллиметровой области длин волн электромагнитного излучения, что открывает интересные перспективы в радиоспектроскопии.

В Осакской лаборатории сильных магнитных полей функционирует одна из наиболее совершенных на середину 80-х годов установок /55/, пригодных для проведения магнитооптических экспериментов в воспроизводимых СМП до ~ 60 Т. На установке изучаются ряд различных магнитооптических явлений:

- эффект Фарадея - вращение плоскости поляризации света, когда луч света распространяется параллельно направлению внешнего магнитного поля;

- эффекты Зеемана, Пашена - Бака и другие магнитоспектральные эффекты, заключающиеся в изменении частоты света, излучаемого веществом, во внешнем магнитном поле;

- магнитное двулучепреломление (эффект Коттона - Мутона, или Фогта) - преобразование плоскополяризованного света в эллиптически поляризованный при распространении света поперёк магнитного поля;

- альфвеновские волны в полупроводниках - слабозатухающие электромагнитные волны.

Рассмотрим ряд наиболее интересных фундаментальных и прикладных проблем, которые для своего решения требуют использования СМП. Примерами исследований, в ходе которых ожидаются открытия новых явлений, могут быть такие эксперименты с применением СМП, как изучение сверхпроводников с высокими критическими полями, изучение, так называемых, переходов к более низкой размерности в металлах и полупроводниках (например, кристаллизация Вигнера) и электронных состояний бинарных сплавов, а также спектроскопия атомов и молекул в СМП. К областям вероятно практического применения СМП относят новые способы производства энергии (прежде всего управляемый термоядерный синтез и МГД-генераторы), а также мощные накопители энергии. Интересные перспективы имеются при использовании СМП для магнитной сепарации (разделения) в целях регенерации сырья и обогащения руд. Кроме того, привлекают внимание ещё не совсем ясные идеи создания новых материалов путём синтеза их в магнитном поле. Прогресс в технике СМП, безусловно, важен для проектирования магнитных систем ускорителей и т.д.

1.2.2 Ранние эксперименты по облучению фотоэмульсий в СМП

Постановка экспериментов с использованием СМП в физике элементарных частиц и высоких энергий имеет более чем 30-летнюю историю. Подавляющее их большинство связано с облучением ядерных фотоэмульсий.

Расчёты показывают, что импульсный и знаковый анализ частиц по магнитному искривлению можно произвести достаточно точно только в СМП напряжённостью более ~ 30 Т. Известно, что столь сильные поля, по крайней мере в настоящее время, можно получать только в виде отдельных импульсов. Однако при работе с ускорителями, дающими пучки частиц также отдельными импульсами, использование импульсных магнитных полей кажется нам крайне выгодным благодаря возможности синхронизации пучка частиц и поля *).

Одна из первых установок для облучения фотоэмульсий на ускорителе была создана в ФИАН им. П.Н.Лебедева в начале пятидесятых годов /56/. Установка состояла из генератора тока, блока управления и катушки, в которой помещались фотоэмульсионные слои и создавалось магнитное поле. В качестве источника энергии использовалась батарея импульсных конденсаторов типа ИМ-3/100 ёмкостью 3300 мкФ. Элементом коммутирующим ток в цепи, служил игнитрон типа ИГ-100/5000. Импульс, поджигающий игнитрон, подавался в такой момент, когда максимум поля совпадал с моментом вывода пучка частиц из ускорителя. Используемая конструкция многосекционной катушки, позволяла получать импульсные магнитные поля $\sim 10 \div 15$ Т, при зазоре между секциями катушки ~ 5 мм и внутреннем диаметре ~ 25 мм. Аксиальная асимметрия в рабочей области катушки составляла $2 \div 3$ %, радиальная $5 \div 7$ %. Точность задания тока достигала ~ 5 %.

* Идея создания такой установки впервые предложена в 1951 году Г.М.Стаховским.

В 1960 году группа специалистов ЦЕРНа под руководством И. Гоймана создала установку "МАМОНТ" /57/. Импульсный магнит, представляющий собой многовитковый соленоид, в котором размещалась стопка фотоэмульсий и создавалось магнитное поле с индукцией ~ 20 Т, был смонтирован на канале протонного синхротрона ЦЕРНа. Соленоид был создан исходя из требований обеспечить полезный объём поля ~ 30 см³, при длительности импульса поля порядка ~ 6 мс. В качестве источника энергии использовалась батарея из 250 конденсаторов общей ёмкостью ~ 75 000 мкФ. Энергоёмкость батареи при зарядном напряжении $\sim 2,8$ кВ достигала $\sim 0,3$ кДж. Коммутация тока, достигающего ~ 130 кА, осуществлялась шестью параллельно включёнными тигитронами. Облучение фотоэмульсий в эксперименте производилось пучком протонов с длительностью от 250 мкс до 1 мс при длительностях магнитного поля от 1,5 мс до 6 мс.

В рамках сотрудничества, в 1965 году, на установке "МАМОНТ" были облучены две стопки фотоэмульсий "Ильфорд - K5" размерами $\sim 4,5 \times 5,5$ см² пучком протонов ускорителя ЦЕРНа импульсом $P_0 = 20,8$ ГэВ/с в импульсном магнитном поле ~ 18 Т и были обработаны и проанализированы авторами работы /58/.

После окончания экспериментов на ускорителе ЦЕРНа эта установка была передана в ОИЯИ и смонтирована на 70 ГэВном ускорителе в институте физики высоких энергий (ИФВЭ) г. Протвино, где был проведён цикл исследований неупругих взаимодействий π^- -мезонов с ядрами фотоэмульсии /59/. Были в частности, исследованы энергетические характеристики π^- -мезонов, двухчастичные инклюзивные корреляции в неупругих пион-ядерных столкновениях при импульсе 50 ГэВ/с. Эмульсионные камеры состояли из 50-ти слоёв эмульсии типа БР-2, толщиной 600 мкм и диаметром 60 мм. Амплитуда напряжённости магнитного поля в эксперименте достигала ~ 18 Т с неоднородностью ~ 4 %, а длительность пучка ~ 5 мкс.

В 1964 году в институте атомной энергии им. И.В.Курчатова г. Москва была создана установка /60/, способная создавать импульсное магнитное поле напряжённостью ~ 15 Т в объёме ~ 600 см³ и предназначенная для облучения фотоэмульсий пучками ускоренных протонов синхротрона. Соленоид был изготовлен из бериллиевой бронзы в виде катушки насчитывающей 37,5 витка и водяным охлаждением. Конденсаторная батарея состояла из 972 импульсных конденсаторов типа ИМ-3/100 с номинальной ёмкостью 100 мкФ и напряжением 3 кВ, и общей энергоёмкостью батареи ~ 440 кДж. Коммутирующими элементами служили 18 игнитронов И-100/5, включенных параллельно и пропускали общий ток равный 50 кА. При этом была достигнута амплитуда магнитного поля 14,6 Т с длительностью ~ 10 мс. Физические эксперименты проводимые на этой установке, подробно описаны в /61/.

В начале 70-х годов в Стенфорде (США) была сооружена установка, создающая импульсное магнитное поле ~ 100 Т, длительностью ~ 5 мкс в объёме $\sim 10 \times 20$ мм³ /62/. Магнитное поле создавалось одновитковой катушкой однократного действия, выполненной из тонкой листовой латуни. Установка использовалась для изучения синхротронного излучения, создаваемого 19 ГэВными электронами. В дальнейшем эта же установка была использована для проверки точности измерения импульса заряженных частиц по магнитной кривизне трека в фотоэмульсии /63/. Амплитуда напряжённости магнитного поля в эксперименте достигала 92 Т. Стопка эмульсии состояла из 20 дисков толщиной 300 мкм каждый и диаметром 2 мм. Система синхронизации установки позволяла облучать фотоэмульсии одним ступком, содержащим $\sim 10^4$ электронов с энергией 19 ГэВ и длительностью около 0,2 мкс. В результате проведённых исследований, авторы работы сделали вывод, что в магнитном поле с напряжённостью порядка 100 Т,

Импульсы заряженных частиц могут быть измерены по магнитной кривизне трека в фотоэмульсии с точностью $\sim 3\%$ на длине следа ~ 1 см.

1.3 Теоретические расчёты точности измерения импульсов заряженных частиц в фотоэмульсии облучённой в СМП

Облучение ядерных фотоэмульсий пучками частиц или ядер высоких энергий на ускорителях в импульсных СМП напряжённостью более ~ 20 Т, позволяют по направлению магнитной кривизны трека определять знак заряда частицы, а по степени её искривления измерять импульсы заряженных частиц с точностью, значительно превышающей, чем при измерениях многократного кулоновского рассеяния.

Рассмотрим метод определения знаков заряда и измерения импульса заряженных частиц по магнитной кривизне, а также проведём расчёты точности измерений и количественную оценку в варианте эксперимента по облучению фотоэмульсий пучками релятивистских частиц и ядер при энергиях синхрофазотрона ОИЯИ в импульсных магнитных полях порядка $30 \div 100$ Т.

Траектория движущейся заряженной частицы в вакууме в однородном магнитном поле, в проекции на плоскость, перпендикулярную направлению поля, представляет собой окружность радиуса ρ . При движении в среде (в данном случае в фотоэмульсии) идеальная окружность искажается кулоновским рассеянием и потерями энергии. Последними можно пренебречь, если ограничиться рассмотрением релятивистских частиц.

Импульс частицы p связан с радиусом кривизны проекции её траектории ρ и напряжённостью H , перпендикулярного плоскости эмульсии магнитного поля, формулой:

$$p \text{ (ГэВ/с)} \cos \alpha = 3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{ГэВ/с}}{\text{кГс м}} \cdot H \text{ (кГс)} \cdot \rho \text{ (см)} \quad (1)$$

где α - угол погружения следа в эмульсии. Радиус кривизны траектории частицы в эмульсии в большинстве случаев определяется с помощью измерения координат трёх или более точек траектории.

Как следует из рис. 2а, $\rho^2 = (s - t)^2 + t^2$, где s - стрела прогиба, l - длина следа в эмульсии, $t = l/2$ - ячейка. Отсюда радиус кривизны $\rho = t^2/2s + s/2$. При $s \ll t$ (что удовлетворяется в данной методике) вторым членом можно пренебречь. Уже при $s \ll t/10$ ошибка в ρ из-за такого приближения не превышает 1%. Следовательно, $\rho \approx t^2/2s$.

Методом наименьших квадратов (в случае относительно малой кривизны) можно аппроксимировать окружность параболой. Тогда стрела прогиба s определяется по измеренным координатам (рис. 2б):

$$s = l/2 (Y_1 - 2Y_3 + Y_5). \quad (2)$$

Выражение, стоящее в скобках равенства (2), есть так называемая, вторая разность отсчётов в координатном методе измерения кривизны траектории $D = (Y_1 - Y_3) - (Y_3 - Y_5)$.

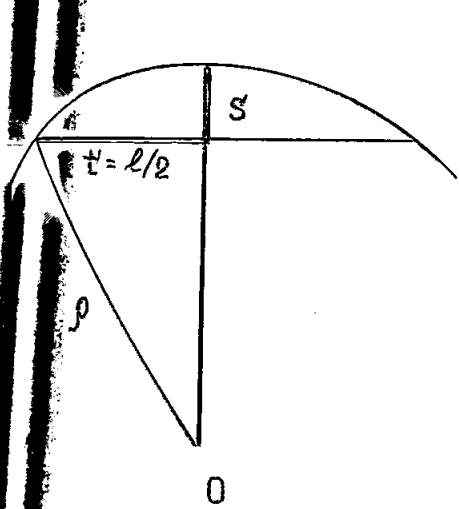
Таким образом, радиус кривизны равен $\rho = t^2/D$.

Координаты точек 2 и 4 измеряются для исключения случаев однократного кулоновского рассеяния и ложного рассеяния в эмульсии.

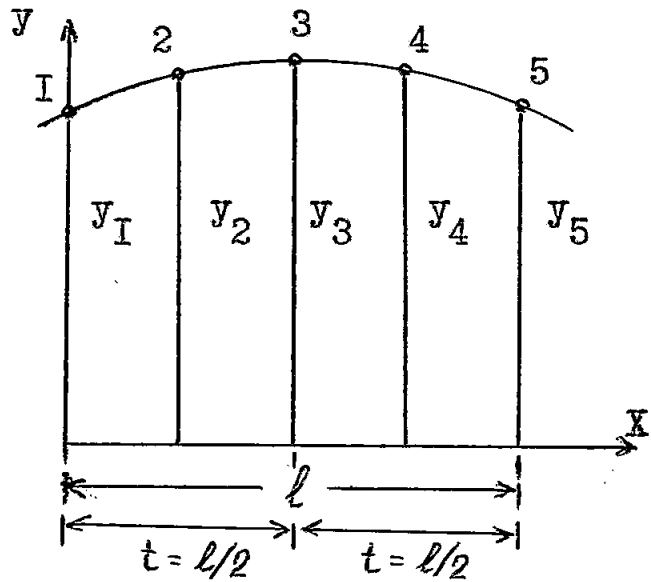
Радиус кривизны должен быть одинаков для всех участков дуги, поэтому для равных ячеек $t/2$ должны совпадать величины вторых разностей:

$$D_1 = Y_1 - 2Y_2 + Y_3, \quad D_2 = Y_2 - 2Y_3 + Y_4, \\ D_3 = Y_3 - 2Y_4 + Y_5.$$

В идеальном случае должно быть $D_1 = D_2 = D_3 = D/4$. Соблюдение последнего равенства в пределах ошибок должно служить гарантией отсутствия искажений и случаев однократного кулоновского рассеяния.



а).



б).

Рис. 2. К измерению магнитной кривизны следа заряженных частиц в ядерной фотоземлюльсии.

Введём кривизну k , не зависящую в идеальном случае от выбора ячейки t , а являющуюся только функцией радиуса

$$k = 1/\rho = D/t^2. \quad (3)$$

Тогда из формулы (1) для импульса получим

$$p(\text{ГэВ/с}) = \frac{3 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\text{ГэВ/с}}{\text{кГс см}} \right) \cdot H(\text{кГс})}{k(\text{см}^{-1}) \cdot \cos \alpha}. \quad (4)$$

В данной методике, положительное направление отсчётов величины V_i выбрано таким образом, что знак k совпадает со знаком заряда частицы.

1.3.1 Основные факторы, влияющие на точность измерения импульсов заряженных частиц по магнитной кривизне их траекторий в фотоэмульсии

Относительная ошибка в измерении импульса заряженных частиц по магнитному отклонению в фотоэмульсии облучённой в импульсном СМП, определяется по формуле

$$\Delta p/p = [(\Delta H/H)^2 + (\Delta D/D)^2]^{1/2}, \quad (5)$$

где $\Delta H/H$ - относительная ошибка в напряжённости магнитного поля, а $\Delta D/D$ - относительная ошибка в измерении магнитной кривизны траектории частицы, или в определении второй разности отсчётов в координатном методе измерения импульсов по магнитному отклонению в направлении, перпендикулярном вектору H и траектории частицы.

Если время цикла облучения фотоэмульсии много меньше длительности импульса СМП, то для всех частиц данного цикла, магнитное поле можно считать постоянным и по известному импульсу первичной частицы определить H , используя формулы (3) и (4)

$$H(\text{кГс}) = p(\text{ГэВ/с}) \cdot D(\text{см}) \cdot \cos \alpha / t^2(\text{см}) \cdot 3 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\text{ГэВ/с}}{\text{кГс см}} \right). \quad (6)$$

Таким образом, в данном случае, точность определения H получается

достаточно высокой $\sim 2 \div 3 \%$, поскольку импульс первичной частицы нам известен, и в основном зависит от однородности магнитного поля в рабочем объёме магнитной системы. Следовательно, для рассмотренного случая, в формуле (5) первым слагаемым в скобках можно пренебречь и тогда ошибка в измерении импульса будет определяться ошибкой в измерении D . Рассмотрим, каковы же источники ошибок данного метода?

Ошибка в определении D в основном сводится к точности измерения величины U_i , которая складывается из слагаемых за счёт неопределённости значения магнитного поля $U_{\text{маг.}}$, многократного кулоновского рассеяния $U_{\text{кул.}}$, аппаратных эффектов $U_{\text{ап.}}$ и искажений в эмульсии $U_{\text{иск.}}$, то есть

$$U_i = U_{\text{маг.}} + U_{\text{кул.}} + U_{\text{ап.}} + U_{\text{иск.}}$$

Ошибка из-за неопределённости в величине пикового значения магнитного поля $U_{\text{маг.}}$ обычно составляет $\sim 3 \div 5 \%$ и сравнительно мала по отношению к $U_{\text{кул.}}$.

Распределение отклонений величин U_i координат идеальной окружности из-за многократного кулоновского рассеяния приведено в работе /64/. Для второй разности D - это гауссиан со стандартным отклонением:

$$\sigma_{\text{кул.}}(D) = \frac{A \cdot t^{3/2} \cdot 10^{-2}}{57,3 \text{ p } \beta c}, \quad A \approx 30. \quad (7)$$

Из (7) видно, что относительная ошибка кривизны из-за многократного кулоновского рассеяния является функцией длины измеряемого участка l .

Аппаратурные ошибки с точностью показаний микроскопа связаны (для КСМ-1 $U_{\text{ап.}} \approx 0,1 \text{ мкм}$), а также с квалификацией наблюдателя и неточностью установки точек на следе ($\sim 0,1 \text{ мкм}$) и незначительны по сравнению с $U_{\text{кул.}}$.

Ошибки связанные с искажениями в эмульсии (дисторсии) могут быть учтены специальными измерениями на реперных следах частиц высокой энергии, направленных по нормали к плоскости фотоэмульсионного слоя. Однако, как следует из ряда работ /58, 65/, в полях ~ 100 Т при измерениях импульсов < 50 ГэВ/с в эмульсии типа БР-2 эти искажения в первом приближении можно не учитывать. При измерении импульсов в эмульсиях, обогащённых лёгкими ядрами, необходимо учитывать и значения вторых разностей за счёт искажения слоёв. По оценкам, значения величин $J_{иск.}$, имеют значения приведённые в таблице I, причём специальными мерами при обработке эмульсий, они значительно могут быть снижены.

Таблица I.

Значения вторых разностей за счёт искажений в фотоэмульсии.

t (мкм)	500	1000	1500	2000	2500	3000
$D_{иск.}$ (мкм)	0,4	1	1,9	2,9	3,8	4,7

В первом приближении данные, которые необходимо получить для разрешения ряда поставленных задач, можно разделить на три подгруппы, связанные с обычным подразделением вторичных частиц на s -, q - и v -частицы. К s -частицам относятся однозарядные релятивистские частицы с $E_{кин.}/M > 0,3$ и относительной ионизационной способностью $J/J_{плато} < 1,4$; к q -частицам - например, протоны с энергией в области от 26 до 400 МэВ, относительной ионизационной способностью $J/J_{плато} > 1,4$ и пробегом $l \geq 3$ мм и к v -частицам - частицы с пробегом $l < 3$ мм и $E_{кин.} < 26$ МэВ.

Рассмотрим перспективы применения импульсных СМЦ для исследования взаимодействий релятивистских частиц и ядер при облучении фотоэмульсий на синхротронном ОИЯИ.

I.3.2 Измерение импульсов S-частиц

На следах однозарядных S-частиц проведём анализ точности измерения импульсов при напряжённостях магнитного поля 25, 50, 75 и 100 Т. Основные расчётные данные представлены в таблице 2^{/66/}.

Таблица 2.

H (Т)	p (ГэВ/c)	l = 1 см			l = 2 см		
		D (мкм)	ΔD (мкм)	Δp/p (%)	D (мкм)	ΔD (мкм)	Δp/p (%)
25	I	188	18,9	10	750	55	7,3
"	5	37,5	3,6	10,5	150	10,8	7,2
"	10	18,8	1,9	10	75	5,4	7,2
"	50	3,8	0,4	9,8	15	1,1	7,3
"	100	1,9	0,2	9,8	7,5	0,54	7,2
50	I	375	18,9	5,0	1500	55	3,6
"	5	75	3,6	4,8	300	10,8	3,6
"	10	37,5	1,9	5,1	150	5,4	3,6
"	50	7,5	0,4	5,3	30	1,1	3,6
"	100	3,75	0,2	5,1	15	0,54	3,6
75	I	562,5	18,9	3,3	2250	55	2,4
"	5	112,5	3,6	3,2	450	10,8	2,4
"	10	56,25	1,9	3,4	225	5,4	2,4
"	50	11,25	0,4	3,4	45	1,1	2,4
"	100	5,6	0,2	3,5	22,5	0,54	2,4
100	I	750	18,9	2,6	3000	55	1,8
"	5	150	3,6	2,4	600	10,8	1,8
"	10	75	1,9	2,5	300	5,4	1,8
"	50	15	0,4	2,7	60	1,1	1,8
"	100	7,5	0,2	2,7	30	0,54	1,7

Как видно из таблицы 2, в магнитных полях с $H \geq 50$ Т, определение импульса S -частиц можно осуществлять с точностью порядка $3 \pm 5\%$, что не достижимо в других методиках.

1.3.3 Измерение импульсов q - и b -частиц

На следах однозарядных q -частиц измерение магнитного отклонения и ионизационных потерь позволит определить импульс и массу частиц, что даёт возможность разделить протоны, дейтроны и ядра трития. Таблица 3 иллюстрирует возможности этого разделения.

Таблица 3.

Иллюстрация возможности разделения q -частиц различной природы по магнитной кривизне их траекторий в фотоэмульсии.

Частица	p (ГэВ/с)	β	$E_{\text{кин.}}$ (МеВ)	I/I_0	l (см)	D (мм)	ΔD (мм)
p	0,92	0,7	375	1,34	0,5	816	30
"	"	"	"	"	0,2	131	7,2
d	1,84	0,7	750	1,34	0,5	408	15
"	"	"	"	"	0,2	65	3,6
t	2,75	0,7	1125	1,34	0,5	273	9,9
"	"	"	"	"	0,2	44	2,4
p	0,218	0,226	25	1,34	0,1	138	33,5
"	"	"	"	"	0,05	34	11,5
d	0,436	0,226	50	1,34	0,1	69	16,8
"	"	"	"	"	0,05	17	5,8
t	0,663	0,226	75	1,34	0,1	46	11,1
"	"	"	"	"	0,05	11,5	3,8

Для β -частиц величина магнитного отклонения меньше или равна второй разности отсчётов за счёт кулоновского рассеяния. В этом случае разделение частиц по массам и зарядам производится по остаточному пробегу и характеру следа вблизи остановки. В случае когда $D_{\text{маг.}} = D_{\text{кул.}}$, возможно статистическое разделение частиц. В таблице 4 приведены величины кинетической энергии частиц и лёгких ядер в эмульсии БР-2.

Таблица 4.

Зависимость длины пробега β -частиц от кинетической энергии.

частица, ядро	$E_{\text{кин.}}$ (МэВ)	пробег (мм)
p	15	1139
d	30	2276
t	40	2736
He	40	567
Li	120	1124
Be	320	3831
B	600	4684
C	1000	9942

Для кинетической энергии, большей чем её значения в таблице 4, возможно разделение частиц и ядер по зарядам и массам на основании пробега, величины магнитного отклонения и изменения магнитного отклонения с пробегом вследствие торможения. В таблице 5 в качестве примера рассмотрено разделение ядер ^4He и ^7Li для длины следа $l = 1\text{мм}$ в эмульсии-1 (БР-2) и в эмульсии-2 (обогащённой лёгкими ядрами) /46/.

Таблица 5.

Разделение ядер ${}^4\text{He}$ и ${}^7\text{Li}$ и точность измерения их импульсов на длине следа $l = 1$ мм.

ядро	β	$E_{\text{кин.}}$ (МэВ)	пробег (мм)	$D_{\text{маг.}}$ (мкм)	эмульсия-1		эмульсия-2	
					ΔD (мкм)	$\Delta p/p$ (%)	ΔD (мкм)	$\Delta p/p$ (%)
${}^4\text{He}$	0,43	400	30	16,9	4,3	25	3,1	18
${}^7\text{Li}$	0,40	600	18	10,6	4,3	40	3,1	20

1.3.4 Идентификация фрагментов взаимодействующих ядер

Остановимся теперь на рассмотрении столкновений релятивистских ядер. В этом случае рождённые релятивистские частицы (α -) и продукты распада ядер (α - и β -частицы) будут разделяться аналогично изложенному ранее для случая однозарядной первичной частицы. Различие будет только в разделении по зарядам и массам фрагментов налетающего ядра.

Это разделение возможно только на основе измерения магнитного отклонения и ионизационных потерь и облегчается тем, что фрагменты налетающего ядра, очевидно, имеют релятивистские энергии и движутся в направлении, близком к направлению первичного пучка. В случае, когда заряд фрагментов совпадает с зарядом первичного пучка, ионизационные потери также одинаковы, уменьшение импульса пропорционально уменьшению массы, а следовательно, магнитное отклонение по сравнению с его величиной для первичных ядер возрастает пропорционально уменьшению массы. При уменьшении заряда изменится ионизация и магнитное отклонение. В таблице 6 приведены величины, характеризующие измерения на следах фрагментов ядра ${}^{12}\text{C}$ с начальным импульсом 60 ГэВ/с при длине следа 1 см.

Таблица 6.

* Иллюстрация возможности разделения фрагментов ядра ^{12}C по измерениям магнитного отклонения в СМП ~ 100 Т.

ядро	p (ГэВ/с)	заряд	$D_{\text{маг.}}$ (мкм)	ΔD (мкм)
^{12}C	60	6	75	3,5
^{10}C	50	6	90	4,2
^{10}B	50	5	75	3,5
^8B	40	5	95	4,4
^8Be	40	4	75	3,5
^8Li	40	3	56	2,6
^6Li	30	3	75	3,5
^4He	20	2	75	3,5
^3He	15	2	100	4,7

1.4 Физическое и методическое обоснование эксперимента

Ядерные взаимодействия при высоких энергиях вызывают всё возрастающий интерес, связанный с поиском коллективных свойств ядерной материи в условиях высоких температур и плотностей, реализующихся в процессе соударения. Установлено, что ядро может быть использовано в качестве анализатора для исследования пространственно-временного развития процесса множественной генерации частиц в неупругих взаимодействиях релятивистских ядер, может дать уникальную информацию о процессе столкновения.

Рассмотрим ряд проблем, при решении которых перспективно применение фотоэмульсионной методики:

1. Обратимся прежде всего к проблеме множественной генерации частиц в ядерных взаимодействиях, изучение которых даёт воз-

возможность получить информацию о пространственных и временных свойствах сильных взаимодействий, в частности, о механизме формирования адронов на расстояниях, определяемых размером ядра, а также о поведении адронной материи в экстремальных условиях сильного сжатия и высоких плотностей. Исследование столкновения ядер позволит разделить два механизма генерации частиц: рождение частиц непосредственно в процессе соударения и механизм рождения частиц через промежуточные возбуждённые состояния. Это разделение возможно благодаря тому, что дальнейшее размножение частиц в ядре идёт по разному, в зависимости от того, какой из механизмов рождения имеет место. Исследование множественностей, угловых, импульсных и зарядовых характеристик вторичных частиц для ядерных взаимодействий в сопоставлении с данными по адрон-адронному взаимодействию, позволит проследить дальнейшее размножение частиц в ядре.

2. Проблема столкновения релятивистских ядер. Рост интереса к этим исследованиям связан с постановкой новых принципиальных вопросов: образование кварк-глюонной плазмы, возможность существования сверхплотных состояний ядерной материи и сосредоточение большой энергии в значительном объёме. Отметим, что в столкновениях релятивистских ядер мы имеем дело с очень большим количеством генерированных частиц и частиц от распада ядер.

3. В экспериментальном плане, в настоящее время, выделяются две задачи: во-первых, изучение корреляций между различными типами вторичных частиц, могущими указать на проявление эффектов коллективного взаимодействия. Во-вторых, исследование генерации странных частиц при столкновениях ядер, позволяющие получить сведения о механизме взаимодействия, например, возможное указание на его отличие от суперпозиционного.

Почти все указанные проблемы для своего решения, требуют данных по наибольшему числу вторичных частиц. Применение здесь фотоэмульсий с их высоким пространственным разрешением является перспективным, однако, для решения ряда задач, необходимо проводить измерение зарядов и импульсов вторичных частиц с достаточно высокой точностью. Эта задача может быть решена только с применением сильных магнитных полей.

Сочетание свойств мишени, детектора и фотодокумента в одном приборе, обуславливает единство его физических и информационных характеристик. Сложный атомный состав (свыше 10 сортов ядер) и большая плотность (до 4 г/см^3) делают фотоэмульсию эффективной мишенью с высокой тормозной способностью и большой вероятностью ядерного взаимодействия. Как детектор, фотоэмульсию характеризуют: отличная дискриминационная способность и хорошее угловое и энергетическое разрешение, как фотодокумент - сохранение события в весьма компактном трёхмерном виде.

Г Л А В А II

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ УСТАНОВКИ "СЛОН"

Введение

ЛВЭ ОИЯИ располагает, в настоящее время, ускорителем /67/, дающим ядерные пучки с максимальной энергией $E_{\text{макс.}} \approx 4,5$ ГэВ на нуклон, а в ближайшей перспективе, после ввода в действие нуклотрона /68/, энергия пучков ядер среднего веса будет увеличена до 6 ГэВ/нуклон, и планируется получение ускоренных тяжёлых ядер (вплоть до урана) с энергией до 4 ГэВ/нуклон.

Создание на этих пучках установки, предназначенной для облучения ядерных фотоэмульсий в СМП и обладающей возможностью регистрации событий в 4π -геометрии, позволит получить значительный объём важной, новой и уникальной информации для проверки различных моделей современной теории сильных взаимодействий.

2.1 Основные условия эксперимента по облучению фотоэмульсии в СМП

Как и любая методика, метод ядерных фотоэмульсий с применением импульсных СМП, предъявляет к постановке эксперимента свои специфические требования. Остановимся на их рассмотрении.

2.1.1 Диапазон амплитуд рабочих магнитных полей

В работе /66/ были проведены теоретические расчёты точности измерения импульсов заряженных частиц в фотоэмульсии, облучённой в СМП и изложены в первой главе диссертации. Анализируя данные таблицы 2, можно построить график зависимости точности измерения импульсов заряженных частиц в фотоэмульсии, облучённой в СМП от её амплитуды и на его основании определить диапазон рабочих маг-

нитных полей, в интервале реализации которых, появляется возможность значительно расширить возможности данной методики и качественно повысить точность измерения импульсов заряженных частиц по магнитному отклонению их траекторий.

Из графика изображённого на рис.3 видно, что при использовании фотоэмульсионной методики совместно с магнитными полями до $\sim 20 \div 30$ Т, точность измерения импульса ($\Delta p/p$) составляет значения $\sim 15 \div 7\%$ по отношению к точности измерения импульсов частиц в традиционной фотоэмульсионной методике (по многократному рассеянию) $\sim 30 \div 35\%$.

Качественного повышения точности измерения импульсов частиц ($\sim 5 \div 3\%$) можно получить уже при достижении амплитуды магнитного поля $\sim 60 \div 70$ Т. Эта задача на сегодняшний день, является разрешимой при генерации СМП длительностью $\sim 100 \div 50$ мкс.

Дальнейшее увеличение амплитуды СМП является сложной технической задачей, так как при более высоких полях материал соленоида, создающего СМП, работает, как правило, за пределами текучести металлов. К тому же, как следует из графика (рис.3), дальнейшее увеличение амплитуды СМП не даёт существенного повышения точности измерения импульсов s -частиц, однако для g - и b -частиц желательна и реализация более высоких СМП.

В заключении данного раздела можно сделать вывод, что диапазон амплитуд рабочих магнитных полей для фотоэмульсионной методики, лежит в интервале от $\sim 25 \div 30$ Т до $\sim 60 \div 70$ Т.

2.1.2 Минимально допустимый объём поля с точки зрения дальнейшей обработки и анализа событий в фотоэмульсионных пластинках

На рис.4 приведены величины относительных ошибок в опреде-

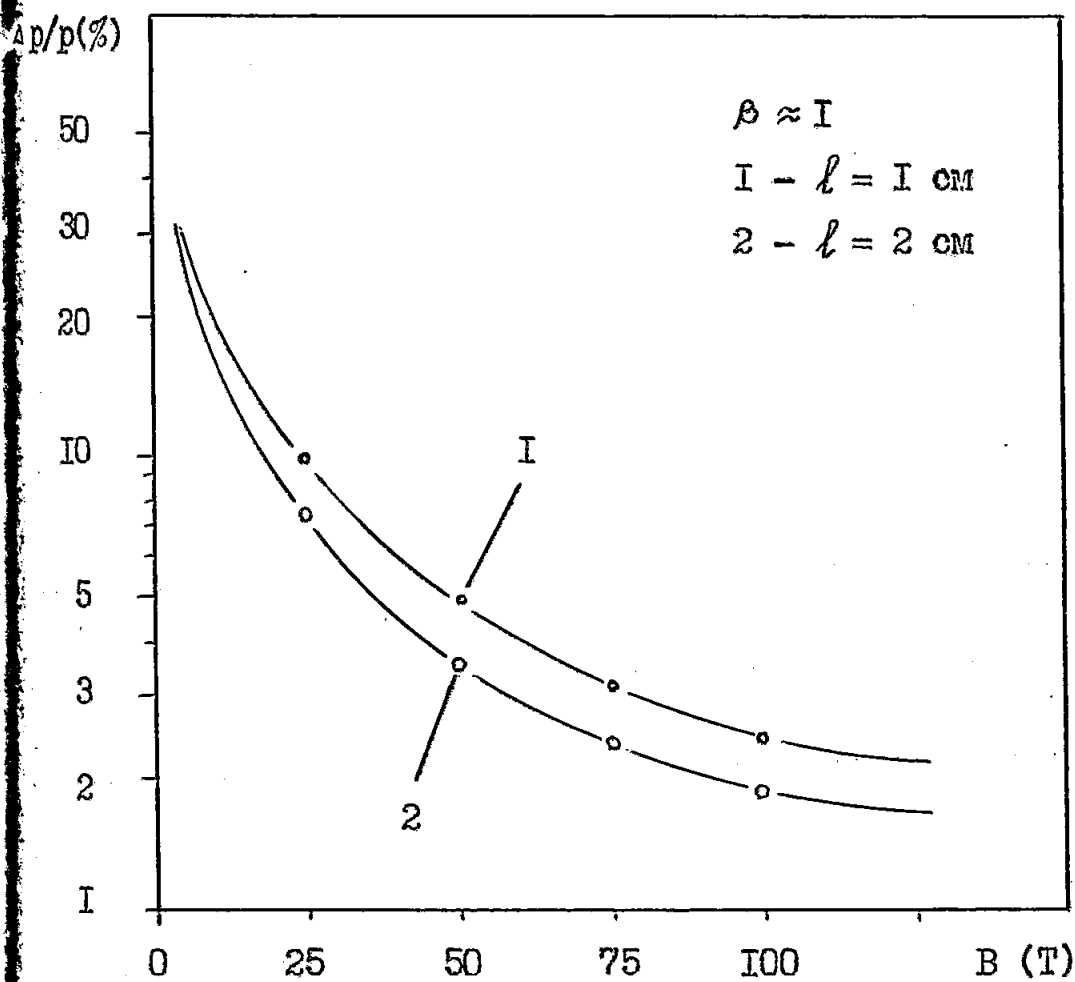


Рисунок 3. Зависимость точности измерения импульсов по магнитному отклонению в фотозумльсии облучённой в СМШ, от её амплитуды.

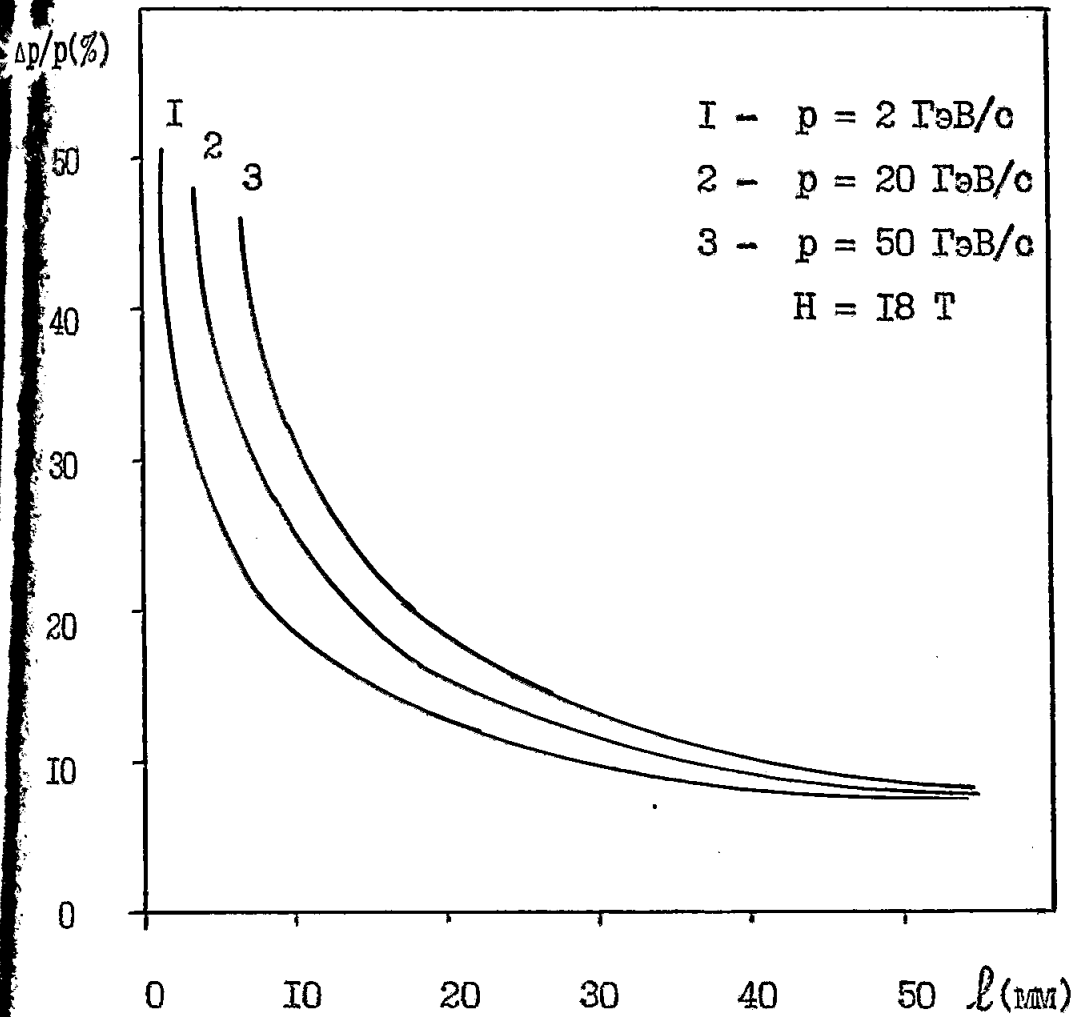


Рисунок 4. Зависимость точности измерения импульсов частиц от длины измеряемого следа /70/.

лении импульса частиц по магнитной кривизне ($\Delta p/p$) в зависимости от длины следа (l), полученные авторами работы /69/. Эти данные хорошо согласуются с данными представленными в таблице 2, из которых следует, что ошибки почти не зависят от импульса частиц при больших длинах следа ($l \geq 3$ см) и составляют $10 \div 7\%$, в то время как аналогичные ошибки в определении импульса по многократному рассеянию значительно больше и существенно зависят от величины импульса.

Исходя из этих данных и из соображений увеличения эффективности процессов взаимодействия, можно заключить, что для проведения надёжных измерений на достаточной длине следа и с учётом дальнейшей обработки и анализа событий, фотоэмульсия облучённая в СМЦ, должна иметь минимальную длину пластин в направлении траектории первичного пучка не менее $\sim 5 \div 6$ см.

Учитывая то обстоятельство, что в процессе взаимодействия релятивистских частиц и ядер с ядрами фотоэмульсии, рождается большое количество вторичных частиц в большом интервале энергий и пространственных углов, и исходя из возможностей измерения их импульсов, можно оценить минимальные размеры фотоэмульсии в направлениях перпендикулярных траектории первичного пучка. Необходимо отметить, что при химической обработке фотоэмульсионных слоёв, их наклейке на стеклянные пластинки и сушке, на их краях происходят значительные искажения эмульсии, которые могут вносить существенную ошибку в результаты измерений. Для исключения этих ошибок, рекомендуется проводить измерения на расстояниях от краёв фотоэмульсионной пластинки не менее ~ 5 мм.

Таким образом, можно оценить минимальные размеры фотоэмульсионных слоёв в стопке, она должна иметь длину $\sim 50 \div 60$ мм и ширину не менее $\sim 20 \div 25$ мм. Толщина стопки из тех-же соображе-

ний, и для надёжности измерений при переходах из одного слоя в другой, должна быть $\sim 15 \pm 20$ мм.

Исходя из размеров фотоэмульсии, необходимых для обеспечения надёжных измерений импульсов вторичных заряженных частиц по магнитному отклонению их траекторий в СМП, определим минимально допустимый объём СМП, достаточный для размещения стопки при проведении облучения. Магнитная система, создающая СМП, должна иметь рабочий объём не менее $2,5 \times 2 \times 5$ см³.

2.1.3 Требуемая пространственная однородность и временная стабильность магнитного поля

В разделе 3.1 первой главы, при исследовании основных факторов, влияющих на точность измерения импульсов заряженных частиц по магнитной кривизне их траекторий в фотоэмульсии облучённой в СМП, отмечалось, что основной вклад в первое слагаемое ($\Delta H/H$) в формуле (5) вносит пространственная неоднородность и временная стабильность магнитного поля в рабочей области соленоида. Проведём некоторые количественные оценки этих величин.

При определении диапазона амплитуд рабочих магнитных полей получено, что при полях $\sim 60 \div 70$ Т, точность измерения импульсов заряженных частиц по магнитному отклонению может достиг порядка $3 \div 5$ %, при условии, что для данного цикла частиц магнитное поле можно считать практически постоянным.

С учётом формулы (5) и из соображений приближения значения ошибки в определении импульса ($\Delta p/p$) к ошибке только за счёт многократного кулоновского рассеяния ($\Delta D/D$), можно оценить величину первого слагаемого в (5), то есть $\Delta H/H$. Она заведомо во много раз ($5 \div 6$) должна быть меньше значения $\Delta D/D$, то есть пространственная однородность магнитного поля в рабочем объёме

соленоида должна быть не хуже $2 \div 3 \%$, а воспроизводить амплитуду магнитного поля от цикла к циклу, при работе в многократном режиме облучения, с такой же точностью, то есть не хуже $2 \div 3 \%$.

2.1.4 Условия облучения

После того, как в предыдущих разделах были определены диапазон амплитуд рабочих магнитных полей, их минимально допустимый рабочий объём и требуемые пространственная однородность и временная стабильность, можно с учётом требований фотоэмульсионной методики, сформулировать основные условия эксперимента по облучению ядерных фотоэмульсий в СМП.

Метод ядерных фотоэмульсий, для наиболее эффективной реализации своих преимуществ и возможностей, требует оптимальной плотности облучения $\sim 10^4$ частиц/см². Это, прежде всего, обусловлено трудностью набора необходимого объёма статистического материала и стремлением облегчить наиболее тяжёлую и кропотливую часть работы, связанную с процессом поиска событий взаимодействия, измерениями всевозможных угловых, импульсных и энергетических характеристик, их дальнейшей обработкой и анализом.

Из оценки требуемой временной стабилизации СМП, в течение которого необходимо обеспечить облучение фотоэмульсии с оптимальной плотностью, а это время, когда амплитуда магнитного поля отличается от своего максимального значения не более чем на $2 \div 3 \%$, составляет $\sim 5 \div 10$ мкс, вытекает требование к интенсивности первичного пучка. За время $\sim 5 \div 10$ мкс, необходимо сбросить на стопку фотоэмульсии пучок частиц или ядер и при этом обеспечить плотность облучения $\sim 10^4$ частиц/см², то есть интенсивность первичного пучка должна быть $\sim 10^7 \div 10^8$ частиц/с при его поперечном размере ~ 1 см², или, применительно к пучкам синхрофазотрона

ОМЯИ /67/ с профилем пучка $\sim 10 \text{ см}^2$, в пределах $10^8 \div 10^9$ час-
т/с. Получение пучков с такими интенсивностями возможно толь-
ко для пучков релятивистских протонов, а для пучков ускоренных
ядер, интенсивность несколько ниже. Следовательно, для обеспече-
ния требуемой плотности облучения фотозмульсий пучками реляти-
вистских ядер, необходимо предусмотреть возможность проведения
облучения в многократном режиме.

При осуществлении облучения фотозмульсий в многократном
режиме и с учётом формулы (5), к стабилизации амплитуды магнит-
ного поля от цикла к циклу, предъявляется требование - с точностью
не хуже чем при однократном облучении, воспроизводить амплиту-
ду СМП, то есть не хуже $\sim 2 \div 3 \%$.

С целью контроля и получения информации об амплитуде магнит-
ного поля, пространственной однородности и временной стабильности,
необходимо осуществлять измерение их значений в каждом рабочем
цикле.

Исходя из размеров фотозмульсионных пластин, можно задать
требуемую точность истировки угла наклона первичного пучка к
плоскости эмульсии и их пространственную соосность. По предвари-
тельным оценкам, эти величины не должны превышать $0,5^\circ$ и $\pm 2 \text{ мм}$.
Это связано с значительным ростом ошибки в измерении импульса за
счёт, так называемых шумовых эффектов, исследование которых в за-
висимости от угла наклона, были проведены в /70/.

Так-же очень важно производить измерение основных парамет-
ров первичного пучка, интенсивности (с точностью $\sim 10 \div 15 \%$),
профиля и центра тяжести (с точностью $\pm 2 \div 3 \text{ мм}$).

2.2 Общее описание функциональной схемы установки и требования к её системам

Установка СЛОН ориентирована на получение максимально высоких напряжённостей магнитного поля, необходимых для фотоэмпульсионного метода исследований процессов взаимодействия релятивистских ядер и представляет собой сложный физический прибор, включающий в себя несколько отдельных систем.

Первая очередь установки предполагает получение магнитных полей в рабочем объёме $\sim 30 \text{ см}^3$ напряжённостью до $\sim 50 \text{ Т}$ с последующим увеличением амплитуды поля до предельно возможных, при разряде накопительной системы (конденсаторная батарея значительной энергоёмкости) на соленоид специальной конструкции.

Установка монтируется на канале быстрого вывода пучка из синхрофазотрона ОИЯИ ($T_{\text{вывода}} \approx 1 \text{ мс}$) в экспериментальном корпусе ИБ ускорительного комплекса ЛВЭ. Схема расположения узлов установки на канале облучения показана на рис. 5.

Соленоид и стопка фотоэмпульсионной размещаются на канале облучения таким образом, чтобы обеспечить требуемое взаимное направление траекторий частиц или ядер первичного пучка, слоёв фотоэмпульсионных пластин в стопке и направления силовых линий магнитного поля в соленоиде.

Для формирования требуемой длительности пучка, на канале предусмотрено расположение импульсного отклоняющего кикер-магнита, производящего дозировку и заброс пучка в зону облучения в интервале времени, когда напряжённость магнитного поля в соленоиде не отличается от своего максимального значения более чем на $2 \div 3 \%$. Это расчётное время составляет $\sim 5 \div 10 \text{ мкс}$.

Г Л А В А IV

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВОГО МЕТОДИЧЕСКОГО СЕАНСА ПО ОБЛУЧЕНИЮ ФОТОЭМУЛЬСИЙ

4.1 Условия проведения сеанса

Осуществлён пуск модуля установки СЛОН, который подытожил часть работ, связанных с разработкой и созданием элементов и систем установки, выполненных в течение ряда последних лет и проведён первый методический сеанс по облучению ядерных фотоэмульсий в магнитном поле установки пучками релятивистских протонов, выведенными из синхрофазотрона ОИЯИ. Целью этого сеанса являлось — проверка работоспособности как отдельных узлов и систем, так и установки в целом и её способность работать совместно с ускорителем, и некоторых вопросов, связанных с методикой облучения фотоэмульсий в сильном импульсном магнитном поле.

4.1.1 Рабочие параметры модуля установки и магнитного поля

Установка СЛОН смонтирована в экспериментальном корпусе 1Б ускорительного комплекса ЛВЭ на канале быстрого вывода пучка из синхрофазотрона ОИЯИ. К концу 1988 года были завершены основные монтажные работы и проведена комплексная наладка систем установки и начаты эксперименты по формированию сильного магнитного поля. На данном этапе для создания магнитного поля использовался разряд $\sim 1/4$ конденсаторной батареи (задействовано 132 из 576 конденсаторов типа ИС-5-200) на одновитковый соленоид. Коммутация тока осуществлялась двумя мощными вакуумными разрядниками. Заряд накопителя энергии ёмкостью $C_0 = 200 \times 132$ мкФ, осуществлялся посредством двух выпрямителей — сильноточного низкочастотного с тиристорным управлением ($i_{зар.} \leq 5$ А) и слаботочного вы-

сокочастотного ($i_{\text{зар.}} \lesssim 50 \text{ Ма}$) от силового трёхфазного трансформатора мощностью $P = 800 \text{ кВА}$.

Запуск разрядников синхронизован с циклом работы ускорителя и началом вывода пучка в канал облучения.

Для контроля формы и амплитуды импульса тока, протекающего через соленоид, изготовлен пояс Роговского, охватывающий область разряда коммутатора. Измерение напряжённости магнитного поля в рабочей области установки производилось специально разработанным магнитометром. Осциллограммы, показывающие форму разрядного тока и магнитного поля в соленоиде, представлены на рис. 29.

В процессе комплексной наладки модуля установки СЛОН с магнитной системой, имеющей рабочий объём $2,5 \times 2 \times 5 \text{ см}^3$ для размещения стойки ядерных фотоэмульсионных пластин, и при заряде накопителя энергии до напряжений $0,6$ и $1,2 \text{ кВ}$, осуществлено более 30 циклов формирования магнитного поля. Длительность полупериода тока при этом составляла $\sim 150 \text{ мкс}$, а его амплитуда $\sim 1 \text{ МА}$ (при $U_{\text{зар.}} \approx 1,2 \text{ кВ}$). Напряжённость магнитного поля в соленоиде достигала $\sim 25 \div 30 \text{ Т/101/}$.

4.1.2 Основные характеристики пучка

В начале 1989 года, после завершения комплексной наладки и первого этапа испытаний установки, был проведён методический сеанс по облучению ядерных фотоэмульсий в импульсном магнитном поле, основной целью которого являлось независимая проверка правильности расчётных оценок магнитного поля в рабочей области соленоида. Облучение осуществлялось пучком релятивистских протонов с импульсом 6 ТэВ/с .

В этом сеансе небыла задействована одна из основных систем установки - система дозировки пучка в канале облучения.

Поэтому фотозмульсии были облучены пучком, длительностью ~ 1 мс, что значительно превышало длительность импульса магнитного поля, в результате чего почти $\sim 98\%$ частиц первичного пучка попадала в фотозмульсию в момент отсутствия магнитного поля или когда оно ещё не достигло своего максимального значения.

Были облучены две стопки фотозмульсии типа БР-2 по 9 пластинок толщиной ~ 600 мкм в каждой и размерами $1,5 \times 10$ см². Первая стопка облучена при зарядном напряжении накопителя 0,6 кВ, а вторая - при 1,2 кВ.

Необходимо отметить, что вследствие недостаточной пространственной плотности пучка в обеих стопках оказалась значительно меньше допустимой плотности облучения для фотозмульсионной методики ($\sim 10^4$ частиц/см²). Плотность облучения в первой стопке была $\sim 10^3$ частиц/см², а во второй - $\sim 2 \cdot 10^3$ частиц/см².

Вследствие этих двух факторов, количество событий взаимодействия первичных протонов с ядрами фотозмульсии, оказалось недостаточным для проведения анализа, но используя треки первичных протонов не провзаимодействовавших в эмульсии, можно было произвести поиск следов, момент прохождения которых совпал с максимумом магнитного поля в соленоиде.

4.2 Результаты предварительного просмотра фотозмульсионных пластинок

После облучения, фотозмульсионные пластинки были отмаркированы (нанесена маркировочная сетка), проявлены и наклеены на стеклянные пластинки.

Вначале был проведён поиск событий (взаимодействий протонов с ядрами фотозмульсии) методом "по площади", в результате чего в

стошке № 2, облучённой при зарядном напряжении накопителя 1,2 кВ, было найдено более 100 событий.

Анализ найденных событий показал, что часть их $\sim 20\%$ оказались не пучковыми, то есть в результате отбраковки осталось порядка ~ 80 событий. Но вероятность того, что какое-то событие произошло в момент когда магнитное поле в рабочей области соленоида достигло своего максимального значения или мало отличалось от него, очень мала. Это подтвердило и измерение первичных следов этих событий, которое показало, что события произошли в момент отсутствия магнитного поля, либо при его малой амплитуде.

Учитывая это, с целью проверки напряжённости магнитного поля в соленоиде, было проведено измерение кривизны треков пучковых частиц на достаточной длине ($l \geq 1$ см) с тем, чтобы отобрать среди них те, которые отличаются по величине кривизны траектории от следов оставленных протонами в момент отсутствия магнитного поля.

Измерения проводились на микроскопе типа KSM при увеличении 90 x 15. Для измерения отбирались следы от пучковых первичных протонов с средней части пластинки без явных искажений в эмульсии. Для этого выбранный след выставлялся вдоль оси X стола микроскопа, протягивался след на достаточную длину таким образом, чтобы он всё время оставался в поле зрения и только после этого проводились измерения.

Отсчёты координат траектории следа (Y_i) производились через каждые 500 мкм (ячейка $t = 500$ мкм). На длине трека ~ 1 см количество измеряемых величин Y_i составляло ~ 20 .

Всего было измерено ~ 200 пучковых следов, основная часть которых имела кривизну трека соизмеримую с кривизной за счёт многократного кулоновского рассеяния.

В результате проведённых измерений, были отобраны следы частиц, кривизна траектории которых значительно отличалась по своей величине от основной массы следов.

Используя формулы (3) и (4), были произведены расчёты напряжённости магнитного поля по известному значению импульса первичной частицы (6 ГэВ/с). Максимальное значение полученных расчётных данных указывает на наличие магнитного поля в рабочей области установки напряжённостью ~ 29 Т, в пределах ошибки в измерении кривизны траектории следа за счёт многократного кулоновского рассеяния. Трек этой частицы изображён на рис. 30, он имеет значение второй разности отсчётов $D_{\text{маг.}} = 72,12$ мкм на длине следа $l = 1,4$ см.

Остальные следы имели кривизну траектории соответствующие магнитным полям напряжённостью $\sim 1,2$ Т; $2,9$ Т; $3,9$ Т; $6,2$ Т; $16,3$ Т, разброс значений которых объясняется несовпадением по времени момента прохождения пучка частиц через рабочую область соленоида с импульсом магнитного поля.

Используя формулу (7), была рассчитана ошибка в измерении величины второй разности отсчётов кривизны следа, которая сводится к определению значения многократного кулоновского рассеяния. Для релятивистского протона с импульсом 6 ГэВ/с на длине трека $l = 1,4$ см $D_{\text{кул.}}$ не превышает $\sim 5 \div 6$ мкм.

Сравнивая полученные значения $D_{\text{кул.}}$ с данными в таблице 2, можно заключить, что многократное кулоновское рассеяние может вносить ошибку в измерение $D_{\text{маг.}}$, то есть в рассчитанное значение напряжённости магнитного поля (H), равную ~ 8 %.

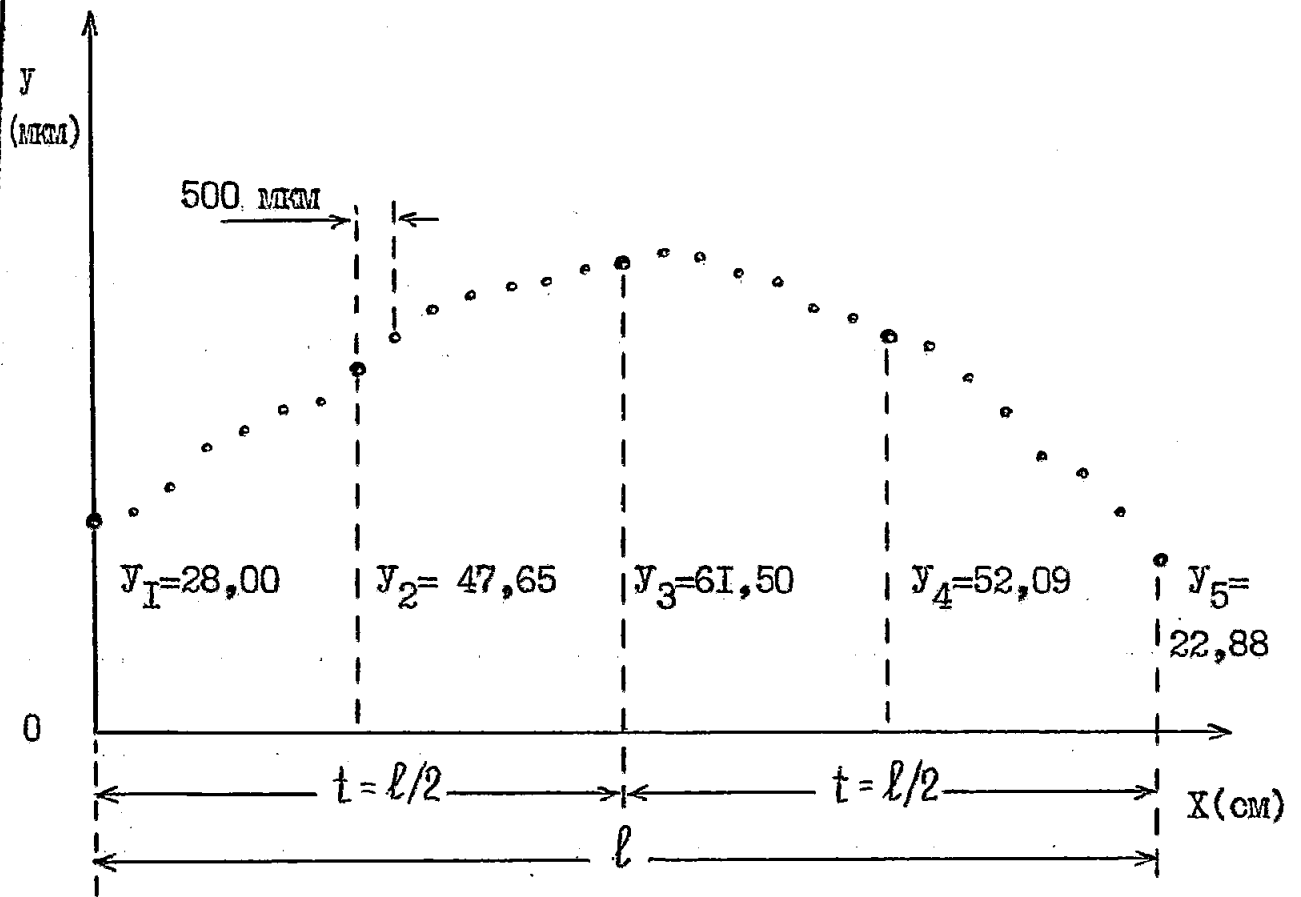


Рисунок 30. Траектория следа частицы на длине $l = 1,4 \text{ см}$ в фотоэмульсии облучённой в СМП на установке СЛОН.

Полученные результаты не плохо согласуются со значениями напряжённости магнитного поля, полученными при измерениях тока с помощью пояса Роговского и магнитными измерениями, полученными при помощи магнитометра.

4.3 Выводы

В результате первого методического сеанса по облучению ядерных фотоэмульсий с использованием установки СЛОН, показано, что в рабочем объёме соленоида ($\sim 30 \text{ см}^3$) формируется магнитное поле, величина которого соответствует расчётному. Параметры магнитного поля модуля установки СЛОН превышают достигнутые в ранее проводившихся экспериментах. Вместе с тем отсутствие системы дозирования пучка и недостаточная плотность облучения в проведённом эксперименте не позволили выделить события взаимодействий в сильном магнитном поле и набрать достаточную статистику для проведения их анализа.

В настоящее время на установке СЛОН продолжают работы по подготовке её к следующему сеансу облучения и дальнейшему наращиванию амплитуды магнитного поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы и результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

1. Проведён первый методический сеанс по облучению стопки фотоэмульсионных пластин размерами $1,5 \times 1 \times 10 \text{ см}^3$ в сильном импульсном магнитном поле новой экспериментальной установки на синхрофазотроне ОИЯИ, пучками релятивистских протонов с импульсом 6 ТэВ/с.
2. Осуществлён просмотр облучённых фотоэмульсионных пластин и экспериментально показано наличие в рабочем объёме соленоида $\sim 30 \text{ см}^3$ магнитного поля с индукцией $B \approx 29 \text{ Т}$.
3. Разработана оригинальная схема синхронизации установки СЛОН, обеспечивающая требуемую логическую последовательность работы отдельных узлов и систем: заряд накопителя энергии, синхронизация с циклом работы ускорителя, запирающее зарядного устройства, формирование магнитного поля, дозировку и сброс пучка, измерение магнитного поля и параметров пучка за один цикл работы установки.
4. Создан и введён в работу блок синхронизации всех узлов установки, выполненный в стандарте КАМАК, имеющий тройную последовательную блокировку канала запуска системы формирования сильного магнитного поля, обеспечивающий работу установки как в разовом, так и в периодическом режимах и осуществляющий синхронизацию по трём независимым каналам в диапазоне от 0 до 500 мкс с шагом 50 нс.
5. Предложена оригинальная методика стабилизации зарядного напряжения накопителя энергии установки СЛОН, основанная на использовании в зарядной цепи двух выпрямителей — сильноточного ($I_{\text{зар.}} \leq 5 \text{ А}$) и слаботочного ($I_{\text{зар.}} \leq 50 \text{ мА}$).

6. Разработаны и выполнены в стандарте КАМАК:
 - программатор зарядного устройства;
 - формирователь уровней стабилизации,обеспечивающие условия стабилизации зарядного напряжения накопителя энергии во всём диапазоне до 5 кВ с точностью $\pm 0,5$ В.
7. Разработана структурная схема системы контроля параметров пучка релятивистских ядер на канале облучения фотоэмульсий, позволяющая определять положение пучка, его координаты по отношению к слоям фотоэмульсионных пластин в стопке, распределение плотности частиц и размер поперечного сечения пучка.
8. Разработан и испытан макет телекамеры на основе матричного ПЗС и конструкция узла вставки оптической оси микрообъектива с светочувствительным окном матрицы, достигнута пороговая чувствительность камеры $\sim 1,14$ Люкс и динамический диапазон ~ 10 .
9. Расчитана, сконструирована и изготовлена мозаичная сцинтилляционная мишень для диагностики параметров пучков релятивистских частиц и ядер, в которой сведено к минимуму расхождение света в плоскости перпендикулярной траектории пучка.

Автор диссертации благодарит дирекцию Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, представившую возможность на протяжении ряда лет работать в фотоэмульсионном секторе НЭОРЯФ, руководство Тадж.ГУ им. В.И.Ленина и физического факультета за постоянный интерес и поддержку совместных с ЛВЭ ОИЯИ исследований и настоящую работу.

Автор глубоко признателен и благодарен своим научным руководителям - доктору физико-математических наук, профессору Константину Дмитриевичу Толстому и кандидату технических наук, старшему научному сотруднику Александру Дмитриевичу Коваленко