

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Институт физики высоких энергий имени А. А. Логунова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

На правах рукописи

Решетников Сергей Федорович

**Развитие системы вывода циркулирующего пучка из ускорителя У-70 с
помощью изогнутых кристаллов**

Специальность 1.3.18 –

Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник
Чесноков Юрий Андреевич

Протвино-2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1.1 Математический аппарат каналирования в изогнутых кристаллах для оптимизации вывода циркулирующего пучка	16
1.2 Кристаллические устройства для отклонения пучков заряженных частиц	27
Глава 2. Унифицированная станции кристаллических дефлекторов	31
2.1 Комплекс автоматизированного управления СКД	36
Глава 3. Достигнутые характеристики вывода пучка протонов кристаллами в течение длительной практики на У-70	44
3.1 Экспериментальные исследования эффективности вывода пучка протонов кристаллом в зависимости от угла изгиба.....	44
3.2 Вывод пучка протонов с помощью различных типов изогнутых кристаллов.....	53
3.3 Вывод пучка протонов варьируемой интенсивности из ускорителя У-70 с помощью изогнутых кристаллов.....	65
3.4 Результаты длительного использования кристаллов для вывода протонов.....	73
Глава 4. Вывод ионов углерода из У-70 кристаллическими дефлекторами ..	75
4.1 Вывод ионного пучка в каналы № 4А, № 22 и № 8	75
4.2 Сравнительные характеристики вывода протонов и ядер.....	82
Глава 5. Применение кристаллических дефлекторов на ускорительном комплексе У-70 для решения нестандартных задач	85
5.1 Получение пучка заряженных адронов низких импульсов на ускорительном комплексе У-70	85
5.2 Вывод пучка протонов из ускорителя У-70 при помощи кристаллического дефлектора с использованием явления объемного захвата в каналирование	96
5.3 Защита септума в ускорителе У-70 с помощью отражения частиц в мультикристаллических структурах	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	119

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертационной работы

Более тридцати лет на ускорителе У-70 проводятся исследования по использованию кристаллических устройств для управления пучками заряженных частиц в целях физики высоких энергий. За этот период пройден путь от первых экспериментов по отклонению заряженных частиц кристаллическими дефлекторами до создания реально действующих систем, применяемых на У-70 для вывода, коллимации, управления и формирования пучков заряженных частиц.

Кристаллические устройства прочно заняли свою нишу в обеспечении работы физических установок во время регулярных сеансов на ускорителе У-70, расширив возможности по использованию пучка и позволяя проводить уникальные исследования на пучках заряженных частиц. Развитие системы вывода протонов с помощью изогнутых кристаллов востребовано физическим сообществом. Этот режим является комплиментарным дополнением к существующим методам быстрого вывода, медленного вывода и вывода с использованием внутренних мишеней.

Цели диссертационной работы

Цель диссертационной работы состоит в развитии метода вывода пучков заряженных частиц из ускорителя У-70 с помощью изогнутых монокристаллов, усовершенствовании экспериментальной и технической компонент этого метода вывода, исследовании характеристик медленного вывода протонов изогнутыми кристаллами, исследовании вывода ионов углерода из У-70 кристаллическими дефлекторами, а также в изучении возможностей новых применений кристаллических дефлекторов на У-70 для нужд физики высоких энергий.

При решении задач, выполняемых в рамках данной диссертационной работы, получены следующие результаты:

- Разработана и введена в эксплуатацию новая унифицированная станция кристаллических дефлекторов на ускорителе У-70 и автоматизированная система управления ею.
- Получены новые данные о характеристиках медленного вывода протонов изогнутыми кристаллами, таких как эффективность вывода и вывод пучков варьируемой интенсивности.
- Реализован метод вывода пучка ионов углерода кристаллами в каналы № 22, № 8 и № 4А, ускорительного комплекса У-70.
- Проведены исследования по делению пучка ионов углерода с энергией 25 ГэВ на нуклон кристаллом между каналами частиц № 8 и № 22 на У-70.
- Разработан и реализован метод вывода пучков протонов кристаллом с использованием явления объемного захвата в каналирование.
- Реализован способ получения пучков заряженных адронов в диапазоне импульсов 1,4–13 ГэВ/с в канале № 14, с помощью вывода первичных протонов кристаллическим дефлектором.

Научная новизна результатов диссертационной работы

Впервые в мире продемонстрирована возможность вывода пучка протонов варьируемой интенсивности в широком динамическом диапазоне из кольцевого ускорителя с помощью изогнутых кристаллов.

Впервые в мире реализован режим вывода пучка кристаллом из кольцевого ускорителя с использованием явления объемного захвата в каналирование, который обеспечивает работу экспериментальных установок на ускорительном комплексе У-70 при наборе физических данных.

Впервые в мире реализован и экспериментально исследован метод вывода пучков ионов углерода из кольцевого ускорителя с помощью кристаллов в каналы вторичных частиц.

Впервые экспериментально определена зависимость эффективности вывода пучка протонов кристаллом от угла изгиба кристалла при торцевом захвате в

широком диапазоне углов изгиба кристалла, которая является основной характеристикой кристаллических устройств вывода пучка.

Разработан и внедрен метод получения пучка заряженных адронов с низкими импульсами в широком диапазоне 1,4–13 ГэВ/с в канале вторичных частиц № 14 ускорительного комплекса У-70 при использовании кристаллического дефлектора для вывода первичных протонов на внешнюю алюминиевую мишень. Данный диапазон импульсов пучка получен в ИФВЭ впервые и позволяет проводить широкий спектр методических и физических исследований.

Практическая значимость результатов диссертационной работы

Полученные результаты имеют важное практическое значение в обеспечении работы экспериментальных установок ускорительного комплекса У-70, расширяя возможности по обеспечению методических и физических исследований, проводимых этими экспериментальными установками. Пучки при выводе кристаллами используются для выполнения исследований по физике высоких энергий и улучшения характеристик протонной радиографии. Также вывод стабильного пучка малого эмиттанса кристаллом может быть использован на медицинской установке ИФВЭ в качестве «карандашного» пучка.

Успешное развитие ускорительной техники позволяет сегодня применять пучки заряженных частиц во многих областях науки и индустрии: при проведении исследований в области физики высоких энергий и ядерной физики, в радиобиологии и радиохимии, при использовании в медицинской практике для лучевой терапии и диагностики, а также в других отраслях. Получение выведенных с помощью изогнутых кристаллов пучков дает новые возможности для решения фундаментальных и прикладных задач.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально изучена зависимость эффективности вывода пучка протонов из кольцевого ускорителя от угла изгиба кристалла. Установлено, что при энергии частиц, равной 50 ГэВ, для кристаллов с углом изгиба 1 мрад

эффективность достигает величины 0,85, а для кристаллов с углом изгиба 135 мрад эффективность вывода равна $5 \cdot 10^{-5}$. Помимо научной значимости, полученная зависимость используется для планирования разводки пучков на экспериментальные установки ИФВЭ.

2. В результате исследования тепловой и радиационной стойкости кристаллов и стабильности вывода при длительном (более 30 суток непрерывной работы) взаимодействии с циркулирующим пучком впервые установлено, что кристаллы кремния выдерживают потоки частиц до $2 \cdot 10^{20}$ частиц на см^2 без существенной деградации каналирующих свойств, нагреваясь до сотен градусов.
3. Разработка и внедрение метода вывода протонов с варьируемой в широком диапазоне интенсивностью пучка (интенсивность изменяется в диапазоне от 10^{11} до 10^6 частиц (5 порядков)) позволила в ИФВЭ изучить характеристики жидкоаргоновых детекторов БАК.
4. Разработка и внедрение на ускорительном комплексе У-70 режима одновременной работы кристаллов (от одного до трех) и нескольких внутренних мишеней позволила увеличить число потребителей пучка в сеансах на У-70. В частности, обеспечивается параллельная работа кристалла, расположенного в блоке № 19 магнита У-70 (вывод в канал № 8 или № 22), с тремя внутренними мишенями ускорителя У-70: мишенью в блоке № 24 (вывод в канал № 14), мишенью в блоке № 27 (вывод в канал № 4) и мишенью в блоке № 35 (вывод в канал № 18).
5. Разработка и реализация способа вывода ионов углерода из ускорителя У-70 с помощью кристаллов позволяет проводить экспериментальные исследования в области релятивистской ядерной физики на действующих физических установках комплекса У-70. Пучки шестизарядных ионов углерода, выведенные таким методом в каналы № 22, № 8 и № 4А, обладают достаточной интенсивностью, подходящим размером, правильной временной структурой и требуемым составом.
6. Разработка и реализация способа вывода пучка кристаллом из камеры ускорителя в канал транспортировки с использованием режима объемного

захвата в каналирование позволила получить пучок на установке СПАСЧАРМ с высокой стабильностью и улучшенной временной структурой, в сравнении с торцевым каналированием. Это обуславливается тем, что параметры вывода при объемном захвате в каналирование существенно меньше зависят от угла падения частиц пучка на кристалл, чем при торцевом каналировании. Установлено, что эффективность вывода при изгибе кристалла 75 мрад составляет $\sim 10^{-5}$, что совпадает с расчетами.

Достоверность результатов диссертационной работы

Достоверность результатов подтверждена средствами объективного контроля: измерениями характеристик пучка (интенсивность, размер и др.), выведенного из камеры ускорителя на реально действующие экспериментальные установки ИФВЭ. Это позволяет проводить исследования взаимодействия адронов на ускорительном комплексе У-70. Результаты измерения характеристик пучка совпадают с расчетами.

Разработанная унифицированная станция кристаллических дефлекторов успешно работает при обеспечении пучком экспериментальных установок в регулярных сеансах на У-70.

Выведенные разработанными методами пучки использовались для методических работ и получения физических результатов (набора статистики) на установках СВД-2, ФОДС, СПАСЧАРМ, КМН-АТЛАС, ИСТРА-КРИСТАЛЛ, а также на комплексе ПРГК-100.

Основные результаты опубликованы в наиболее значимых российских научных журналах и доложены на Международных научных конференциях.

Личное участие автора

Цели и задачи диссертационной работы были разработаны при непосредственном участии автора. Автор принял определяющее участие в разработке и создании унифицированной станции кристаллических дефлекторов на ускорителе У-70 и автоматизированной системы управления этой станцией. Автор

активно участвовал на всех этапах экспериментальных исследований, представленных в данной диссертации, по управлению и формированию пучков заряженных частиц на ускорителе У-70 с помощью изогнутых монокристаллов. Он непосредственно готовил конфигурацию установок с кристаллами, настраивал параметры У-70 для наведения пучка на кристаллы, проводил измерения на циркулирующем пучке, анализировал данные, готовил публикации. Автором разработана методика получения пучков адронов низких импульсов в канале частиц № 14, при выводе первичных протонов из У-70 с помощью кристалла на внешнюю мишень. Автором разработан способ вывода пучка кристаллом из камеры ускорителя У-70 в канал транспортировки № 14 с использованием режима объемного захвата в каналирование. По теме проведенных исследований автор лично выступил с докладами на шести научных конференциях.

Апробация диссертационной работы и публикации

Результаты исследований, ставшие основой диссертации, были доложены на научных конференциях:

1. Reshetnikov S. F., Afonin A. G., Barnov E. V., Levin A. Y., Ukhanov M. N. // XXVI Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2018): НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ Протвино, Россия. (1-5) октября 2018.
2. Решетников С. Ф., Афонин А. Г., Барнов Е. В., Васильев А. Н., Маишеев В. А., Мочалов В. В., Семенов П. А., Чесноков Ю. А. // X Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2024» НИЯУ МИФИ, г. Москва, (26 – 29) марта 2024.
3. Решетников С. Ф., Афонин А. Г., Барнов Е. В., Левин А. Я., Чесноков Ю. А. // Молодёжная конференция по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ-2024), НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, г. Протвино, (5–8) ноября 2024 г.

4. Reshetnikov S. F., Barnov E. V., Vasiliev A. N., Maisheev V. A., Mochalov V. V., Chesnokov Yu. A. // Russian Particle Accelerators Conference (RuPAC'25): Санкт-Петербург, Россия. (15-19) сентября 2025.
5. Reshetnikov S. F., Barnov E. V., Vasiliev A. N., Maisheev V. A., Mochalov V. V., Moiseev V. V., Chesnokov Yu. A. // Russian Particle Accelerators Conference (RuPAC'25): Санкт-Петербург, Россия. (15-19) сентября 2025.
6. Решетников С. Ф., Васильева А. Г., Дурум А. А., Костин М. Ю., Маишеев В. А., Парменова Е. В., Полуэктов И. В., Сандомирский Ю. Е., Чесноков Ю. А., Янович А. А. // XII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2026» НИЯУ МИФИ, г. Москва, (2 – 6) февраля 2026.

Исследования, представленные в диссертации, нашли отражение в 8 публикациях, вышедших в рецензируемых научных журналах, в их числе в журнале «Ядерная физика и Инжиниринг» [1,2,3] (3 публикации), «Письма в ЖЭТФ» [4,5] (2 публикации), International Journal of Modern Physics A [6], Приборы и Техника Эксперимента [7,8] (2 публикации).

Структура и объем диссертации

Диссертационное исследование организовано следующим образом: введение, пять глав и заключение. Общий объем работы составляет 129 страниц, которые дополнены 74 иллюстрациями и 2 таблицами. В библиографическом списке представлено 97 наименований.

Краткое содержание

Во введении представлено обоснование актуальности выбранной темы диссертации, определены цели и задачи исследования, раскрыты его научная новизна и практическая ценность, сформулированы положения, выносимые на защиту. Кроме того, изложен личный вклад автора в работу, приведен перечень публикаций и выступлений на научных конференциях, отражающих основные результаты исследования, изложено краткое содержание диссертации. Завершает

введение лаконичный исторический контекст по теме диссертационного исследования.

В первой главе приведено краткое математическое описание процессов каналирования в прямом и изогнутом кристалле, а также процесса деканалирования в кристалле, представлен принцип работы эффективного вывода ускоренных частиц с применением изогнутых кристаллов. Описаны методы изгиба кристаллических устройств, применяемых для вывода пучков заряженных частиц из кольцевых ускорителей.

Вторая глава посвящена разработке, созданию, внедрению и масштабированию унифицированной станции кристаллических дефлекторов на ускорителе У-70, а также автоматизированной системы управления этой станцией. Представлено их подробное техническое описание, а также результаты работы в сеансах на У-70.

Третья глава посвящена рассмотрению достигнутых характеристик вывода пучка протонов кристаллами в каналы частиц У-70 в течение длительной практики.

В первом разделе третьей главы описано экспериментальное исследование по определению зависимости эффективности вывода пучка протонов (энергия 50 ГэВ) от угла изгиба кристаллов, выполненных на ускорительном комплексе У-70. Сравниваются полученные данные и результаты компьютерного моделирования.

Во втором разделе третьей главы подробно рассмотрены кристаллические устройства, используемые для направленного вывода заряженных частиц из ускорителя У-70. Описаны их типы, рабочие параметры, особенности применения и достигнутые результаты.

В третьем разделе третьей главы рассматривается такое важное свойство вывода с помощью изогнутых кристаллов, как вывод пучка заряженных частиц варьируемой интенсивности. Для ряда экспериментальных исследований актуальна задача получения протонного пучка с вариативной интенсивностью. Данная проблема может быть решена посредством применения кристаллических дефлекторов, обладающих функционалом плавной регулировки как наведения пучка на кристалл, так и его угловой ориентации.

В четвертом разделе третьей главы обобщаются результаты длительного использования изогнутых кристаллов для управления пучками заряженных на ускорителе У-70. В результате многолетней практики установлено, что кристаллы способны выводить протонные пучки с переменной интенсивностью, в течение тысяч часов без специального охлаждения и без видимой деградации эффективности, работать в параллельном режиме (на плато У-70) с внутренними мишенями, делить уже выведенный пучок, увеличивая количество потребителей пучка в цикле.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена рассмотрению результатов экспериментальных исследований по выводу ионов углерода из ускорителя У-70 в различные каналы транспортировки частиц и далее на экспериментальные установки.

В пятой главе диссертации рассматриваются результаты применений кристаллических дефлекторов на ускорительном комплексе У-70 для решения нестандартных задач.

Первый раздел пятой главы посвящен результатам разработки, реализации и применения способа получения пучка заряженных адронов в диапазоне импульсов $1,4 \div 13$ ГэВ/с в канале вторичных частиц № 14 на ускорительном комплексе У-70.

Во втором разделе пятой главы представлены результаты разработки, реализации и применения метода вывода пучка протонов из ускорителя У-70 в канал транспортировки частиц № 14 при помощи кристаллического дефлектора с использованием явления объемного захвата в каналирование.

В третьем разделе пятой главы рассматривается экспериментальное исследование, проведенное на канале № 4А, целью которого было изучение возможности защиты септум-магнита в ускорителе У-70 с помощью отражения частиц в мультикристаллических структурах.

Исторический контекст

В начале XX века пионерские опыты Пауля Фридриха и Вальтера Книппинга, а также Макса фон Лауэ по дифракции рентгеновских лучей на кристаллах

высветили упорядоченную структуру кристаллов – кристаллическую решетку. Методика этих опытов [9], изящная в своей простоте, заключалась в облучении неподвижного монокристалла широким спектром рентгеновских волн. Кристалл, проявляя свойства дифракционной решетки, рассеивал рентгеновские лучи, генерируя дифракционную картину. Эта картина, сотканная из дифракционных максимумов, запечатлевалась на фотопленке. Полученное изображение, названное Лауэграммой, являлось отпечатком структуры кристалла, его сутью. Эксперименты показали, что направленный поток рентгеновских лучей распадается на веер лучей, оставляющих на фотопластинке причудливый узор, названный пятнами Лауэ. В ту эпоху У. Г. Брэгг и У. Л. Брэгг исследовали природу рентгеновского излучения, представляя его как поток частиц – фотонов [10]. Первоначально они полагали, что рассеянные фотоны покидают кристалл по "открытым каналам", эдаким невидимым коридорам между рядами атомов. Однако, вдохновленные последующим экспериментом, в котором кристалл поворачивался на фиксированный угол, а пятна на Лауэграммах поворачивались на вдвое больший угол, они пришли к другой модели. Кристалл предстал перед ними как совокупность плоскостей, зеркально отражающих рентгеновские лучи [10]. Первая модель Брэггов, основанная на "каналах", получила название "каналирование" [10]. И хотя она не смогла объяснить рассеяние рентгеновских лучей, позднее было доказано, что каналирование в кристаллах действительно существует для заряженных частиц. Почти сразу после прорывных экспериментов Брэггов Иоганн Штарк предложил обстрелять кристаллы протонами [11], однако идея Штарка не была реализована немедленно и была забыта на долгое время.

Идея каналирования вновь актуализировалась в начале 1960-х годов, когда М. Робинсон и О. Оуэн [12] предсказали, что при бомбардировке медного кристалла нейтронами, некоторые атомы отдачи будут канализоваться в кристаллической решетке. Это открытие стало возможным благодаря компьютерному моделированию, опередившему реальность. Вскоре исследовательские группы по всему миру с воодушевлением принялись искать подтверждение каналирования ионных пучков, используя ускорители, созданные

для ядерных исследований [13]. Экспериментаторы использовали два подхода: пропускали ионы через тонкие монокристаллические образцы, отслеживая их траектории с помощью детекторов, и внедряли ионы в кристалл, определяя глубину их проникновения методом послойного стравливания и измерения остаточной активности [10]. В обоих случаях проявлялся эффект каналирования. Ионы проникали глубже, когда пучок был направлен вдоль кристаллографических осей с открытыми каналами. Эти эксперименты стали наглядной иллюстрацией теории о локализации каналов с максимальной пропускной способностью между плотно упакованными атомными рядами кристаллической решетки. Как выяснилось, механизм каналирования основан на том, что каналированная частица избегает ядер атомов - центров кулоновского отталкивания для положительных ионов, что выпрямляет её траекторию и поддерживает устойчивое движение по каналу [10].

Опираясь на обширный фонд экспериментальных данных, Йенс Линхард разработал и обосновал стройный математический аппарат теории каналирования [14]. Он доказал, что ориентационные эффекты для быстрых заряженных частиц в кристаллах, когда их движение подчиняется кристаллической структуре, могут быть объяснены теоретически, преимущественно с помощью законов классической механики. Каналирование, по Линхарду, – это устойчивое движение частицы, когда ее траектория проходит вблизи центра канала, вытянутого вдоль основных осей кристалла [10]. Он показал, что частицы, движущиеся по каналам, испытывают периодические силы, которые то фокусируют их, то рассеивают. При гармоническом типе сил и преобладании фокусировки, движение частицы описывается простыми уравнениями. Поперечное движение в канале напоминает медленные колебания, наложенные на быстрые вибрации с периодом кристаллической решетки. Линхард также определил критический угол каналирования – предел, после которого каналирование становится невозможным.

Исследования каналирования частиц при низких энергиях (в диапазоне нескольких МэВ) нашли свое отражение в многочисленных монографиях и обзорах, таких как работы [15,16,17]. С развитием физики высоких энергий и ускорителей частиц, начали развиваться способы вывода и разводки пучков

заряженных частиц. Каналирование заряженных частиц в кристаллах переместилось в область высоких энергий. Теоретическая работа Э.Н. Цыганова (ОИЯИ, Дубна) в 1976 году [18] предложила пионерский подход в ускорительной технике: использование изогнутых кристаллов для отклонения пучков. Эта идея была подтверждена первыми экспериментами в 1979 году в Дубне совместной группой исследователей из ОИЯИ и Лаборатории им. Ферми (США) [19]. Значительным достижением стало применение изогнутых кристаллов для вывода протонных пучков, что было продемонстрировано в 1984 году на синхрофазотроне ОИЯИ [20]. В ходе эксперимента, где ускоренные протоны обладали энергией 8,4 ГэВ, для отклонения пучка применялся кремниевый кристалл с ориентацией (111) и углом изгиба 35 мрад. Пучок направлялся на кристалл путем уменьшения радиуса равновесной орбиты. Эффективность вывода пучка достигла 10^{-4} .

В 1989 году на ускорителе У-70 ИФВЭ с помощью кристалла кремния ориентации (111), изогнутого под углом ~ 85 мрад, был выведен пучок протонов с энергиями 50 и 70 ГэВ в канал вторичных частиц [21]. Пучок подвели к кристаллу с помощью локального искажения орбиты. Эффективность вывода сначала составляла несколько единиц на 10^{-4} , а затем была доведена до 10^{-3} при использовании тонких углеродных плёнок для предварительного рассеяния протонного пучка на малые углы.

В 1993 году на ускорителе SPS в ЦЕРНе исследовали вывод пучка протонов с энергией 120 ГэВ [22]. Для этого использовали изогнутые на угол 8,5 мрад кристаллы кремния ориентации (110). Ускоренный пучок направляли на кристалл с помощью электрического поля конденсаторных пластин, которое возмущало его в горизонтальной плоскости. Эффективность вывода составляла около 10%, а при энергии 270 ГэВ достигала примерно 20%.

В 1994 году на ускорителе ФНАЛ были проведены новаторские эксперименты по выводу протонов с энергией 900 ГэВ [23]. Использовался кремниевый кристалл, изогнутый на 0,64 мрад, для отклонения пучка в вертикальной плоскости. Эти опыты выявили возможность параллельного вывода

частиц из гало пучка и эксплуатации ускорителя в режиме коллайдера, достигнув эффективности вывода примерно 30%.

Чтобы увеличить эффективность вывода, в ИФВЭ был реализован и отработан в многочисленных экспериментах метод вывода с использованием коротких кристаллов (1–2 мм) с небольшими углами изгиба (1–2 мрад). В кристаллах с такими параметрами частицы могут многократно проходить через кристалл за время вывода (многооборотный вывод), что увеличивает вероятность их захвата в каналирование. Такой подход позволил достичь эффективности вывода до 85% [24,25,26,].

На ускорителях RHIC [27], Tevatron [28], SPS [29], LHC [30] проводились эксперименты по коллимации пучка короткими кристаллами с малыми углами изгиба, для защиты сверхпроводящих магнитов. Открытие эффекта объёмного отражения в кристаллах [31,32] увеличило интерес к этим исследованиям и актуализировало их, так как для целей коллимации объёмное отражение имеет ряд существенных преимуществ перед каналированием. Прежде всего, это возможность работы в существенно большем угловом диапазоне падающих на кристалл частиц.

Настоящая диссертация – это результат более чем десятилетних исследований, посвященных применению изогнутых монокристаллов в качестве инструмента формирования и управления пучками заряженных частиц на ускорительном комплексе У-70. Эти годы позволили не только расширить круг решаемых задач, но и глубоко проникнуть в суть возможностей этого метода. Мы исследовали свойства кристаллов, выявляя их предел прочности под действием тепла и радиации, проверяя их стойкость в длительных испытаниях. Скрупулезно изучена зависимость эффективности вывода от угла изгиба кристалла. Разработаны гибкие методы, позволяющие варьировать интенсивность выведенного пучка в широчайшем диапазоне. Заключительной частью работы стало новаторское осуществление вывода пучка из вакуумной камеры ускорителя посредством изогнутого кристалла, использующего феномен объёмного захвата в режим каналирования.

Глава 1. Метод вывода заряженных частиц с помощью кристаллов

1.1 Математический аппарат каналирования в изогнутых кристаллах для оптимизации вывода циркулирующего пучка

Йенс Линдхард первым объяснил, как происходит каналирование заряженных частиц в кристаллах [14]. Ключевым моментом является приближение "цепочки" (стринга), то есть рассмотрение изолированных рядов атомов. Это приближение применимо при высоких импульсах частиц, что делает классическое орбитальное описание ориентационных эффектов простым и точным. В отличие от многих других задач столкновений, где при высоких энергиях требуется квантовая механика, классическое приближение для ориентационных явлений тем лучше, чем выше кинетическая энергия частицы. Это приближение описывает частицу, движущуюся под малым углом к кристаллографической оси и последовательно взаимодействующую с цепочками атомов, при этом движение между столкновениями обычно является неупорядоченным двумерным. В случаях, когда движение определяется атомными цепочками, наблюдаются сильные ориентационные эффекты, что позволяет детально анализировать движение [10]. Результаты оказались малочувствительными к характеру взаимодействия между ионами и атомами, за исключением того, что на малых расстояниях оно должно описываться кулоновским потенциалом. Первичные ориентационные эффекты в кристаллах связаны с траекторией частицы в решетке и проявляются в виде "тени" вблизи атомных цепочек (в пределах $1-2 \text{ \AA}$). Теоретические оценки размеров этой тени, или снижения выхода, могут быть получены с помощью непрерывного описания атомных цепочек, учитывающего тепловые колебания и поверхностные эффекты. Более точный анализ достигается с использованием соответствующего гамильтониана, включающего угловые компенсационные эффекты. Для атомных плоскостей первичные эффекты слабее, чем для цепочек, и могут быть приближенно описаны простым непрерывным потенциалом. Линдхард установил, что при незначительном отклонении траектории заряженной частицы от

кристаллографической плоскости (или оси) наблюдается когерентное взаимодействие этой частицы с атомами кристалла. В результате, движение частицы оказывается эквивалентным движению в усредненном электрическом поле, генерируемом плоскостями (или осями) [10]. Хотя протоны и ионы являются тяжелыми релятивистскими частицами, их движение все еще может быть успешно описано в рамках классической механики. Математический анализ процессов каналирования проведен в источнике [26], кратко повторим полученные результаты.

Прямой кристалл. В ориентированном кристалле между двумя близко расположенными плоскостями возникает потенциальная яма $U(x)$ для положительно заряженных частиц. Формирование этой ямы обусловлено наложением усредненных полей, порождаемых данными плоскостями. Для частицы с высокой энергией, движущейся со скоростью v под углом Ψ к плоскости, поперечный импульс p_x практически не влияет на ее движение, в то время как продольный импульс p_s определяет траекторию. Согласно работам [14], [33], [34], в такой ситуации энергия продольного движения частицы сохраняется, а значит, сохраняется и энергия ее поперечного движения.

$$E_x = \frac{pv}{2\Psi^2} + U(x) = \text{const.} \quad (1.1)$$

Таким образом, для устойчивого движения частиц в усредненном межплоскостном потенциале $U(x)$ необходимо, чтобы

$$E_x = \frac{pv}{2\Psi^2} + U(x) < U_0, \quad (1.2)$$

аналитическое рассмотрение процесса каналирования, где U_0 – глубина потенциальной ямы, становится возможным благодаря использованию гармонического потенциала. Он является самой простой аппроксимацией межплоскостного потенциала по сравнению с другими, такими как Мольер [35] или Линдхард [14].

$$U(x) = \frac{4U_0}{d^2} x^2, \quad (1.3)$$

здесь d – расстояние между плоскостями.

Чтобы получить уравнение движения частицы в потенциальной яме (1.3) прямого кристалла, необходимо выполнить следующие шаги: во-первых, исходим из уравнения (1.1), во-вторых, дифференцируем (1.1) по координате s , принимая во внимание, что $\Psi = \frac{dx}{ds}$, в-третьих, подставляем выражение для $U(x)$ из (1.3). В результате получаем

$$\frac{d^2x}{ds^2} + \Omega^2 x = 0, \quad (1.4)$$

$$\text{здесь } \Omega^2 = \frac{8U_0}{pv d^2}$$

При заданных начальных условиях x_0 и x'_0 , решение уравнения (1.4) имеет вид

$$x = A \cos(\Omega s - \varphi), \quad x' = -A \sin(\Omega s - \varphi), \quad (1.5)$$

$$\text{здесь } A = \sqrt{\frac{x_0'^2}{\Omega^2} + x_0^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{x'_0}{\Omega x_0}.$$

Уравнение (1.4) демонстрирует, что траектории движения частиц на фазовой плоскости (x, x') имеют форму семейства концентрических эллипсов:

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{x'^2}{A^2 \Omega^2} = 1. \quad (1.6)$$

Область фазового пространства, в которой частицы могут быть захвачены в режим каналирования, ограничена эллипсом с предельными значениями амплитуды $A_{max} = \frac{d}{2}$ и угла $x'_{max} = \frac{d\Omega}{2}$.

$$x'_{max} = \frac{d\Omega}{2} = \Psi_L = \sqrt{\frac{2U_0}{pv}} \quad (1.7)$$

Угол Ψ_L является предельным для каналирования частиц и также известен как угол Линхарда. Для протонов с импульсом 70 ГэВ/с этот угол в кристалле кремния ориентации (110) составляет 24 мкрад [26].

Частицы, которые пролетают вблизи кристаллографических плоскостей, будут подвергаться значительному рассеиванию на ядрах и быстро выходить из состояния каналирования. Поэтому эллипс с полуосями

$$A = x_c = \frac{d}{2} - a_{T\Phi}, \quad \Psi_c = \sqrt{\frac{2Ux_c}{pv}} = \Psi_L \left(1 - \frac{2a_{T\Phi}}{d}\right), \quad (1.8)$$

можно считать критическим (здесь $a_{T\Phi} = 0,8853a_B Z^{-1/3}$ – радиус экранирования Томаса-Ферми, $a_B = 0,529 \times 10^{-10}$ м – радиус Бора, Z – атомный номер). Следовательно, фазовая площадь, соответствующая пучку, захваченному в каналирование, определяется как $S_c = \pi x_c \Psi_c$. Если на кристалл попадает пучок с угловой расходимостью $\pm\varphi$, которая значительно больше $\pm\Psi_c$ (что является типичным случаем), вероятность захвата в каналирование η_0 составит

$$\eta_0 = \frac{\pi x_c \Psi_c}{2d\varphi}. \quad (1.9)$$

Изогнутый кристалл. Динамика частиц в поперечном направлении в кристалле, изогнутом с радиусом R , в цилиндрических координатах выражается уравнением

$$\frac{d^2x}{ds^2} + \Omega^2 x = \frac{1}{R}. \quad (1.10)$$

Уравнение (1.10) имеет решение в виде гармонических осцилляций. Эти осцилляции, в отличие от случая прямого кристалла, осуществляются вокруг оси, смещенной в направлении кривизны кристалла на определенную величину

$$\bar{x} = \frac{1}{\Omega^2 R} = \frac{pvx_c}{U'(x_c)R}, \quad (1.11)$$

здесь $U'(x_c) = \frac{dU}{dx}$.

Величина смещения центра осцилляций обратно пропорциональна радиусу изгиба кристалла. При достижении критического радиуса изгиба, обозначенного как R_c ,

$$R_c = \frac{pv}{U'(x_c)} \quad (1.12)$$

осцилляции достигают своей предельной точки в рабочем диапазоне $\bar{x} = x_c$. Уравнение (1.11), с учетом (1.12) примет вид

$$\bar{x} = \frac{R_c}{R} x_c. \quad (1.13)$$

Динамика частиц на фазовой плоскости, для случая смещения центра осцилляций будет характеризоваться системой концентрических эллипсов (1.6) (в результате подстановки $(x - \bar{x})$ вместо x). В этом случае, полуоси эллипса, определяющего границы области захватываемых в каналирование частиц, будут равны

$$A_{max} = x_c \left(1 - \frac{R_c}{R}\right), \quad x'_{max} = A_{max} \Omega = \Psi_c \left(1 - \frac{R_c}{R}\right)^2, \quad (1.14)$$

вероятность захвата частиц в каналирование выразится как

$$\eta = \frac{\pi x_c \Psi_c}{2d\phi} \left(1 - \frac{R_c}{R}\right)^2 = \eta_0 \left(1 - \frac{R_c}{R}\right)^2 \quad (1.15)$$

Выражение (1.10) можно представить как

$$pv \frac{d^2 x}{ds^2} + \frac{dU_{эф}}{dx} = 0. \quad (1.16)$$

Здесь $U_{эф}$ выражается как

$$U_{эф} = \frac{4U_0}{d^2} x^2 - \frac{pv}{R} x. \quad (1.17)$$

Если уравнение (1.17) дополнить постоянным членом $U(x_c) \left(\frac{R_c}{R}\right)^2$, то оно примет вид

$$U_{эф}(x) = U(x_c) \left[\frac{x - \bar{x}}{x_c} \right]^2. \quad (1.18)$$

Для кристалла, изогнутого с определенным радиусом R , отклоняющего частицы с разными энергиями, можно аналитически определить вероятность захвата частицы в каналирование от её энергии. Введем понятие критической энергии, определяемой как $(pv)_c = U'(x_c)R$. С учетом этого, смещение центра колебаний (1.11) будет выглядеть следующим образом

$$\bar{x} = \frac{pv}{(pv)_c} x_c, \quad (1.19)$$

в этом случае глубина потенциальной ямы будет равняться

$$U_{\text{эф}}(x_c) = U(x_c) \left[1 - \frac{pv}{(pv)_c} \right]^2, \quad (1.20)$$

а вероятность захвата частиц в каналирование примет вид

$$\eta = \eta_0 \left(1 - \frac{pv}{(pv)_c} \right)^2. \quad (1.21)$$

Деканализирование. При каналировании, частицы, локализованные в потенциальной яме в области $x_c \leq \frac{d}{2} - a_{\text{тф}}$, подвергаются множественным взаимодействиям, преимущественно с электронами, что приводит к их постепенному выходу из этой области. Внутри изогнутого кристалла доля частиц, движущихся по каналам, уменьшается экспоненциально с увеличением длины пути. Скорость этого убывания, не зависящая от начального положения частиц, описывается как $\sim e^{-s/L_d}$, где длина деканализирования – L_d представляется как

$$L_d = \frac{64U_{\text{эф}}(x_c)}{9\pi^2 D_0}. \quad (1.22)$$

Коэффициент трения – D_0 определяется через средний квадрат угла рассеяния θ как

$$D_0 = \frac{pv}{2} \left[\frac{(\delta\theta)^2}{\delta s} \right]. \quad (1.23)$$

Используя значения $U_{\text{эф}}(x_c)$ из уравнений (1.18) и (1.20) для уравнения (1.22), мы получаем выражения для длины деканализирования, зависящие от радиуса изгиба кристалла и энергии частиц.

$$L_d = L_d^0 \left(1 - \frac{R_c}{R} \right)^2 = L_d^0 \left(1 - \frac{pv}{(pc)_c} \right)^2, \quad (1.24)$$

здесь

$$L_d^0 = \frac{64U(x_c)}{9\pi^2 D_0}, \quad (1.25)$$

это длина деканализирования в прямом кристалле.

Для анализа зависимости L_d^0 от характеристик кристалла и энергии частиц, мы применим метод Линдхарда [14] и выразим $\left[\frac{(\delta\theta)^2}{\delta s}\right]$ как

$$\left[\frac{(\delta\theta)^2}{\delta s}\right] = \frac{m_e v^2}{2(pv)^2} \left(\frac{\delta E}{\delta s}\right)_{\text{ам}} \frac{n_{\text{эл}}(x)}{n_{\text{ам}}}, \quad (1.26)$$

здесь $n_{\text{эл}}(x)$ – плотность электронов между плоскостями, $n_{\text{ам}}$ – аморфная плотность электронов, m_e – масса покоя электрона, $\left(\frac{\delta E}{\delta s}\right)_{\text{ам}}$ – средние ионизационные потери в аморфном веществе. Применяя аппроксимацию Линдхарда к потенциалу $U(x)$, мы получим выражение для L_d^0 в области релятивистских энергий частиц ($\gamma \gg 1$)

$$L_d^0 = \frac{256}{9\pi^2} \frac{pv}{\ln(2E_0\gamma/I) - 1} \frac{a_{\text{тф}} d}{Z_i r_e E_0}, \quad (1.27)$$

здесь $E_0 = 0,511$ МэВ – энергия покоя электрона, r_e – радиус электрона, Z_i – заряд каналируемой частицы, I – ионизационный потенциал (для кремния 172 эВ).

Анализ уравнения (1.27) показывает, что величина L_d^0 демонстрирует приблизительно линейный рост с ростом энергии частиц, для протонов с импульсом 70 ГэВ/с в кристалле кремния ориентации (110) длина деканалирования составляет 43,7 мм [26].

В изогнутом кристалле характер зависимости длины деканалирования от энергии претерпевает существенные изменения. Согласно уравнениям (1.24) и (1.27), в этом случае

$$L_d \sim pv \left(1 - \frac{pv}{(pv)_c}\right)^2. \quad (1.28)$$

На рисунке 1.1 приведена зависимость длины деканалирования (определенной по формуле (1.28)), от энергии частиц в сравнении с известными экспериментальными данными.

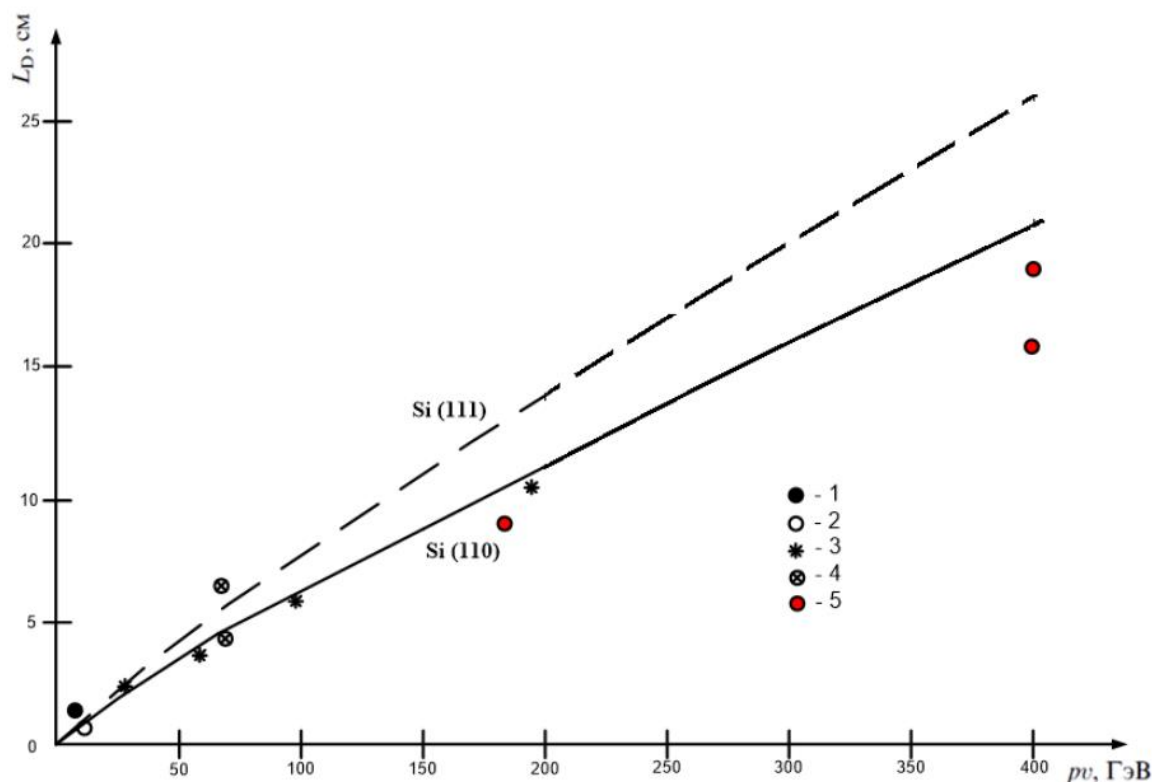


Рисунок 1.1 – Расчетные зависимости для L_d в каналах $S_i(110)$ и $S_i(111)$ совместно с экспериментальными данными. 1 – ОИЯИ [19], 2 – ЦЕРН [36], 3 – ФНАЛ [37,38,39,40], 4 – ИФВЭ [41], 5 - ЦЕРН [42]

На рисунке 1.1 данные, приведенные в [33], дополнены результатами современного эксперимента УА9, выполненного в ЦЕРН с участием сотрудников ИФВЭ [42]. Как видно из рисунка, простая диффузионная теория удовлетворительно описывает (с расхождением до 20%) экспериментальные данные вплоть до энергии 400 ГэВ. Это также доказывает, что кристаллы кремния, созданные полупроводниковой промышленностью за последние 70 лет, обладают высоким совершенством.

1.1.1 Принцип работы эффективного вывода ускоренных частиц с применением изогнутых кристаллов

Эффективность отклонения частиц, обозначаемая как F , количественно определяется как доля интенсивности пучка, которая была отклонена, по отношению к исходной интенсивности пучка, сбрасываемой на кристалл. Для

расчета этого показателя необходимы: вероятность захвата частиц в процесс каналирования и длина деканалирования, которая указывает на скорость, с которой частицы выходят из режима каналирования. Применяя уравнения (1.9), (1.15) и (1.24), мы можем вывести универсальное выражение для F

$$F = \eta_0(1 - \rho)^2 \exp\left(\frac{-R\Theta}{L_d^0(1 - \rho)^2}\right) = \eta_0(1 - \rho)^2 \exp\left(\frac{-\Theta}{\rho(1 - \rho)^2 \Theta_D}\right), \quad (1.29)$$

здесь $\rho = \frac{R_c}{R}$, Θ – угол, на который частица отклоняется кристаллом, $\Theta_D = \frac{L_D^0}{R_c}$ – максимально возможный угол отклонения частиц кристаллом.

Динамика частицы, находящейся в центре потенциальной ямы, в кристалле изогнутом по радиусу R , будет определяться как

$$\frac{pv}{R} = U'(\bar{x}) = \frac{8U_0}{d^2} \bar{x} = U'(x_c) \frac{R_c}{R}, \quad (1.30)$$

При условии $R = 3R_c$, для кристалла кремния ориентации (110) получаем следующее соотношение:

$$\frac{pv}{R} \approx 1,33 \times \frac{10^9 \text{ эВ}}{\text{см}}. \quad (1.31)$$

Величина эквивалентного магнитного поля $B_{\text{экв}}$ позволяет выразить соотношение (1.30) как

$$\frac{pv}{R} = 300 \frac{v}{c} B_{\text{экв}}. \quad (1.32)$$

Используя выражения (1.30), (1.31) и (1.32), получим, что при условии $R = 3R_c$ эквивалентное поле $B_{\text{экв}}$ составляет 440 Тл.

Допустим, что частицы, обладающие энергией pv , отклоняются на идентичные углы под воздействием как изогнутого кристалла, так и магнитного поля:

$$\Theta = \frac{L_k}{R_k} = \frac{L_m}{R_m}, \quad (1.33)$$

здесь L_k, L_m – длина кристалла и магнита, R_k, R_m – радиус изгиба кристалла и магнита. Соотношение $B_{\text{экв}} L_k = B_m L_m$ показывает значительно меньшую длину

изогнутого кристалла кремния ориентации (110), по сравнению с традиционными магнитами, для достижения того же эффекта. Поскольку обычные магниты создают поле до 2 Тл, а сверхпроводящие - до 10 Тл, длина кристалла может быть меньше в 220 и 44 раза, соответственно [26]. Кристаллы небольшого размера (порядка одного-двух сантиметров) стали важным инструментом в управлении пучками частиц. Они позволяют эффективно решать различные задачи, включая вывод пучков протонов из мощных ускорителей, что имеет важное практическое значение.

Для успешной реализации многооборотного вывода, когда частицы, не захваченные в каналирование при первом проходе через кристалл, могут быть каналированы при последующих проходах, как показывают расчеты [43,44], критически важны короткие кристаллы с малыми углами изгиба. Эффективность захвата частиц в каналирование в таких условиях можно оценить следующим образом. Приповерхностный слой кристалла толщиной (10–30) микрон, как правило, имеет нарушенную регулярность из-за технологической обработки. Прохождение частиц через этот слой приводит к многократному кулоновскому рассеянию и возможным потерям в результате ядерных взаимодействий. Вследствие этого, при попадании в регулярную часть кристалла, пучок на входе будет иметь Гауссово распределение со среднеквадратичным углом σ , определяемом как:

$$\sigma = \frac{13,6 \left(\frac{\text{МэВ}}{c} \right)}{p \left(\frac{\text{МэВ}}{c} \right)} \sqrt{\frac{L}{L_R} \left[1 + \frac{1}{9} \lg \left(\frac{L}{L_R} \right) \right]}, \quad (1.34)$$

здесь L – длина кристалла, L_R – радиационная длина.

Эффект рассеяния частицы в кристалле накапливается с каждым оборотом. Среднеквадратичный угол рассеяния σ растет пропорционально числу проходов k , следуя соотношению $\sigma_k = \sqrt{k} \sigma$. При первом прохождении пучка частиц через кристалл отклоняются не все частицы. Доля отклоненных частиц $P_1 = F_1 W$ зависит от двух основных факторов. Во-первых, часть частиц теряется при прохождении через аморфный слой на поверхности кристалла. Эта потеря

описывается коэффициентом $W = e^{-L/L_N}$, где L_N (45 см для кремния) - ядерная длина, характеризующая взаимодействие частиц с веществом. Во-вторых, оставшиеся частицы отклоняются кристаллом с эффективностью F_1 , зависящей от угла отклонения θ . Формула (1.29) позволяет рассчитать F_1 , и она упрощается, если распределение частиц на входе в кристалл имеет Гауссову форму, тогда:

$$F_1 = \Phi(x) \frac{\pi x_c}{2d} (1 - \rho)^2 \exp\left(-\frac{\theta}{\rho(1-\rho)^2 \theta_D}\right), \quad (1.35)$$

где $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt$ – интеграл вероятности, $\rho = \frac{R_c}{R}$, $x = \frac{\psi_c}{\sigma}$.

Доля частиц, не захваченных в режим каналирования после первого прохода, составляет $W(1 - F_1)$. При повторном прохождении, из этой доли будет захвачено $W^2(1 - F_1)F_2$ частиц, а $W^2(1 - F_1)(1 - F_2)$ останется. В третьем проходе, доля захваченных частиц из оставшихся составит $W^3(1 - F_1)(1 - F_2)F_3$. Таким образом, последовательность вероятностей захвата частиц на каждом последующем прохождении кристалла может быть представлена единой обобщающей формулой:

$$P = \sum_{K=1}^N P_K = F_1 W + \sum_{K=2}^N F_K W^K \prod_{m=1}^{K-1} (1 - F_m). \quad (1.36)$$

На основании изложенного следует, что важнейшим параметром, определяющим эффективность поворота пучка кристаллом, является угол изгиба кристалла (см. рисунок 1.2), который диктует оптимальную длину кристалла и радиус его изгиба. При установке кристалла на циркулирующий пучок для вывода протонов необходимо учитывать также фактор многооборотного движения через кристалл. Оптимизация характеристик кристалла по приведенным формулам (1.35 и 1.36) проводилась в [43,44].

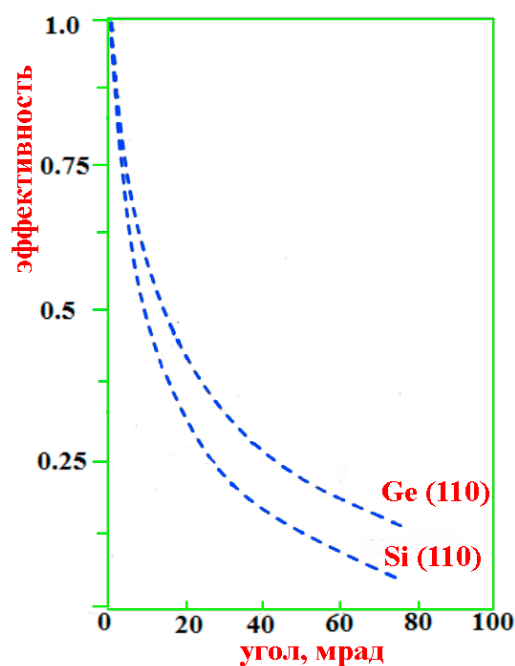


Рисунок 1.2 – эффективность отклонения заряженных частиц кристаллом в зависимости от угла изгиба кристалла (модифицировано по [33])

1.2 Кристаллические устройства для отклонения пучков заряженных частиц

Критически важным этапом в подготовке монокристаллических пластин для управления пучками заряженных частиц является их специальная, высокоточная обработка поверхностей. При отклонении пучков протонов с энергией 70 ГэВ кристаллическим дефлекторам длиной порядка 100 мм и толщиной 1 мм необходим отклоняющий слой, охватывающий весь объем кристалла в поперечном сечении. Это возможно, если удовлетворяется требование по высокоточной ориентации пластин с допуском в 1 угловую минуту, а также соблюдается низкий уровень непараллельности и неплоскостности боковых граней, ограниченный 10 микронметрами в продольном направлении кристалла. При полировке боковых сторон нужно стараться, чтобы слой с нарушенной структурой был как можно тоньше. Современные технологические решения, как правило, способны обеспечить соответствие этим строгим требованиям. Важно также качество самих кристаллов. Требуется, чтобы кристаллы демонстрировали предельно низкую концентрацию дислокаций. Практические наблюдения демонстрируют, что для

применения в ускорителях частиц целесообразно использовать кремний микроэлектронного качества ("электронный" кремний). При этом кремний, предназначенный для фотоэлектрических преобразователей ("солнечный" кремний), оказывается непригодным для данной специфической задачи.

Существует эмпирическое наблюдение, указывающее на то, что упругий изгиб кремниевой пластины толщиной H по цилиндру радиуса R возможен, если $R > 1000 H$. Для эффективного отклонения пучков критически важен оптимальный радиус изгиба R . Этот радиус, особенно при значительных углах, должен быть в диапазоне от 3 до 5 критических радиусов R_c ([34]).

Для кремния $R_c[\text{м}] = 0,0018 \times E [\text{ГэВ}]$. В результате, требование прочности материала ограничивает толщину используемых пластин: $H [\text{мм}]$ должна быть меньше $0,007E [\text{ГэВ}]$. Для отклонения частиц с энергией 70 ГэВ, лучше всего подойдет пластина толщиной примерно 0,5 мм.

Создание кристалла с определенным изгибом представляет собой сложную инженерную задачу. Раньше такие изогнутые кристаллы применялись в приборах для ядерной спектроскопии, где они помогали фокусировать рентгеновские и гамма-лучи. Для их изготовления применялись два основных метода: 1) изгиб с помощью цилиндрических зеркал; 2) метод моментов. Различия в применении изогнутых кристаллов для отклонения высокоэнергетических заряженных частиц и фокусировки гамма-лучей обусловлены фундаментальными отличиями в их траекториях. Гамма-лучи проходят через кристаллические пластины перпендикулярно их большим граням, тогда как заряженные частицы следуют вдоль специально вырезанных пластин. Из-за этого для отклонения заряженных частиц строгие требования к постоянству радиуса изгиба по продольной оси менее критичны (точность $\Delta R/R \sim 1\%$ считается приемлемой). Вместо этого, особое внимание уделяется форме краев изогнутых пластин. Важно, чтобы полный угол изгиба θ укладывался в пределы углового аксептанса существующих магнитооптических каналов транспортировки частиц, куда направляются пучки. Этот аксептанс обычно составляет около $\Delta\theta \approx 0,1$ мрад. Контроль такой точности

осуществляется путем измерения угла отражения лазерного луча при поступательном перемещении кристалла на микрометрическом столике.

В начале 1990-х годов в ИФВЭ проводились исследования изогнутых кристаллов, полученных с использованием метода изгиба на металлических зеркалах [21]. Однако, эта ранняя технология была вытеснена более совершенными подходами, поскольку избыточный материал вблизи кристалла значительно снижал производительность систем вывода. Современные решения для длинных кристаллов базируются на конструкции, использующей метод моментов четырехточечного изгиба (см. рисунок 1.3).

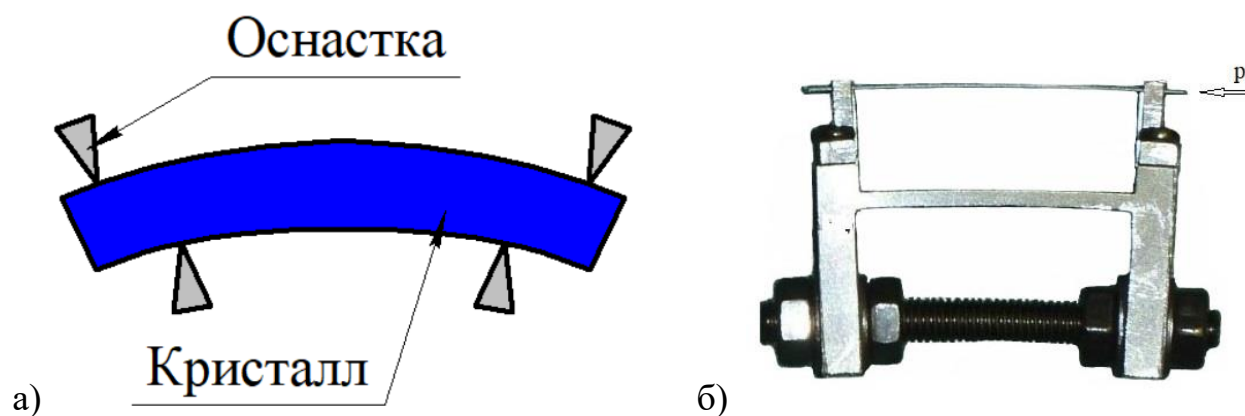


Рисунок 1.3 – а – схема изгиба, б – внешний вид устройства.

Для работы с короткими кристаллами разработаны две уникальные методики. Первая из них использует анизотропию кристаллической решетки. Принцип действия заключается в следующем: металлический кристаллодержатель индуцирует продольный изгибающий момент вдоль координаты Y . В результате анизотропии кристаллической решетки (см., например, [34] с. 85) возникает поперечный изгиб кристалла, радиус которого в несколько раз превышает радиус продольного изгиба (для кристаллов с ориентацией (111) этот коэффициент составляет приблизительно 4). Именно этот поперечный изгиб используется для отклонения пучка частиц (см. рисунок 1.4а). Конструктивные особенности, в частности, значительная высота кристалла, как показано на рисунке 1.5 (слева), позволили существенно снизить уровень фоновых условий, поскольку материал металлического держателя не попадает в траекторию пучка.

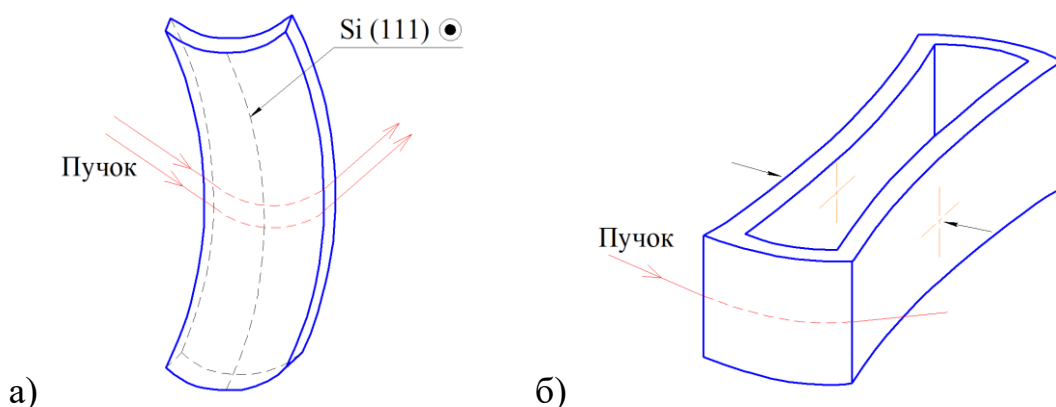


Рисунок 1.4 – а – схема изгиба кристалла-полоски (модифицировано по [25]),
б – схема изгиба О-кристалла (модифицировано по [26])

Специалисты ПИЯФ впоследствии разработали инновационную технологию, оптимальную для одновременной работы с внутренними мишенями. Её преимущество заключается в использовании кристалла с уменьшенной высотой, что критично для минимизации вертикального эмиттанса выводимого пучка [26]. Данная технология основана на изготовлении кристалла из монолитного материала в форме буквы "О". Изгиб кристалла достигается посредством компрессии его центральной части (см. рис. 1.4б).



Рисунок 1.5 – Внешний вид кристаллов в держателях: кристалл – полоска (слева) и О-кристалл (справа)

Типовые размеры рабочей зоны кристалла с ориентацией Si (110) составляют $0,6 \times 5 \times 5$ мм³ (толщина, высота, длина вдоль пучка). Внешний вид этого кристалла представлен на рисунке 1.5 справа.

Глава 2. Унифицированная станции кристаллических дефлекторов

Одним из востребованных режимов вывода пучка из ускорителя У-70 является вывод с применением кристаллических дефлекторов. Этот режим вывода является важным дополнением к режимам быстрого вывода, медленного вывода и вывода с использованием внутренних мишеней, расширяя возможности по обеспечению потребителей пучками заряженных частиц в регулярных сеансах на У-70. Данный способ позволяет вывести из вакуумной камеры ускорителя непосредственно пучок протонов с энергией ускорителя в широком диапазоне по интенсивности и углу вывода, без использования специальных магнитных систем, таких как, например, септум-магниты. При этом интенсивность (эффективность) вывода зависит от угла изгиба дефлектора.

Система вывода пучка с использованием кристаллических дефлекторов функционально включает в себя, так называемую, станцию кристаллических детекторов (СКД) (см. рисунок 2.1), на которую устанавливается кристалл, и систему управления СКД.



Рисунок 2.1 – Станция кристаллических дефлекторов с одной кареткой [1]

По мере увеличения числа потребителей пучка, выводимого из У-70 с использованием кристаллических дефлекторов, и расширения экспериментальных исследований кристаллических дефлекторов, увеличивалось количество различных новых СКД на периметре ускорителя и систем управления этими станциями. Для каждого нового потребителя пучка создавалась конкретно своя

станция и система управления в зависимости от длины используемого кристалла, угла изгиба кристалла, требуемой выводимой интенсивности и метода вывода пучка. Важно отметить, что конструкции каждой такой СКД отличались друг от друга, как и системы управления этими СКД. Кроме того, продолжительная практика работы выявила ряд недостатков конструкции разработанных ранее станций и их систем управления, таких как «выбег» каретки при установке на заданную координату, ограниченность диапазонов радиального и углового перемещений, необходимость различных схемных решений при создании аппаратуры управления горизонтальным и угловым перемещениями, сложность ремонта большого парка уникальных электронных модулей собственной разработки.

Для того чтобы обеспечить надежную эксплуатацию различных кристаллических дефлекторов (сейчас в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ используется и планируется использовать около десяти различных кристаллических дефлекторов) и устранить имеющиеся недостатки, была разработана новая унифицированная станция кристаллических дефлекторов и новый аппаратно-программный комплекс управления унифицированной станцией кристаллических дефлекторов. Было проведено тестирование нового оборудования в нескольких сеансах на У-70, которое позволило доработать рабочий прототип до серийного образца и подтвердило успешность проведенной модернизации.

Станция кристаллических дефлекторов устанавливается в специальную врезку («стакан») в вакуумную камеру У-70, после монтажа на рабочее место она становится частью вакуумного объема ускорителя. На рисунке 2.2 представлена полученная после модернизации унифицированная СКД.

Станция осуществляет тонкие угловые и линейные перемещения кристаллических дефлекторов, находясь в жестких условиях работы: в циклическом магнитном поле ускорителя, которое может варьироваться от 0 до 1,2 Тесла, в условиях вакуума 10^{-7} Торр, в условиях радиации с высокой мощностью дозы 0,01 Звт в час.

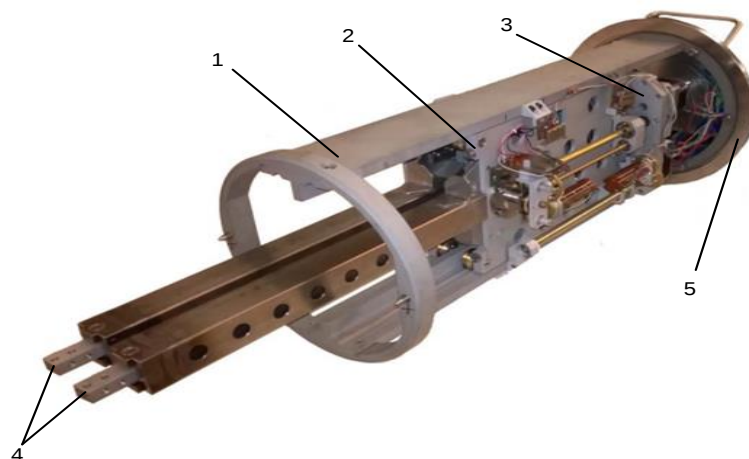


Рисунок 2.2 – Унифицированная СКД. 1 – каркас СКД, 2 – каретка линейных перемещений, 3 – корпус редуктора, 4 – кронштейн-держатель кристаллов, 5 – фланец вакуумного соединения [1]

Промышленность выпускает прецизионные вращательные платформы и линейные трансляторы, но они не могут работать в перечисленных условиях, эта сложная задача была решена в представленной конструкции. Точность позиционирования кристаллических дефлекторов унифицированной станцией обеспечена применением шаговых двигателей в комбинации с оптимально подобранными редукторами. Благодаря сухой смазке изделие способно долговременно работать в вакууме. Станция изготовлена исключительно из немагнитных материалов. Электродвигатели вынесены на значительное расстояние (около 1 м) из зоны высокой радиации и магнитного поля. Представим более подробное описание составных частей СКД и их взаимную связь.

1) Каркас СКД представляет собой две направляющие пластины (габаритные размеры 500×70 мм), обсаженные двумя кольцами (диаметр 200 мм), направляющие закреплены на кольцах симметрично относительно друг друга в вертикальной плоскости. В направляющих пластинах выполнены проточки, по которым на четырех роликах движется каретка линейных перемещений. Ход каретки – 150 мм.

2) Каретка линейных перемещений – подвижная платформа (160×230 мм), на которой установлены: механизм угловых перемещений (приводимый в движение посредством пары конических зубчатых колёс), коромысло угловых перемещений, на конце которого расположен кронштейн-держатель кристаллического

дефлектора, многооборотный потенциометр углового перемещения. При этом универсальность конструкции заключается в том, что она может использоваться с дефлекторами различных длин (от нескольких мм до нескольких см) и углов. Так как станция позволяет выводить пучок на конкретную экспериментальную установку, то обычно используется два близких по свойствам дефлектора, например, с углом изгиба 75 и 77 мрад. Это позволяет при организации вывода выбрать оптимальный режим, а в случае выхода из строя по различным причинам одного из дефлекторов, осуществлять вывод пучка в сеансе с использованием второго дефлектора без ремонта станции (замены дефлектора), не прекращая работу ускорительного комплекса.

3) Двигатели радиального и углового перемещения, редукторы радиального и углового перемещения, многооборотный потенциометр радиального перемещения установлены на неподвижной платформе-корпусе редуктора.

4) Радиальное движение кристаллического дефлектора, установленного на кронштейне держателе, обеспечивается передачей вращения с вала двигателя радиального перемещения через редуктор на винт, вращение которого перемещает каретку линейных перемещений.

5) Угловое перемещение кристаллического дефлектора обеспечивается путем передачи вращения с вала двигателя углового перемещения через редуктор на механизм угловых перемещений, который поворачивает коромысло угловых перемещений, а с ним и кристалл, вокруг вертикальной оси.

6) Подвижные контакты, установленных на СКД потенциометров (тип ППМЛ-И-10), соединены посредством зубчатых колёс с валами двигателей, соответственно углового и радиального перемещения. Таким образом, эти потенциометры служат для преобразования механического движения в аналоговый сигнал (0–5 В) и обеспечивают необходимую точность установки кристалла в пространстве.

7) Фланец вакуумного соединения СКД с боксом ионопровода ускорителя имеет два 30-контактных вакуумных разъёма (2РМ42КПН30Ш2В1), обеспечивающих электрические соединения СКД с системой дистанционного управления СКД, с

помощью двух многожильных кабелей. Управление станцией осуществляется дистанционно, с помощью автоматизированной системы управления СКД.

Некоторые технические характеристики унифицированной СКД:

1. Диапазон радиального перемещения кареток 150 мм.
2. Диапазон перемещения кристалла по углу 40 мрад.
3. Точность позиционирования кристалла по радиусу 0,1 мм.
4. Точность позиционирования кристалла по углу 10 мкрад.
5. Конструкция СКД рассчитана на рабочий уровень вакуума 10^{-7} Торр.

Перед установкой в тоннель ускорителя унифицированная СКД была проверена на точность механики с помощью лазерных автоколлиматоров по методике, описанной в работе [34,стр.86]. На рисунке 2.3 показаны результаты измерения неравномерности угла вращения, установленного на СКД кристалла, с помощью сравнения оптических измерений реального углового перемещения с интервалом движения двигателя, задаваемого в шагах программой. Измеренный уровень неравномерности движения не превышает величины 10 микрорад, сравнимой с величиной минимального шага углового перемещения и достаточной для проведения опытов с кристаллами на пучке У-70.

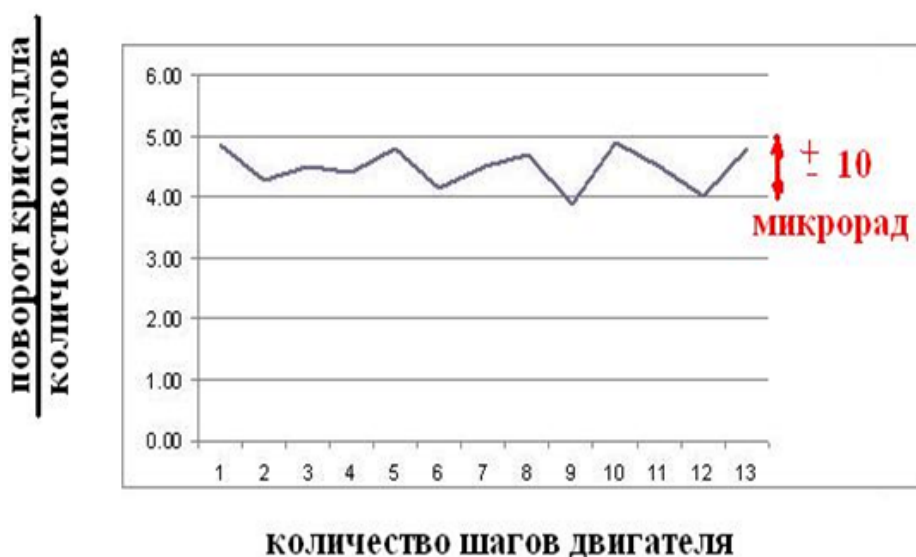


Рисунок 2.3 — Оптическая проверка равномерности угловых перемещений: на рисунке поворот кристалла, измеренный оптически по зеркальной поверхности кристалла, соотносится с углом вращения шагового двигателя [1]

2.1 Комплекс автоматизированного управления СКД

Комплекс автоматизированного управления СКД (см. рисунок 2.4) состоит из двух функциональных частей, а именно управляющей и периферийной.

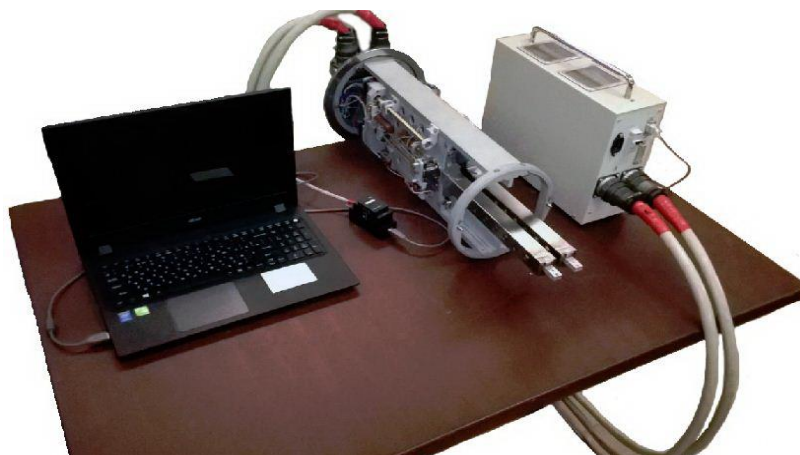


Рисунок 2.4 – Наладочный стенд комплекса автоматизированного управления СКД: слева – управляющая часть, в центре – СКД, справа – периферийный блок электронных модулей [1]

Управляющая часть комплекса автоматизированного управления содержит ПЭВМ со специально разработанным программным обеспечением, и располагается на пульте систем вывода заряженных частиц из ускорителя У-70. Периферийный блок управления расположен в непосредственной близости от станции кристаллических дефлекторов, в подвале ускорительного зала, где радиационное поле существенно ниже, чем на орбите У-70.

Взаимодействие управляющего с периферийным блоком происходит по протоколу RS-485. Скорость обмена 19200 бод. Обмен информацией между управляющим и периферийным блоком происходит по упрощённому варианту протокола в стандарте МЭК-1107. В состав периферийного блока входят:

Микропроцессорный модуль «M128-DRV-4»;

Модуль сигма-дельта АЦП «ADC8-24»;

Модуль драйверов для управления 4-мя шаговыми двигателями «DRV-4М».

Модульный источник питания AC250/24-12-5;

Стабилизированный источник питания для ППМЛ.

Периферийный блок подключается к станции кристаллических дефлекторов короткими перемычками кабелей типа ТПКВ24. Длина кабелей ограничивается наводками на сигнальные проводники.

Микроконтроллер, входящий в состав периферийного блока, осуществляет управление СКД, выдавая сигналы драйверу шаговых двигателей, получает и обрабатывает информацию с концевых выключателей и измерительных потенциометров, установленных на СКД. На рисунке 2.5 представлена схема взаимосвязи элементов одного канала многофункционального комплекса управления станциями кристаллических дефлекторов.

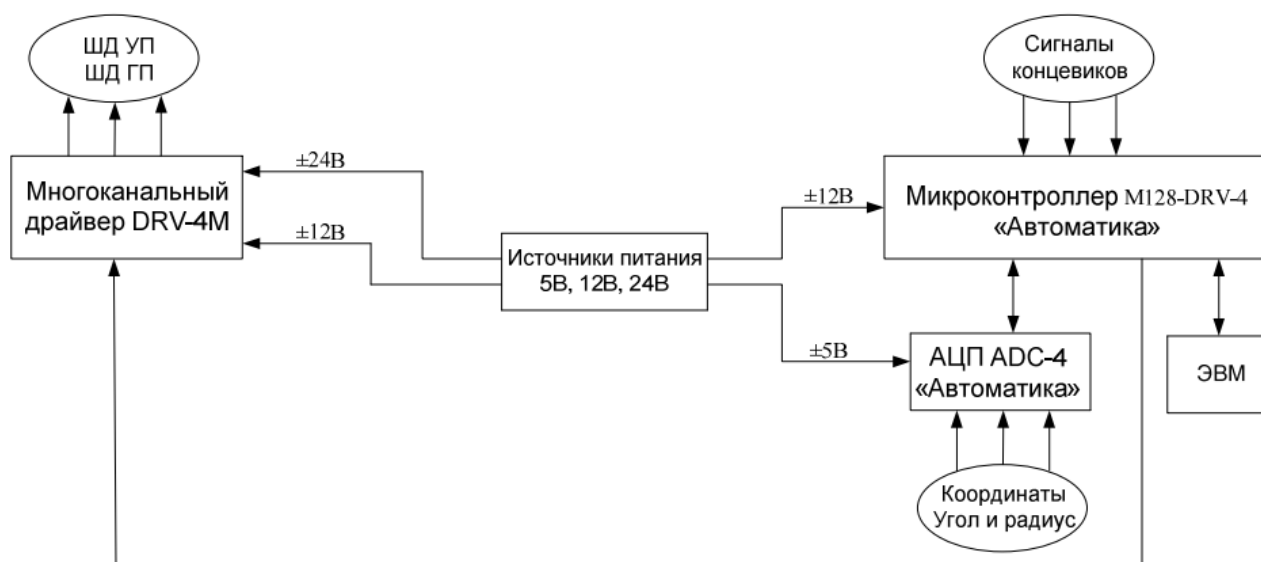


Рисунок 2.5 – Схема взаимосвязи элементов одного канала АСУ СКД [1]

ПО состоит из двух частей: программы управления СКД, выполняющейся на микроконтроллере в модуле M128-DRV-4 и программы рабочего места оператора, код которой исполняется на ПЭВМ, находящейся на пульте СВ. Упрощённая схема работы микроконтроллера представлена на рисунке 2.6. Данные с измерительных потенциометров оцифровываются с помощью сигма-дельта АЦП с точностью 16 двоичных разрядов. АЦП опрашивается с частотой 78 Гц. После инициализации периферийных устройств запускается бесконечный цикл, в котором опрашивается АЦП и проверяется наличие запроса от управляющей ЭВМ. При наличии запроса выполняются соответствующие запросу действия: запускается или

останавливается двигатель, сообщаются координаты СКД и состояние концевых выключателей.

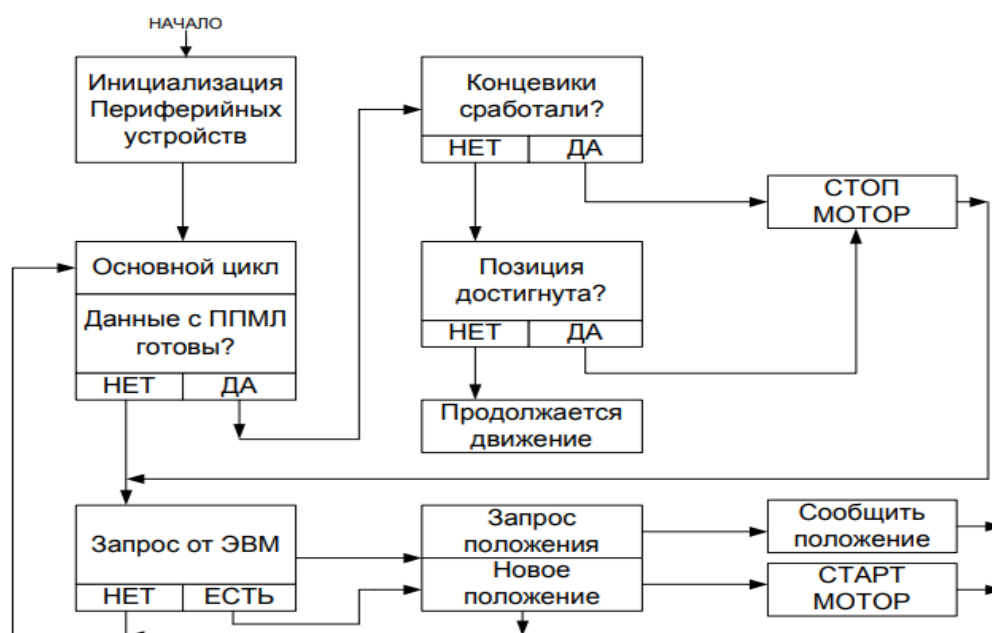


Рисунок 2.6 – Схема логики работы микроконтроллера M1128-DRV-4 [1]

При наличии запроса выполняются соответствующие запросу действия: запускается или останавливается двигатель, сообщаются координаты СКД и состояние концевых выключателей. В качестве операционной системы для управляющей ЭВМ выбран наиболее стабильный и широко распространённый вариант Linux/Debian [45]. Для реализации рабочего места оператора использовался инструментальный разрабатываемый программного обеспечения на языке C++ на базе библиотеки Qt [46]. Рабочий интерфейс программы АСУ СКД представлен на рисунке 2.7. Модуль драйверов «DRV-4М» предназначен для управления шаговыми двигателями типа FL39ST38-0504A. Модуль имеет групповую гальваническую развязку и обеспечивает ступенчатое регулирование выходного тока.

Работа комплекса автоматизированного управления СКД осуществляется следующим образом. При калибровке станции определяются функции зависимости величины напряжения, снимаемого с потенциометров, от величины перемещения кристаллического дефлектора между крайними положениями в радиальном и

угловом направлении. Создаётся таблица калибровочных параметров, которая содержит исходные данные для решения задач управления.

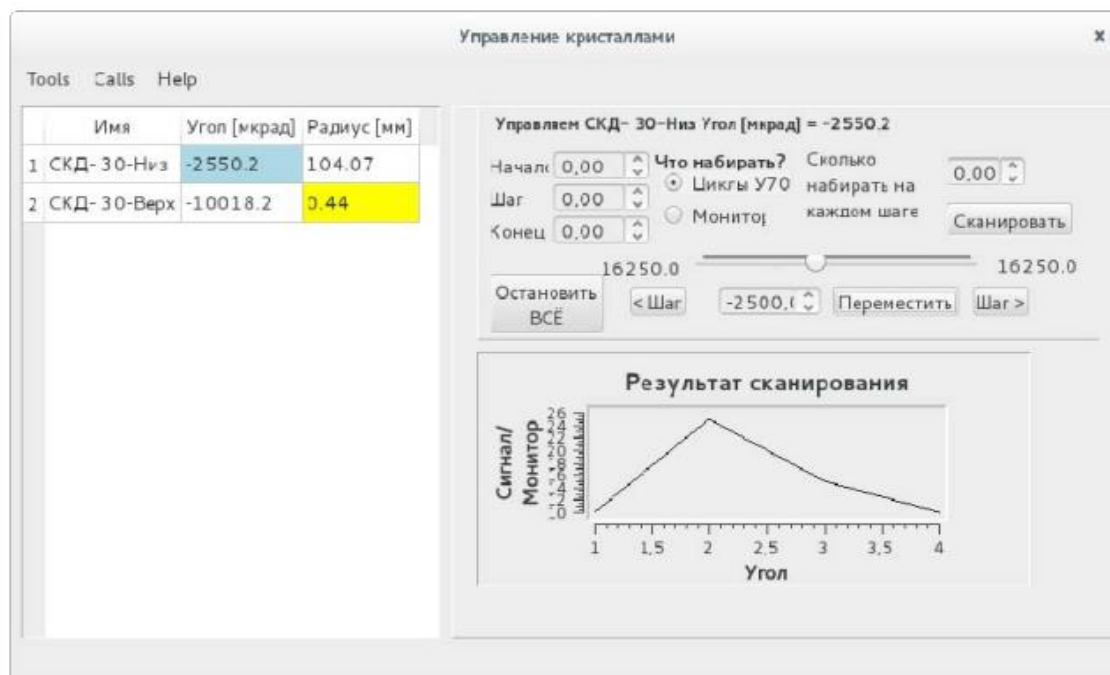


Рисунок 2.7 – Рабочий интерфейс программы АСУ СКД [1]

Оператор задаёт необходимое для работы значение координаты и отдаёт команду на исполнение. Если текущая координата не соответствует заданному значению, то ЭВМ определяет величину рассогласования между измеренным значением напряжения, снимаемого с потенциометра, и значением из таблицы соответствия. Соответствующая команда обработки поступает на исполнение. Описанный выше режим работы называется «Установка на заданную координату» (по радиусу либо по углу). Этот режим используется для начальной установки кристалла в рабочее положение под пучок заряженных частиц при настройке вывода заряженных частиц из ускорителя, либо для вывода кристалла из пучка заряженных частиц.

Возможен также режим работы «Управление по шагам». В этом режиме оператор может корректировать положение кристалла, на заранее предустановленное значение (по радиусу и по углу) с максимальной точностью, приписанное единице «шага». Техника исполнения такой команды стандартная. Этот режим является основным в процессе настройки вывода заряженных частиц с

помощью кристаллических дефлекторов (поиска режима каналирования). Описание системы управления можно найти в [47].

Первый экземпляр новой унифицированной станции и системы управления её был создан для проведения экспериментов с кристаллами на Протонном радиографическом комплексе (ПРГК-100) на ускорителе У-70 [48].

К настоящему моменту на периметре У-70 смонтированы шесть унифицированных СКД. Их расположение представлено на рисунке 2.8, они используются как для установки коротких, так и для длинных дефлекторов. СКД18, СКД19, СКД22 могут обеспечивать пучком потребителей в каналах № 8 и № 22. СКД30 может обеспечивать пучком потребителей в каналах № 8 и № 22, в режиме деления пучка кристаллом. СКД25 может обеспечивать пучком потребителей в каналах № 2 и № 14 [49,50]. СКД27 может обеспечивать пучком потребителей в канале № 4А.

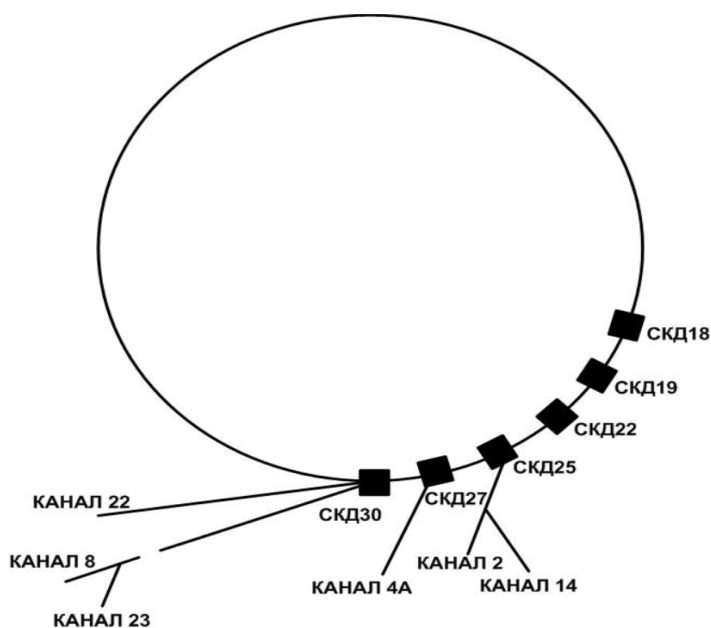


Рисунок 2.8 – Размещение унифицированных станций в У-70. Цифры соответствуют номеру магнитного блока У-70, в котором смонтирована СКД

На рисунке 2.9 представлена СКД с установленными кристаллическими дефлекторами. Часть из новых унифицированных СКД уже активно используются для проведения экспериментов и для обеспечения потребителей пучками заряженных частиц в сеансах на У-70. На рисунках 2.10 и 2.11 представлены фотоизображения и профили пучков протонов (размеры пучка в различных местах

трассы вывода), выведенных при помощи кристаллических дефлекторов (работающих в режиме каналирования), установленных на унифицированных СКД, для вывода на ПРГК-100 [48] и в канал № 22 при помощи СКД19.

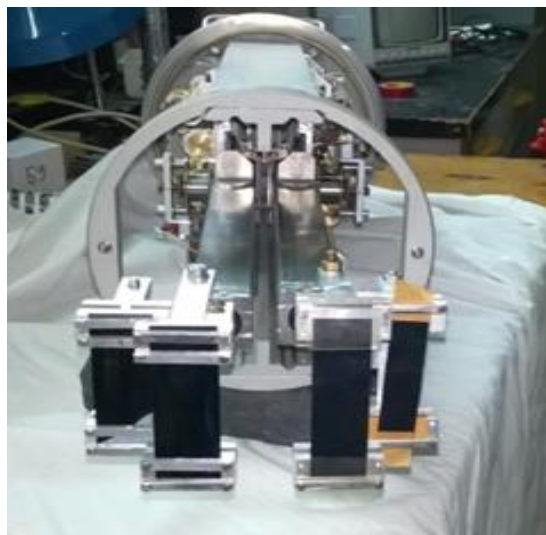


Рисунок 2.9 – Унифицированная станция СКД30 с установленными кристаллическими дефлекторами [1]

На рисунке 2.10 слева представлено фото выведенного кристаллом пучка, сделанное на физической установке, при проведении экспериментов по определению функции размытия точки на комплексе ПРГК-100. Кристаллическая станция была установлена непосредственно в канале транспортировки пучка комплекса ПРГК-100. Пучок из У-70 на ПРГК-100 выводился в режиме быстрого вывода, а затем часть этого пучка выводилась кристаллом непосредственно на экспериментальную установку, так как режим быстрого вывода пучка не может обеспечить необходимые условия для проведения данного эксперимента. На рисунке 2.10 справа представлено фото пучка на телевизионном экране канала (транспортировки пучка) № 22, этот пучок был выведен с помощью кристалла, установленного на СКД30. СКД30 смонтирована в конце прямолинейного промежутка № 30 магнита У-70. Она обеспечивает работу физических установок, расположенных как на канале № 8 (при медленном выводе в канал № 22), так и на канале № 22 (при медленном выводе в канал № 8) [8]. На рисунке 2.11 представлен профиль пучка выведенного в канал № 22 с помощью кристалла, установленного на СКД19, этот кристалл осуществляет заброс пучка протонов в апертуру септум-

магнита, расположенного в прямолинейном промежутке № 20 магнита У-70 и следующими септум-магнитами отклоняются в канал № 22, либо в канал № 8, где этот пучок обеспечивает работу физических установок, подробно методика настройки такого режима вывода описана в [2,26].

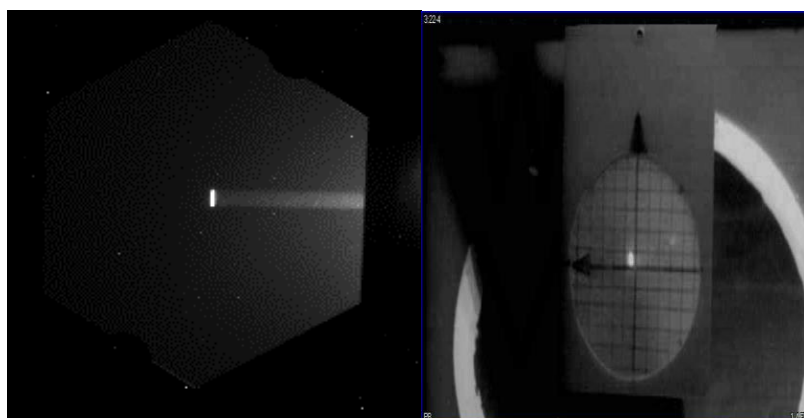


Рисунок 2.10 – Фотографии выведенных кристаллическими дефлекторами пучков протонов, обеспечивающих работу потребителей при проведении экспериментов на комплексе ПРГК-100 (слева) и в канале 22 (справа) [1]

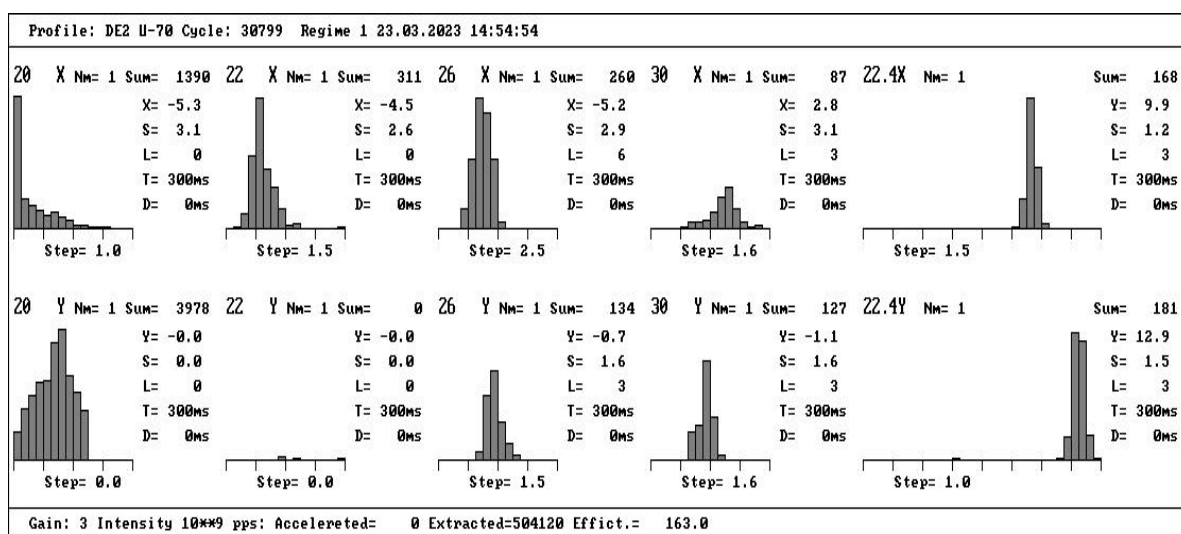


Рисунок 2.11 – Профили пучка, выведенного в канал 22 при работе СКД19. Здесь 20,22,26,30 - номера профилометров, они соответствуют номерам прямолинейных промежутков магнита У-70, в которых эти профилометры установлены. 22.4 - номер профилометра в канале транспортировки пучка [1]

Эффективность использования выведенного пучка заряженных частиц экспериментальной установкой во многом зависит от стабильности положения пучка на внешней мишени и стабильности его размеров. На рисунке 2.10 яркость пятна в центре на несколько порядков превышает интенсивность вторичного пучка

(дорожка справа). Размер пучка на рисунке 2.11 соответствует расчетам. Совокупность этих двух результатов указывает на низкий уровень вибрации при долговременной работе. Другим косвенным показателем является возможность экспериментальных установок работать с выведенным пучком в течение всего сеанса ускорительного комплекса без коррекции положения и угла кристаллического дефлектора.

Создание унифицированной станции кристаллических дефлекторов новой конструкции обеспечило улучшение технических характеристик, дало возможность размещать на СКД резервный рабочий кристалл или кристалл с другими параметрами, унификацию и упрощение системы управления угловым и радиальным перемещением кристалла. Это достигается за счёт размещения в том же объёме, что и в станциях старого типа, двух кареток вместо одной и применения унифицированных шаговых двигателей.

Создание нового автоматизированного комплекса управления станциями кристаллических дефлекторов дало следующие улучшения:

- значительное повышение точности позиционирования кристаллов;
- улучшение надежности работы СКД в сеансе (даже при проблеме с одним кристаллом возможен переход на работу с другим кристаллом без замены);
- существенное повышение оперативности управления выводом пучков частиц высоких энергий;
- значительное упрощение ремонта в случае выхода из строя комплекса управления;
- универсализацию комплекса управления, распространяемую на любую унифицированную станцию кристаллических дефлекторов, расположенную на У-70.

Таким образом, создание унифицированной станции кристаллических дефлекторов и новой системы управления привело к повышению коэффициента использования ускорительного времени при работе ускорителя. На сегодняшний день идет постепенная замена СКД и систем управления ими на новые унифицированные.

Глава 3. Достигнутые характеристики вывода пучка протонов кристаллами в течение длительной практики на У-70

3.1 Экспериментальные исследования эффективности вывода пучка протонов кристаллом в зависимости от угла изгиба

В ИФВЭ накоплен большой опыт применения изогнутых кристаллов для вывода протонов из ускорителя У-70 (см. [26] и ссылки в нем), а также опыт использования аморфных мишеней на циркулирующем пучке для генерации вторичных частиц [51], на которых сейчас работает примерно половина экспериментальных установок. Ранее было показано [26], что высокая эффективность вывода частиц, до $\sim 85\%$, достигается при углах изгиба кристалла около 1 мрад. Пучок частиц с интенсивностью 10^7 частиц в секунду при эффективности около 10^{-4} был получен в [21,52], где протоны выводились в направлении канала частиц № 2 под углом 80 мрад относительно орбиты пучка.

Для определения эффективности вывода протонов в зависимости от угла изгиба практический интерес представляют, как промежуточные углы изгиба, так и углы больше 80 мрад.

Эксперимент проводился на станции кристаллических дефлекторов СКД19, расположенной в начале магнитного блока ускорителя № 19 (см. рисунок 3.1).

Пучок подводился к кристаллу системой локального искажения орбиты, которая работала в режиме обратной связи по сигналу со сцинтилляционного детектора, регистрирующего потери пучка при прохождении через вещество кристалла. Таким образом, система позволяла обеспечивать режим вывода с длительностью до нескольких секунд. Локальное искажение орбиты создавалось дополнительными обмотками блоков № 16 и № 22 ускорителя (бамп 16/22) при рабочей координате кристалла +65 мм от равновесной орбиты. Стартовый ток, при котором пучок касался кристалла, равен ~ 106 А.



Рисунок 3.1 – Общий вид установленной на ускорителе станции с изогнутыми кристаллами [4]

На рисунке 3.2 представлены общий вид формы локального искажения орбиты и размеры пучков.

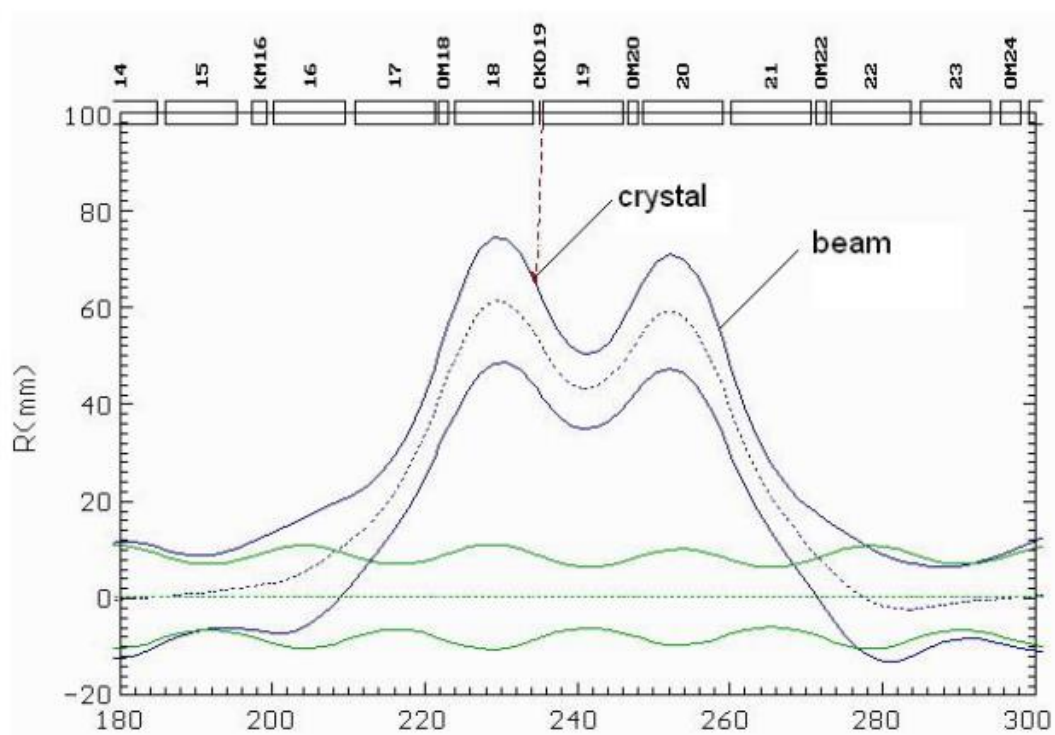


Рисунок 3.2 – Конфигурация локального искажения орбиты

Для проведения экспериментов были изготовлены кристаллы, которые с помощью специальных устройств изгибались на различные углы, а именно на 36 мрад, 64 мрад, 100 мрад, 135 мрад. На рисунке 3.3 показаны кристаллы, изогнутые в держателях на углы 36 мрад (более короткий) и 64 мрад.

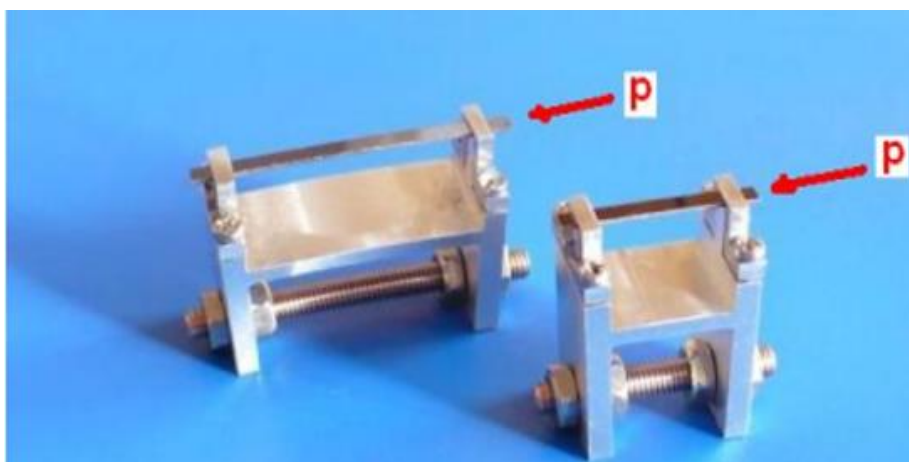


Рисунок 3.3 – Кристаллы с углами изгиба 36 и 64 мрад [4]

Показанная конструкция изгибающих устройств, протестированная на выведенном пучке, содержит небольшое количество материала в держателе и обеспечивает необходимые углы изгиба кристаллов с оптимальными размерами [53].

Важным моментом при проведении экспериментов являлось детектирование выведенного из ускорителя пучка, отклоненного кристаллом. С этой целью использовалась телевизионная система диагностики пучка. Система состоит из люминесцентного экрана и промышленной телевизионной камеры. Экран изготовлен из сцинтиллятора цезий-йод. Этот сцинтиллятор обладает высоким значением световыхода и спектром эмиссии, который хорошо согласуется со спектральной чувствительностью используемой видиконной камеры [54]. Экран располагался на расстоянии ~ 2 м от кристаллов вне вакуумной камеры, так как при больших углах изгиба кристаллов пучок выходил из ускорителя через стенку вакуумной камеры. Размер экрана по горизонтали был выбран исходя из предварительно выполненных расчетов по ожидаемому положению пучка для исследуемых кристаллов. На рисунке 3.4 представлено изображение выведенного пучка, снятого с экрана монитора в ходе эксперимента с одним из кристаллов. По яркости свечения можно сделать вывод о достаточно высокой эффективности вывода.



Рисунок 3.4 – Изображение выведенного пучка на люминофорном экране (яркое пятно) [4]

На рисунке 3.5 показаны осциллограммы сигналов некоторых процессов при взаимодействии пучка протонов с кристаллом.

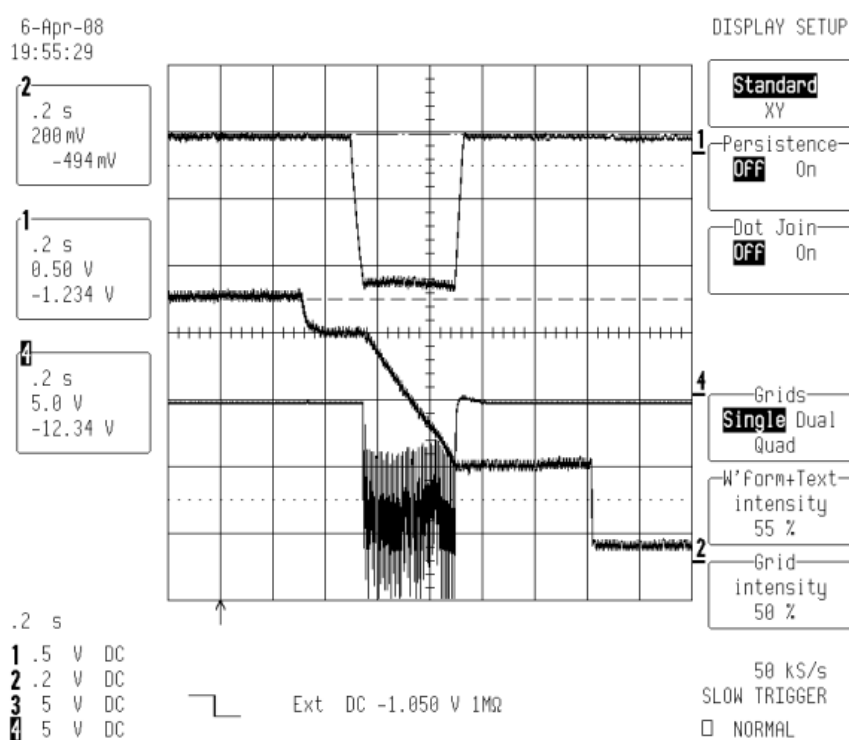


Рисунок 3.5 – Осциллограмма процесса наведения пучка на кристалл. Луч 1 – ток бампа 16/22 при наведении пучка на кристалл. Луч 2 – сигнал интенсивности циркулирующего пучка, верхнее положение луча соответствует начальной интенсивности I_0 , нижнее – отсутствию пучка. Луч 4 – сигнал детектора обратной связи при взаимодействии пучка с кристаллом.

Примерно за ~ 200 мс до начала наведения проводилось формирование пучка за счет обрезания гало ($\sim 0,13I_0$), для того чтобы работать с плотной частью пучка и минимизировать изменение тока бампа при наведении. Как видно из

осциллограммы, не весь пучок наводился на кристалл. В данном цикле полная интенсивность пучка составляла около 2×10^{12} протонов. Неиспользованная часть пучка ($\sim 0,34I_0$) сбрасывалась в конце плато на поглотитель в 86-м прямолинейном промежутке (ФЭП). Главной целью эксперимента являлось количественное измерение эффективности вывода. Для этого использовался метод активационного анализа.

3.1.1 Измерение эффективности вывода

Для измерения эффективности вывода активационным методом были изготовлены специальные детекторы, представляющие собой кассету, содержащую стопку фольг. В первом случае в качестве материала детектора использовались алюминиевая фольга размером $40 \times 0,5 \times 10$ мм³. Кассета содержала 60 таких фольг, и полные размеры детектора составили $40 \times 30 \times 10$ мм³ (высота, поперечный размер, длина вдоль пучка). Для оценки числа протонов, прошедших через детектор, использовалась реакция $^{27}\text{Al} (p, 3p\ n) ^{24}\text{Na}$.

Во втором эксперименте использовался детектор из графита с размерами полосок $50 \times 3 \times 20$ мм³. Такие полоски в количестве 17 штук были собраны в кассету с общими размерами $50 \times 51 \times 20$ мм³. В этом случае использовалась реакция $^{12}\text{C} (p, p\ n) ^{11}\text{C}$. На рисунке 3.6 изображен детектор с использованием графитовых полосок.

Процедура измерений заключалась в следующем. После оптимизации угла кристалла по отношению к падающему на кристалл пучку и визуального обнаружения пучка на люминесцентном экране на это место устанавливался активационный детектор, и проводилось его облучение. Во время экспозиции регистрировалась величина интенсивности пучка, сбрасываемой на кристалл. Длительность облучения определялась прежде всего необходимостью накопления достаточного числа используемых при обработке изотопов.

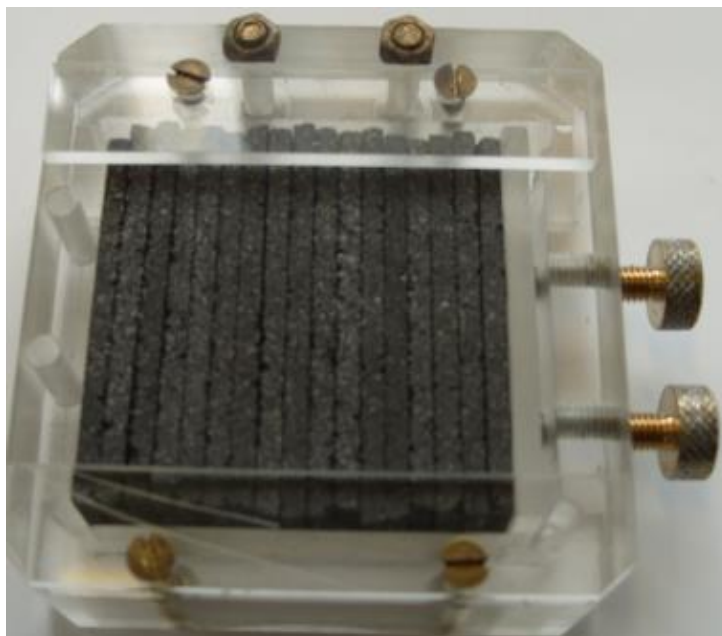


Рисунок 3.6 – Активационный детектор

Так, при облучении графита толщиной 2 см необходимо на образование одного ядра изотопа углерода ^{11}C сбросить в среднем 137 протонов. Неизвестным фактором была эффективность вывода, т.е. сколько протонов выводилось при фиксированной величине сброса на кристалл. Еще одним фактором, определяющим длительность экспозиции, являлся режим работы ускорителя, стабильность интенсивности пучка от цикла к циклу. В среднем за время экспериментов интенсивность пучка, сбрасываемого на кристалл, составляла 1×10^{12} протонов за цикл, и продолжительность экспозиции составляла 300 циклов.

После облучения кассеты с фольгами (или полосками) демонтировались и сразу проводились измерения активности каждой фольги. Полученная информация давала возможность восстановить профиль выведенного пучка и полную интенсивность прошедшего через детектор пучка.

Активность изотопов (в первом эксперименте ^{24}Na , во втором – ^{11}C) после облучения определялась в сцинтилляционном спектрометре с кристаллом NaI (Tl) диаметром 150 мм и высотой 150 мм. В первом случае измерялась по пику полного поглощения гамма-квантов с энергией 2754 кэВ, а во втором эксперименте – по пику полного поглощения аннигиляционных гамма-квантов с энергией 511 кэВ.

На рисунке 3.7 представлен измеренный такой методикой профиль пучка, выведенного одним из кристаллов.

Для обеспечения уверенности в полученных результатах были проведены дополнительные эксперименты. Один из них заключался в следующем. Контрольный детектор размещался в канале транспортировки, и на него выводился пучок в режиме быстрого вывода. При этом штатными средствами измерялись как интенсивность этого выведенного пучка, так и интенсивность забираемого из ускорителя пучка. Так как эффективность быстрого вывода близка к 100%, такой эксперимент позволял надежно подтверждать результаты активационного метода.

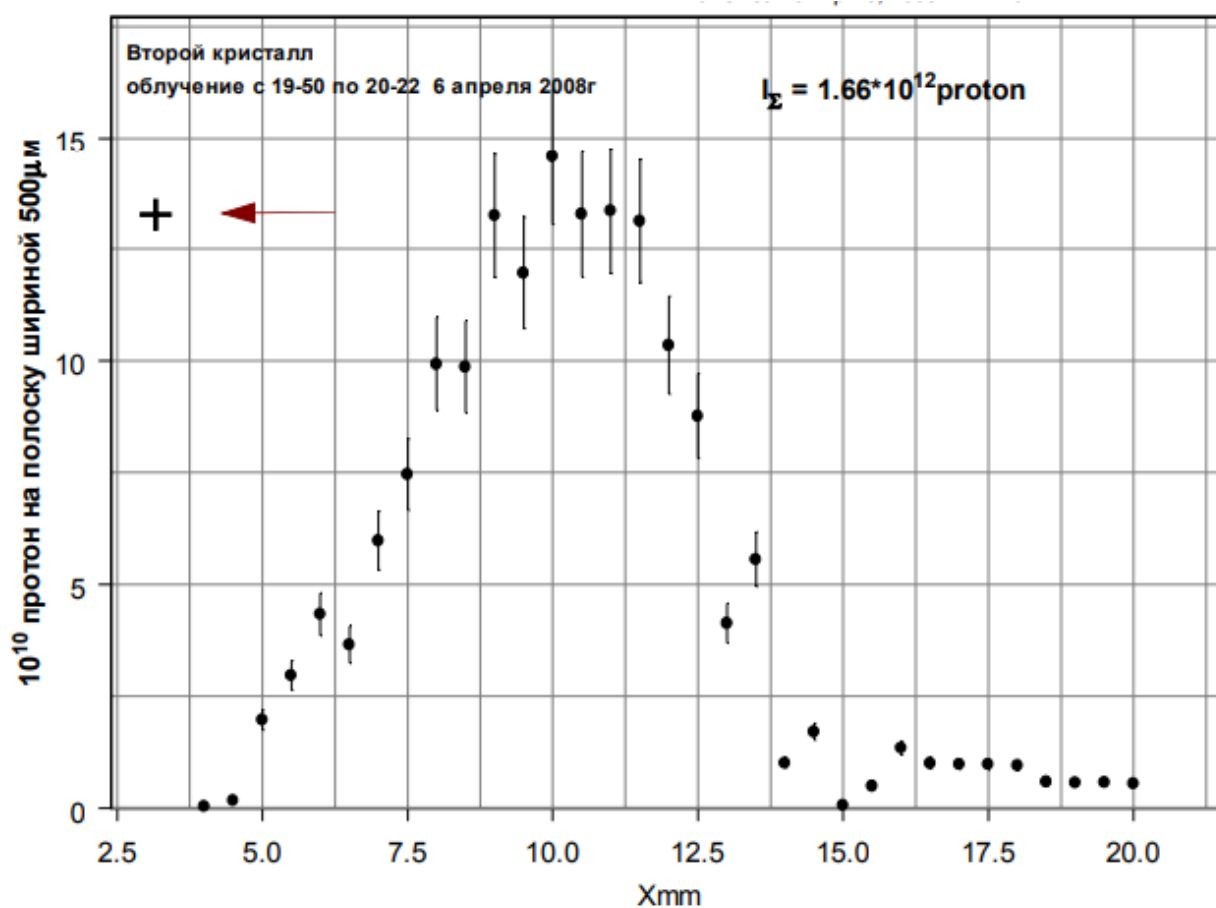


Рисунок 3.7 – Профиль пучка, измеренный активационным методом [4]

Еще одним способом подтверждения достоверности полученной в эксперименте информации являлось измерение времени полураспада изотопов. С этой целью одна из облученных фольг (пластинок) периодически измерялась на спектрометре.

Измеренный таким образом период полураспада изотопа ^{24}Na составлял $(15,00 \pm 0,06)$ часа, что в пределах погрешности измерений совпадает с принятым в литературе значением $(14,9590 \pm 0,0012)$ часа.

Для изотопа ^{11}C измеренный период полураспада равен $(20,42 \pm 0,05)$ мин, что также совпадает с литературными данными $(20,39 \pm 0,02)$ мин.

3.1.2 Экспериментальные результаты

В ходе серии экспериментов были проведены измерения для четырех кристаллов, изогнутых под различными углами. Результаты, представленные в [4], были дополнены и уточнены в ходе последующих исследований, выполненных по аналогичной методике [6]. Энергия протонов при этом составляла $E = 50$ ГэВ. Характеристики кристаллов представлены в таблице 3.1. В скобках указана длина изогнутой части кристалла.

Таблица 3.1 Характеристики кристаллов

№ кристалла	материал	Размеры (мм) длина, высота, толщина	Угол изгиба (мрад)
1	кремний	25(16) × 2,5 × 0,5	$\sim 36 \pm 1$
2	кремний	40(31) × 2,5 × 0,5	$\sim 64 \pm 1$
3	кремний	53(30) × 2,0 × 1,0	$\sim 100 \pm 1,5$
4	кремний	70(55) × 2,0 × 1,5	$\sim 135 \pm 1,5$

Полученные в ходе экспериментов результаты [4,6], а также ранее опубликованные данные [21,26], представлены на рисунке 3.8. На этом же рисунке приведены данные компьютерного моделирования. В расчетах учитывался многооборотный характер движения частиц через кристалл, и рассматривалось взаимодействие частиц с кристаллом и держателем. Канализующие свойства кристалла описывались программой SCRAPER [55].

В расчетах рассматривался многооборотный характер движения частиц в реальной структуре ускорителя и многократное взаимодействие их с кристаллом. При расчетах прохождения частиц через кристалл использовался метод Монте-Карло с учетом влияния искривленного межплоскостного электрического поля. Рассматривались процессы многократного кулоновского рассеяния, ионизационных потерь, синхротронного излучения, неупругого, дифракционного и упругого ядерного взаимодействий.

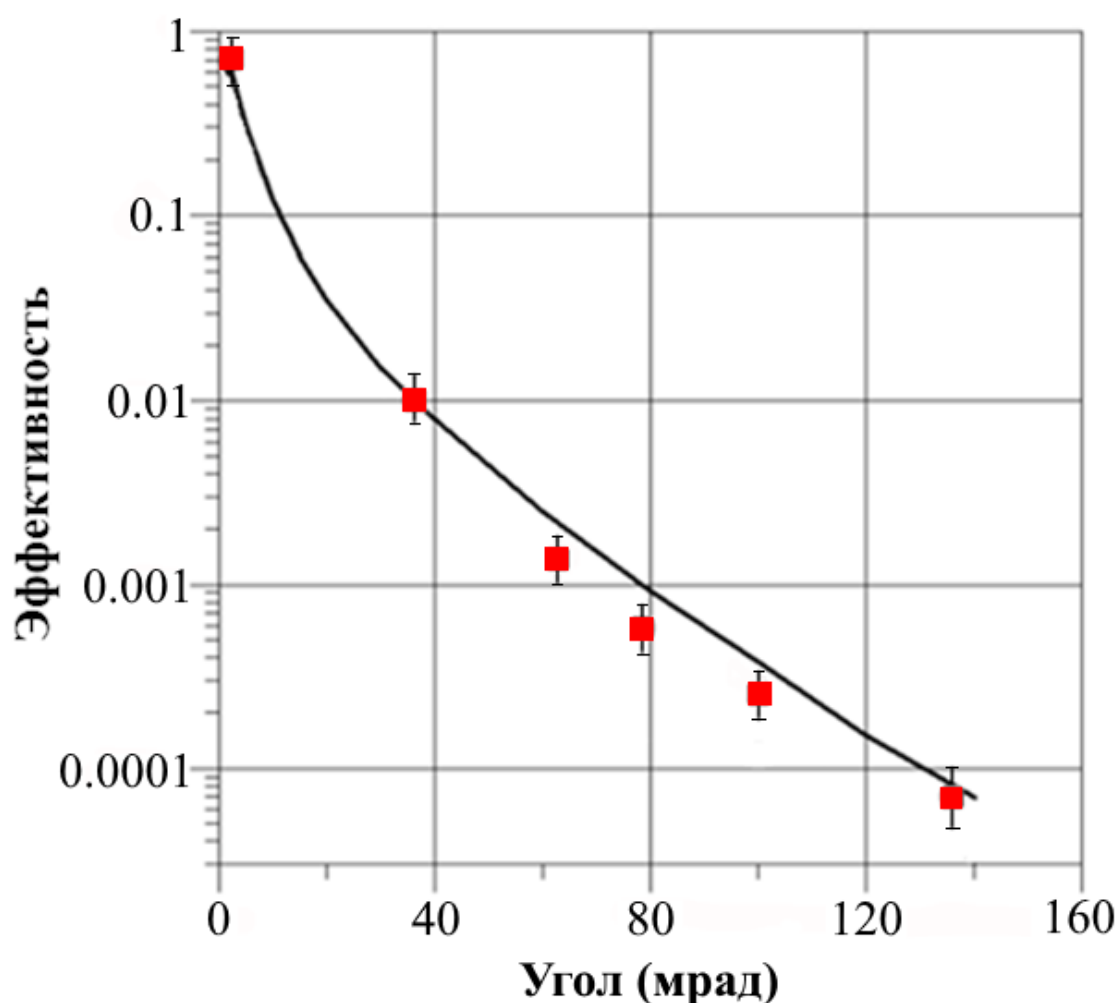


Рисунок 3.8 – Зависимость эффективности вывода пучка протонов из У-70 от угла изгиба кристалла. Точки – эксперимент, кривая – расчет по программе СКРЕПЕР (модифицированно по [6])

Как видно из рисунка 3.8, наблюдается хорошее согласие с расчетом экспериментальных данных, полученных для протонов энергии 50 ГэВ (сплошная кривая). Полученные зависимости эффективности вывода пучка кристаллом от угла изгиба характерны не только для У-70. Эти данные отражают общую

закономерность для ускорителей и коллайдеров с учётом незначительных вариаций, учитывающих особенности расположения кристаллов и параметры конкретных машин.

3.2 Вывод пучка протонов с помощью различных типов изогнутых кристаллов

Идеи использования каналирования частиц в изогнутых кристаллах для управления пучками были проверены и развиты во многих экспериментах [19,28,29,30,58,59]. Аспекты физики кристаллического каналирования описаны в [34,60]. Здесь мы сосредоточимся на применении изогнутых кристаллов и описании кристаллических устройств.

Метод использования изогнутых кристаллов для вывода протонов развивался на ускорителе У-70 ИФВЭ в течение 30 лет [1,4,24,25,31,61,62]. В настоящее время реализованы различные схемы вывода с использованием изогнутых кристаллов и соответствующего технического оборудования, как для вывода пучка, так и для экспериментов по тестированию новых кристаллических устройств и изучению процессов коллимации пучка. К данному моменту на У-70 имеется 12 станций кристаллических дефлекторов, на которых установлены различные кристаллы. На У-70 реализованы три различных способа использования изогнутых кристаллов для физических исследований. Расскажем о каждом из них.

3.2.1 Вывод с помощью длинных кристаллов

Один из способов использования изогнутых кристаллов — прямой вывод протонов с помощью кристалла из вакуумной камеры ускорителя. В этом случае используются длинные кристаллы, которые позволяют получать большие углы отклонения, сравнимые с θ_{max} , для направления пучка из ускорителя в канал транспортировки пучка. На ускорителе У-70 есть три такие станции в (СКД24,

СКД25, СКД27). Они позволяют выводить пучки протонов на экспериментальные установки, которые обычно работают со вторичными частицами от внутренних мишеней. Углы изгиба кристаллов, установленных на таких станциях, составляют (80–90) мрад, а длина кристаллов — (60–70) мм. На рисунке 3.9 показан общий вид такого типа кристаллических дефлекторов. На рисунке 3.10 показаны результаты работы данного устройства. Как показывают наблюдения на люминесцентном экране и данные годоскопов установки СПАСЧАРМ, выведенный пучок настолько компактен, что не требует фокусировки квадрупольями для транспортировки на сотни метров. Из-за большой длины кристалла и угла изгиба эффективность вывода низкая, порядка 10^{-4} .

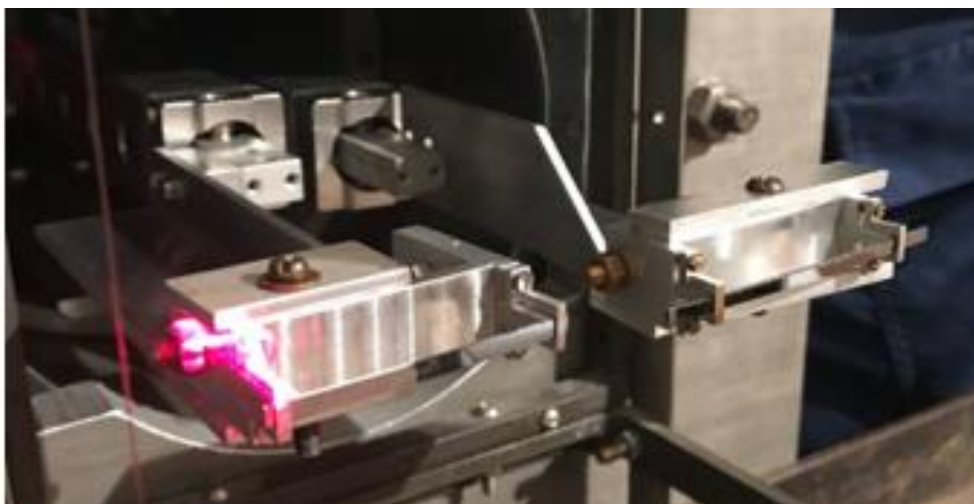


Рисунок 3.9 – Кристаллические дефлекторы, установленные на унифицированную СКД25, значительный продольный изгиб обеспечивается за счет металлического держателя

Использование данных кристаллов позволяет организовать параллельный вывод пучка на плато магнитного цикла ускорителя У-70 [6]. В качестве примера можно привести конфигурацию, при которой внутренняя мишень в 35-м блоке работает одновременно с двумя кристаллами в 25-м и 27-м блоках, обеспечивая работу экспериментальных установок ГИПЕРОН, СПАСЧАРМ и ИСТРА-КРИСТАЛЛ, либо внутренние мишени в 27-м и 35-м блоках работают параллельно с кристаллом в 24-м блоке, обеспечивая работу экспериментальных установок ВЕС, ГИПЕРОН и СПАСЧАРМ. Возможны и другие варианты. Режим вывода с помощью кристаллов гибко адаптируется под задачи экспериментальных

установок. Конкретная конфигурация определяется расписанием работы физических установок и их потребностями.

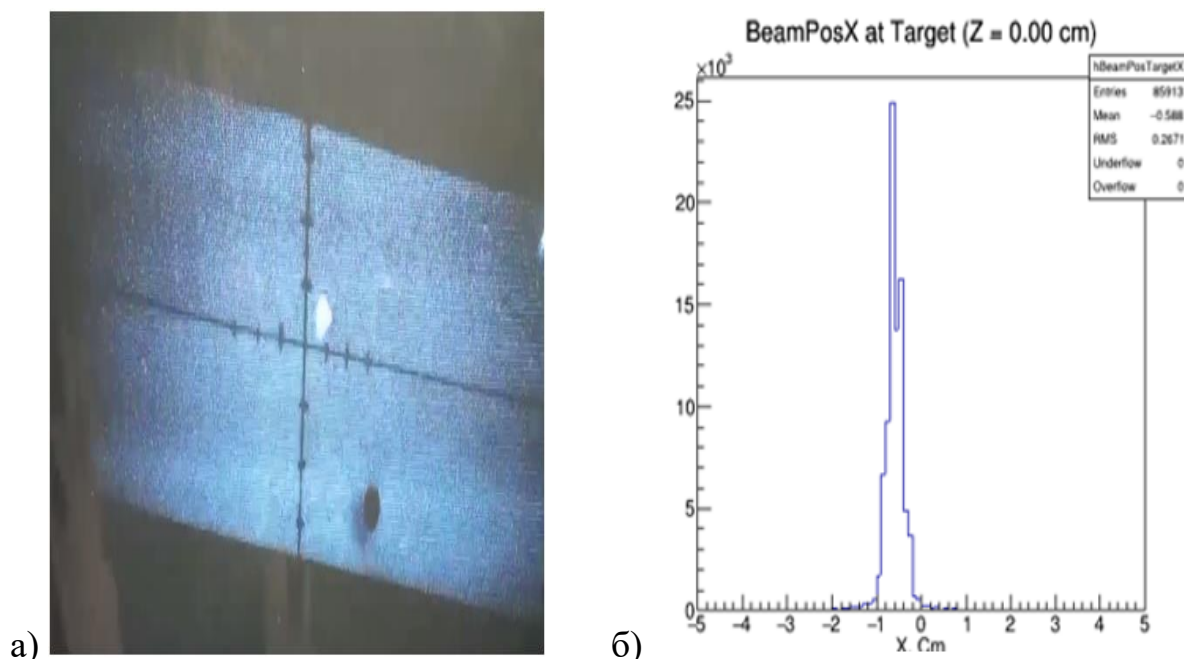


Рисунок 3.10 – а) изображение пучка, выведенного с помощью СКД25 на люминесцентном экране. б) профиль пучка, выведенного с помощью СКД25 на мишень установки СПАСЧАРМ, полученный по данным пучковых годоскопов установки

На рисунке 3.11 представлен режим работы СКД25, при выводе пучка в канал № 14 видно, что обеспечен равномерный сброс.

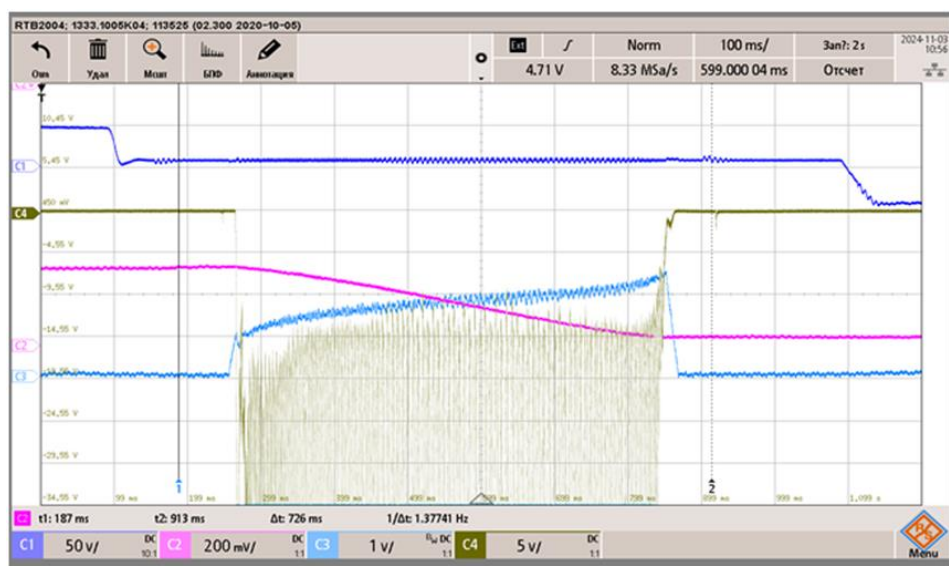


Рисунок 3.11 – Режим работы СКД25 в канал № 14. Синий луч – цикл У-70, розовый луч – интенсивность, голубой луч – ток бампа наведения пучка на кристалл, зеленый луч – сигнал монитора пучка (сцинтиллятор+ФЭУ) установленного в районе СКД25

На рисунке 3.12 представлен режим параллельной работы внутренней мишени в 35-м блоке У-70 и двух кристаллов в 25-м и 27-м блоках.

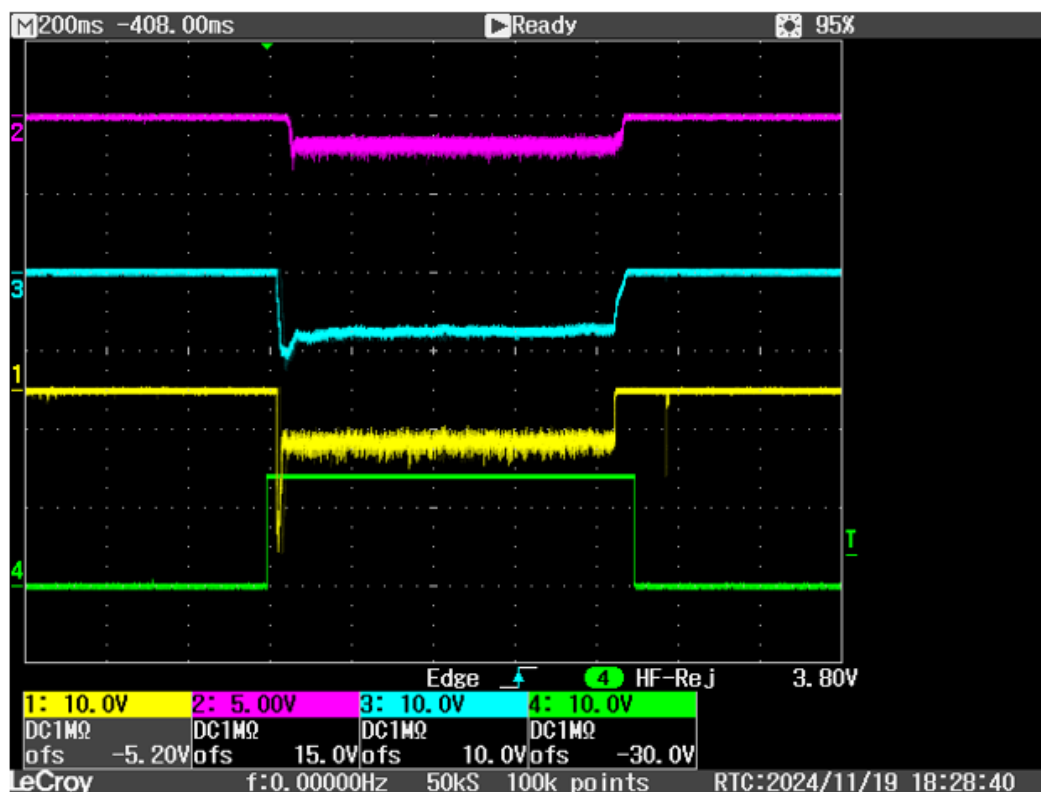


Рисунок 3.12 – Сигналы мониторов пучка при работе установок Гиперон, СПАСЧАРМ и ИСТРА-КРИСТАЛЛ. Розовый луч – сигнал монитора пучка, расположенного в районе внутренней мишени в 35-м блоке У-70; голубой луч – сигнал монитора пучка, расположенного в районе СКД25; желтый луч – сигнал монитора пучка, расположенного в районе СКД27

3.2.2 Вывод с помощью коротких кристаллов

В работе [63] было предсказано, что эффективность вывода пучка кристаллом может быть значительно повышена при многократных проходах частиц через короткий кристалл (длиной около 1 мм), установленный на циркулирующем пучке. Эта возможность была реализована с помощью кристаллов, описанных ниже. Главное здесь заключается в использовании коротких кристаллов с малым углом отклонения. Небольшого угла отклонения (от 0,5 мрад, при длине 1,5 мм) достаточно, чтобы направить пучок в апертуру септум-магнита, который затем обеспечивает больший угол отклонения, необходимый для вывода пучка из камеры ускорителя. Фотографии таких кристаллических

дефлекторов (установленных на СКД19) представлены на рисунке 1.5. Схема высокоэффективного вывода пучка (для СКД18 и СКД19) с использованием этих типов дефлекторов представлена на рисунке 3.13. Этот режим вывода позволяет работать одновременно с внутренними мишенями [6]. Примером является следующая конфигурация: работа СКД19 для канала № 8 совместно с тремя внутренними мишенями в 24-м, 27-м и 35-м блоках У-70 для установок СПАСЧАРМ (канал № 14), ВЕС (канал № 4) и ГИПЕРОН (канал № 18).

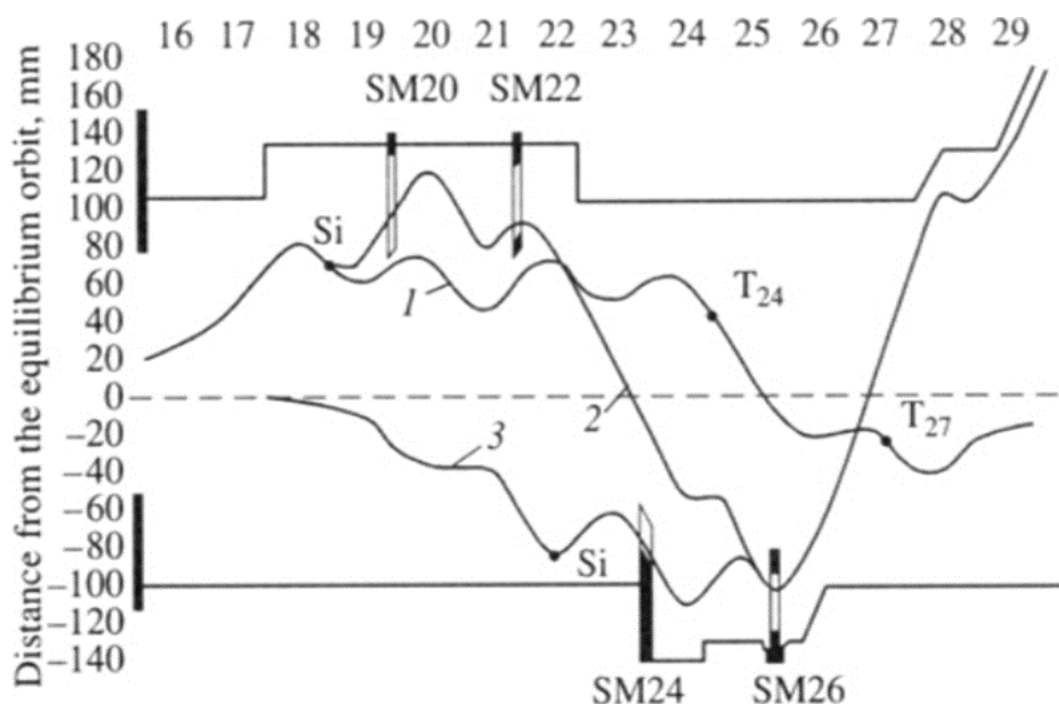


Рисунок 3.13 – Схема высокоэффективного вывода пучка с помощью кристаллических дефлекторов. Si — кристаллические дефлекторы, SM — септум-магниты, T — внутренние мишени, 1 — траектория циркулирующего пучка, 2 — траектория вывода с помощью СКД19, 3 — траектория вывода с помощью СКД22 [6]

На данный момент на ускорителе У-70 введена в строй третья станция кристаллических дефлекторов с такими типами кристаллов, а именно СКД18 (в дополнение к двум имевшимся СКД19 и СКД22). Эти станции способны обеспечивать работу экспериментальных установок на каналах № 22 и № 8. Обычно эффективность вывода с помощью такого типа кристаллов варьируется в пределах (35–45) %, и определяется конкретными условиями работы (до ~85%

[26]). На рисунке 2.11 представлены профили пучка, выведенного в канал № 22 с помощью СКД19.

На рисунке 3.14 представлена эффективность вывода пучка протонов слабо изогнутым кристаллом в зависимости от длины кристалла (эффективность вывода пучка кристаллом растёт с уменьшением длины кристалла)

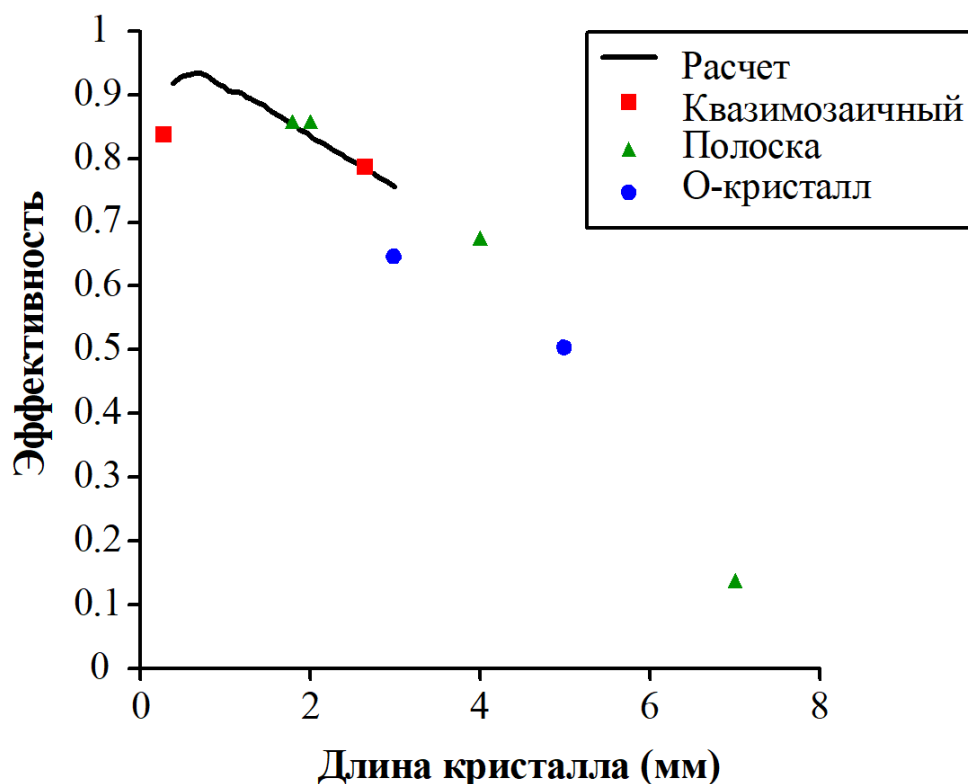


Рисунок. 3.14 –Эффективность вывода пучка слабо изогнутым кристаллом в зависимости от длины кристалла (вдоль пучка) разных типов кристаллов и компьютерного моделирования (модифицировано по [25]).

3.2.3 Деление пучка кристаллом

Ещё один способ вывода с помощью кристаллических дефлекторов заключается в разделении выведенного пучка с помощью кристалла. Для этого режима используется новая унифицированная СКД30, которая смонтирована в прямолинейном промежутке № 30 ускорителя У-70, на ней установлены кристаллы, которые на 9 мрад отклоняют одну тысячную основного пучка (обычно это $\sim 10^8$ – 10^9 протонов за цикл) в каналы транспортировки № 8/21/23 или № 22 (см.

рисунок 3.15). При этом в направлении каналов № 8/21/23 возможны различные режимы медленного вывода пучка (резонансного стохастического либо медленного вывода с помощью изогнутого кристалла, расположенного в кольце ускорителя) без ограничения интенсивности. В старой конфигурации станция располагалась в конце блока № 29 ускорителя У-70, перед квадрупольной линзой Л30 (см. рисунок 3.15). Это приводило к тому, что отклоненный кристаллом пучок попадал в линзу со смещением в горизонтальной плоскости ~ 6 мм при осевом прохождении основного пучка.

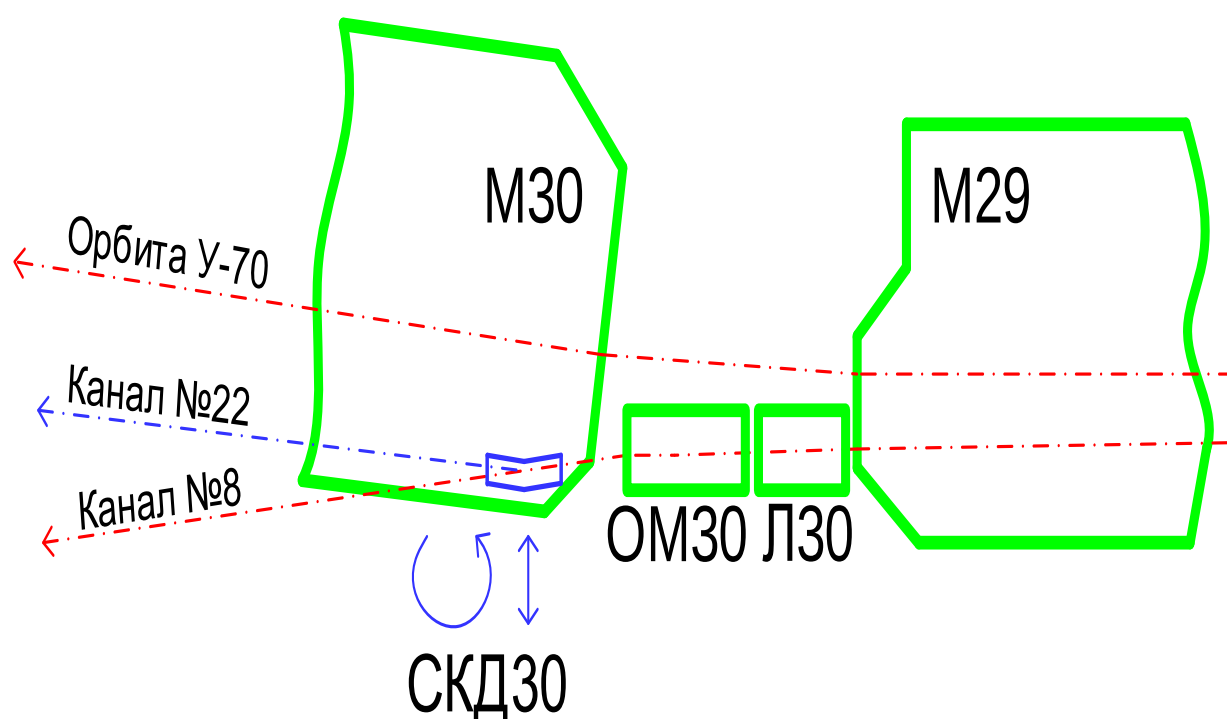


Рисунок 3.15 – Схема отклонения пучка в канал №22 с помощью кристаллического сплиттера. СКД30 – станция кристаллических дефлекторов, ОМ30 – отклоняющий магнит, Л30 – квадрупольная линза, М29 и М30 – магнитные блоки ускорителя У-70 (модифицировано по [8])

В новой СКД30 двигатели, обеспечивающие перемещение кристалла-сплиттера по координате и углу, вынесены на расстояние ~ 660 мм от трассы выводимого пучка, что существенно снижает величину магнитного поля ускорителя, действующего на станцию, т.к. станция расположена в непосредственной близости к ускорителю. Механизм станции обеспечивает радиальное перемещение кристалла-сплиттера и установку его в рабочее положение с точностью 0,1 мм. Полный ход каретки с кристаллом составляет 115

мм. В выведенном положении кристалл находится на значительном удалении от пучка, что существенно снижает его облучение.

Дистанционно управляемый гониометр, установленный на станции, создан на основе использования шагового двигателя и обеспечивает вращение сплиттера вокруг вертикальной оси с точностью 10 мкрад. Такая точность обеспечивает надежную юстировку кристалла по углу в максимуме функции распределения плотности пучка с расходимостью $\sim 0,5$ мрад. Полный диапазон углового перемещения равен 40 мрад, что обеспечивает возможность уверенного нахождения рабочего угла при ожидаемых погрешностях в монтаже станции на рабочем месте в диапазоне ± 5 мрад.

Поле раздаточного магнита ОМ30 обеспечивает угол ± 4 мрад отклонения пучка, так что угол разводки каналов 8 мрад. С учетом смещения центра поворота вдоль трассы (в кристалле по сравнению с магнитом), оптимальный угол изгиба кристалла составляет 10 мрад. Ранее подобный изгиб кристалла осуществлялся металлическими скобами (см. [34], стр. 85), так или иначе вносящими дополнительное вещество в пучок и, как следствие, вызывающими потери частиц из-за ядерных взаимодействий. Изготовление изогнутого кристалла с использованием двух оригинальных методов позволило снизить потери частиц при делении пучка до 0,01%, что на порядок лучше, чем в первых экспериментах.

Первый способ заключается в придании кристаллу кривизны с помощью нанесения на одну из его поверхностей микроканавок (глубиной около 20 микрон), вызывающих неглубокие зоны с дефектами, которые создают суммарные напряжения, способные изгибать кристалл. Рисунок 3.16а показывает принцип, а рисунок 3.16б реализацию этого метода. Другой способ изгиба кристаллической пластины связан с использованием анизотропных свойств атомной решетки [64]. При продольном изгибе пластины (рисунок 1.4а) возникает заметный поперечный изгиб. Этот эффект обеспечивается специальной конструкцией держателя кристалла (см. рисунок 1.3б). В новом приборе мы совместили оба этих метода: кристалл с канавками на поверхности дополнительно изгибался в устройстве типа (см. рисунок 2.9). Такой подход обеспечивает высокий темп изгиба кристалла –



Рисунок 3.16 (а, б) – Изгиб кристалла с помощью нанесения микроканалов на его поверхности [8]

Толщина кристалла была 0,5 мм, а вертикальный размер 50 мм. С учетом геометрии наведения пучка (при его размере 15 мм) потери частиц на кристалле в результате ядерных взаимодействий составили 0,01% от интенсивности всего пучка. Это приемлемая величина для любой интенсивности протонных и ионных пучков на У-70, вплоть до 10^{13} частиц в цикле. В ходе наладки станции при работе с пучком были использованы штатные средства диагностики пучка ускорительного комплекса [26, стр.65-74]. Однако при выводе в канал № 22 пучка с интенсивностью ниже 10^9 протонов за цикл работы ускорителя проблема детектирования осложняется из-за фоновых условий, вызываемых близостью расположения головной части канала к ускорителю. Для контроля положения и размеров пучка использовалась телевизионная система диагностики, в состав которой входят промышленные ПЗС-камеры и люминофор цезий-йод. В ходе эксперимента была измерена ориентационная кривая – зависимость интенсивности отклоненного кристаллом пучка за счет явления каналирования от угла ориентации кристалла относительно падающего пучка. Эта зависимость представлена на рисунке 3.17. В сеансах на У-70 были проведены исследования в широком

диапазоне интенсивности делимого пучка от 10^{11} до 10^7 протонов в цикле работы ускорителя. При этом эффективность кристалла-сплиттера оставалась неизменной и составила $\sim 10^{-3}$. С учетом геометрического фактора (соотношения размеров пучка и кристалла), эта величина хорошо согласуется с теоретическими моделями, описанными в [33].

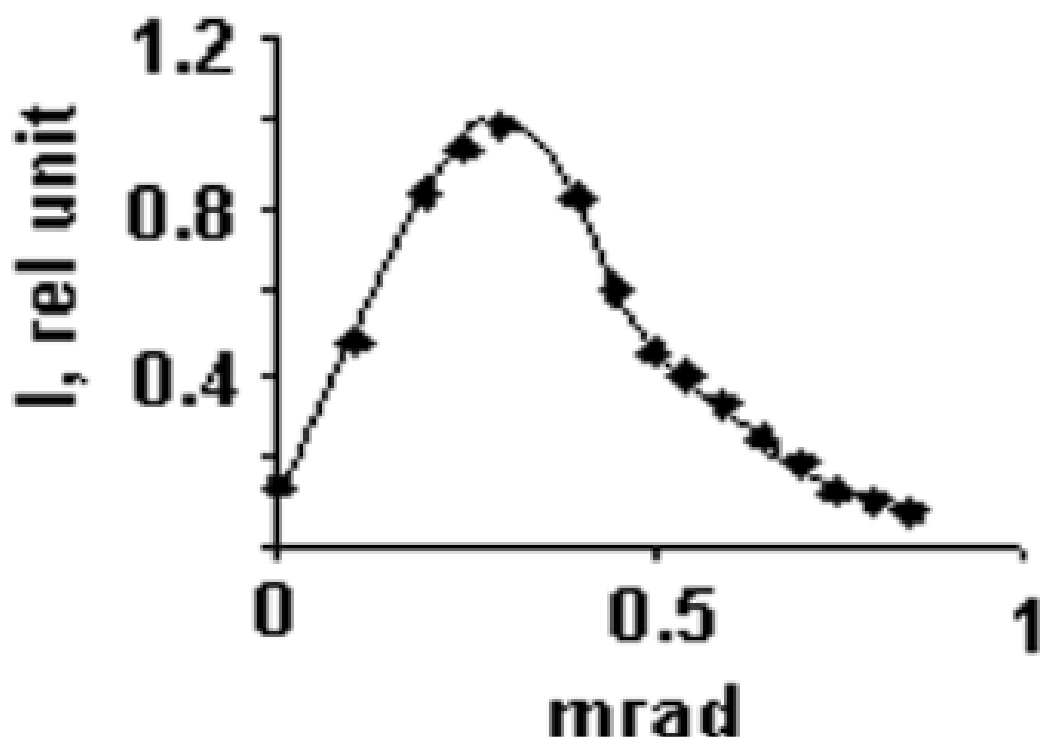


Рисунок 3.17 – Ориентационная кривая интенсивности отклоненного пучка [8]

В этом режиме обеспечивалась работа в сеансах физической экспериментальной установки СВД-2 [65,66], а после окончания её программы другой экспериментальной установки ФОДС [67,68]. Было зафиксировано, что размер выводимого в этом режиме протонного пучка значительно меньше, чем в режиме медленного вывода пучка изогнутым кристаллом, работающим в кольце параллельно с внутренними мишенями. Кроме того, фоновые условия на экспериментальной установке также существенно лучше, так как полярность включения раздаточного магнита ОМ30 соответствует основному направлению вывода, т.е. направлению каналов № 8/21/23. В этом случае все фоновые частицы, наряду с основным пучком, отклоняются в этом направлении. Частицы, рассеянные на веществе кристалла, также не попадают в канал № 22.

Так как стабильность характеристик выводимого таким образом пучка зависит от параметров основного пучка (его координаты и угла в месте расположения кристалла), то важным является исследование этих зависимостей. С этой целью были проведены следующие измерения:

– Зависимость от величины тока септум-магнита ОМ-26. Этот септум-магнит определяет положение первичного пучка в прямолинейном промежутке № 30 У-70, т.е. положение пучка по отношению к кристаллу. Изменение режима этого магнита меняет также и угол падения пучка на кристалл. Изменение тока на 100 А приводит к смещению пучка на кристалле на 2,5 мм и к расстройке угла на 13 мкрад. Как показал эксперимент, достаточно сместить кристалл по координате на такое же расстояние, чтобы восстановить параметры пучка в канале № 22.

– Зависимость интенсивности пучка в канале № 22 от величины тока ОМ30. Эта зависимость без корректировки кристалла представлена на рисунке 3.18.

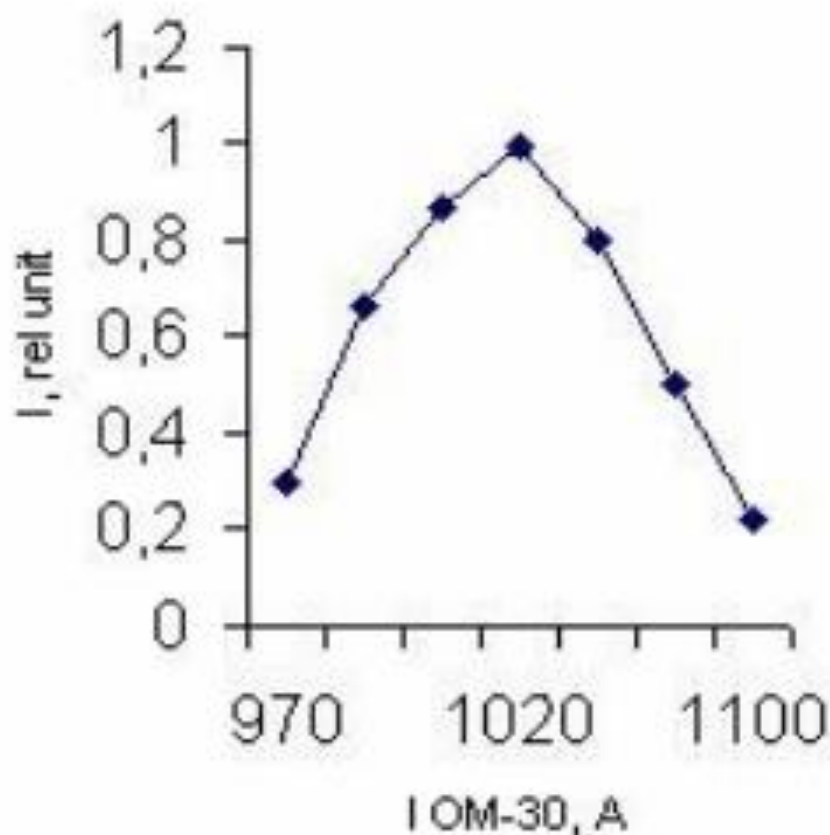


Рисунок 3.18 – Зависимость интенсивности отклоненного пучка от тока магнита ОМ30 [8]

Как показывает практика, в ходе сеанса иногда возникает необходимость корректировки трассы основного пучка (выводимого в каналы 8/21/23). Это обеспечивается изменением режима отклоняющего магнита ОМ30 (см. рисунок 3.15) на ± 50 ампер. Такое изменение приводит к изменению положения первичного пучка (падающего на кристалл) на $\pm 0,2$ мм и угла падения пучка на кристалл на ± 200 мкрад. Как показали наши эксперименты, восстановление режима вторичного пучка (отклоняемого кристаллом) обеспечивается его соответствующей корректировкой по углу без изменения координаты. Профиль пучка на установке СВД-2 [65,66] представлен на рисунке 3.19. Поперечные размеры выводимого пучка, его стабильность, фоновые условия полностью удовлетворяли требованиям экспериментальной установки, средняя интенсивность пучка на мишени установки СВД-2 составляла $\sim 10^6$ частиц.

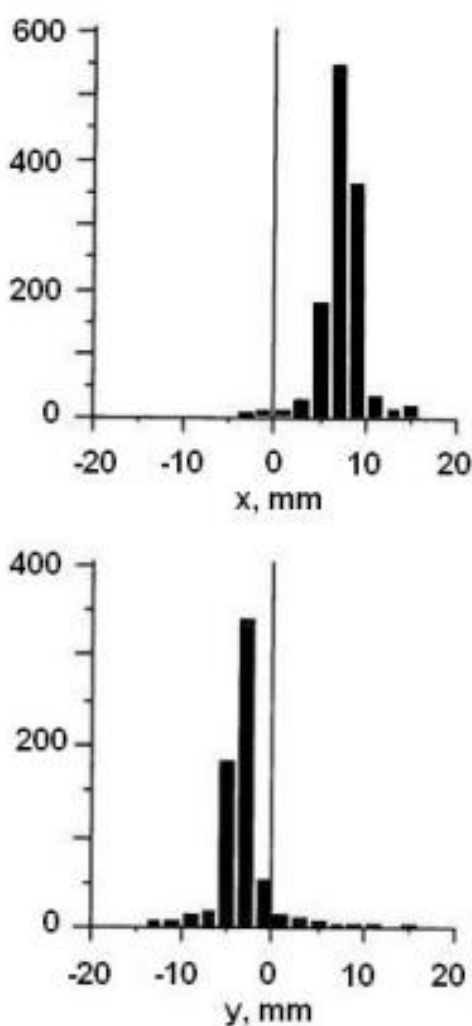


Рисунок 3.19 – Профиль пучка на мишени установки СВД-2 [8]

На рисунке 3.20 представлены профили выведенного пучка в канале № 22 при выводе на установку ФОДС [67,68] в режиме деления пучка с помощью СКД30. В ходе испытаний новой СКД30 были подтверждены положительные особенности метода формирования пучков изогнутыми кристаллами: высокая стабильность параметров выводимого пучка, улучшенные фоновые условия. Интенсивность выведенного пучка варьировалась в диапазоне 10^7 – 10^9 , в зависимости от требований экспериментальной установки. Эксперимент показал также высокую надёжность работы самой станции и системы управления. Новый режим внедрен в практику работы У-70.

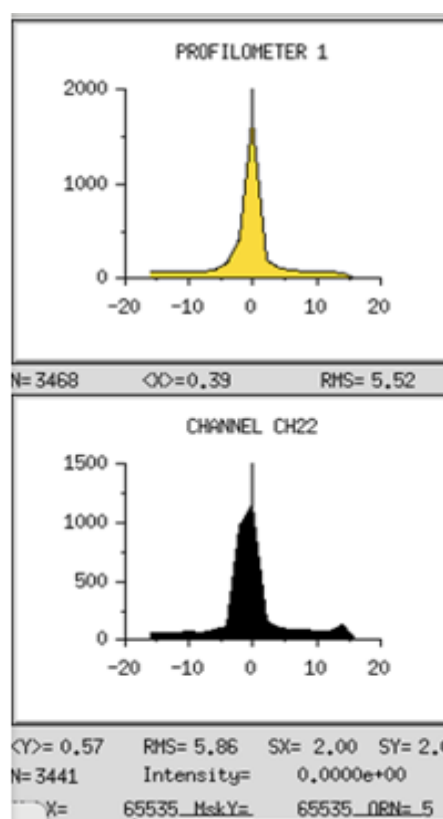


Рисунок 3.20 – Профили пучка в канале №22, при выводе пучка с помощью СКД30 на установку ФОДС

3.3 Вывод пучка протонов варьируемой интенсивности из ускорителя У-70 с помощью изогнутых кристаллов

Для ряда экспериментов является важным получение протонного пучка с варьируемой интенсивностью. В частности, для эксперимента по изучению

характеристик жидкоаргоновых детекторов [69], проводившемся на канале № 8 ускорительного комплекса У-70 было необходимо обеспечить пучок с интенсивностями в диапазоне 10^6 – 10^{11} частиц/цикл. Медленный вывод столь малой интенсивности не может обеспечить хорошую временную структуру в силу особенностей его динамики. Для первой очереди эксперимента СПАСЧАРМ [70] на канале № 14 [71] необходимо обеспечить еще более низкие интенсивности: от 10^4 до 10^7 частиц/цикл.

Применение кристаллических дефлекторов с возможностью плавной регулировки наводимого на кристалл пучка и ориентации кристалла по отношению к пучку позволяет решить эту задачу. На ускорителе У-70 была продемонстрирована работа как длинных, так и коротких кристаллических дефлекторов в режиме быстро варьiruемой интенсивности выводимого пучка в большом динамическом диапазоне.

Вывод пучка в направлении канала № 8 для эксперимента [69] осуществлялся с помощью кристаллического дефлектора, установленного на станции кристаллических дефлекторов, смонтированной в начале 19 блока магнита У-70. На этой станции установлены короткие по пучку кристаллы с малым углом изгиба (см. рисунок 1.5).

Наведение пучка на кристалл обеспечивалось системой локального искажения орбиты У-70, работавшей в режиме обратной связи по пучку, с помощью изменения тока в дополнительных корректирующих обмотках магнитов У-70 (так называемых бампах). Для реализации этого способа наведения пучка на кристалл в элементы магнитной структуры ускорителя, отстоящие друг от друга по азимуту примерно на величину, кратную половине длины волны бетатронных колебаний, вводится возмущение магнитного поля. В результате на данном участке азимута создается локальное искажение орбиты пучка. Изменяя амплитуду возмущения согласно сигналу обратной связи, поступающего с монитора вторичных частиц, можно осуществлять равномерное наведение пучка на кристалл. Сигнал обратной связи с монитора вторичных частиц (сцинтиллятор + ФЭУ), расположенного вблизи кристаллической станции, подается на вход

источника питания бамповых обмоток. Рассмотренный способ наведения протонов на кристалл обеспечивает высокую равномерность выводимой интенсивности в течение всего времени вывода (до 2 секунд).

Рабочее положение кристалла в радиальной плоскости соответствовало координате +65 мм от равновесной орбиты. Кристалл работал в режиме каналирования с эффективностью около 50%. При малом угле отклонения (2 мрад) пучок невозможно вывести из ускорителя, поэтому дополнительно использовались несколько септум-магнитов (специальных магнитов с тонкой токовой перегородкой). Схема вывода с помощью кристалла, установленного в 19 блоке У-70, представлена на рисунке 3.13.

Для вывода пучка в направлении канала № 14, для эксперимента [70] использовалась кристаллическая станция, смонтированная в начале 25 блока У-70. Кристаллический дефлектор имеет размер 70 мм по пучку, угол изгиба 80 мрад (см. рисунок 3.9). По сравнению с предыдущими версиями конструкции (как в [33]) данное кристаллическое устройство обеспечивает пучок малого эмиттанса не только в горизонтальной плоскости (достигаемой за счет малости критического угла каналирования), но и в вертикальной плоскости благодаря малому вертикальному размеру кристаллической пластины. Рабочая координата кристалла составляла 45 мм от равновесной орбиты. Наведение пучка на кристалл обеспечивалось комбинацией двух бампов. Бамп 20/26 работал в режиме обратной связи по пучку, сигнал обратной связи поступал от монитора обратной связи (ФЭУ-93), расположенного вблизи магнитного блока № 25 У-70. Бамп 23/29 работал в режиме «подставки» с фиксированным током. Задачей такого бампа является подведение циркулирующего пучка близко к поверхности кристалла до начала вывода. Такая схема формирования локального искажения орбиты обеспечивает необходимое отклонение пучка в районе блока № 25 и не создает «узких» мест в других точках азимута ускорителя. Кристаллический дефлектор работал в режиме каналирования с эффективностью порядка 10^{-4} . Выведенный пучок забрасывался напрямую в апертуру канала № 14 для эксперимента «СПАСЧАРМ».

3.3.1 Организация вывода пучков варьируемой интенсивности

В эксперименте [69], проводившимся при выводе пучка в направлении канала № 8 было важно добиться не просто большого диапазона по выводимой интенсивности на исследуемый детектор, но и обеспечить быстрое изменение интенсивности пучка. Для быстрого изменения интенсивности выводимого пучка менялось высокое напряжение на мониторе пучка (ФЭУ-93), сигнал с которого заведен в канал обратной связи системы управления бампа 16/22 (цифры в этом обозначении бампа соответствуют номерам магнитных блоков У-70). При этом другие параметры бампа, а именно: ток опоры, максимальный ток бампа и коэффициент обратной связи оставались фиксированными.

На рисунке 3.21 представлена зависимость интенсивности выведенного пучка от высокого напряжения в фотоэлектронном умножителе монитора обратной связи.

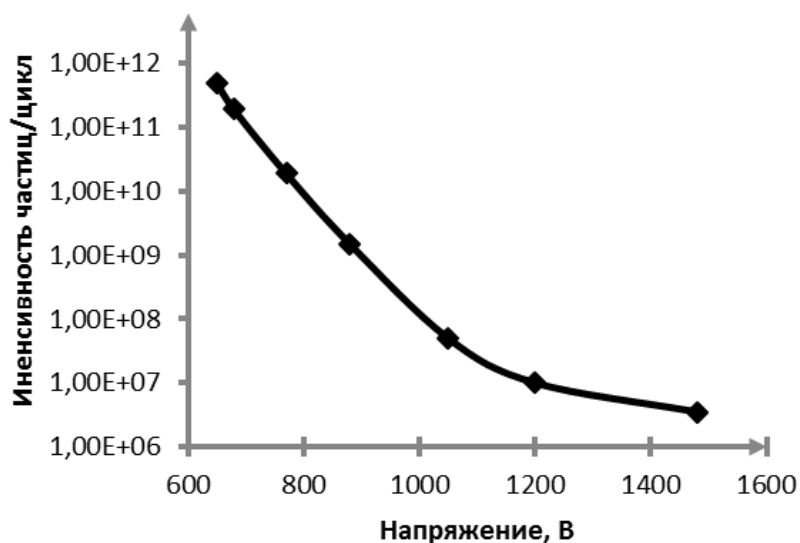


Рисунок 3.21 – Интенсивность выведенного в канал №8 пучка в зависимости от напряжения монитора обратной связи [2]

Для быстрого изменения интенсивности выводимого пучка использовалась также расстройка угла ориентации кристалла (см. рисунок 3.22), которая осуществлялась с помощью гониометрического устройства, работающего в условиях вакуума ускорителя. Интенсивность выведенного кристаллом пучка измерялась аппаратурой экспериментальной установки. Для малых загрузок

использовались сцинтилляционные счетчики в счетном режиме, при высокой интенсивности применялись черенковские счетчики, работающие в аналоговом режиме [69].

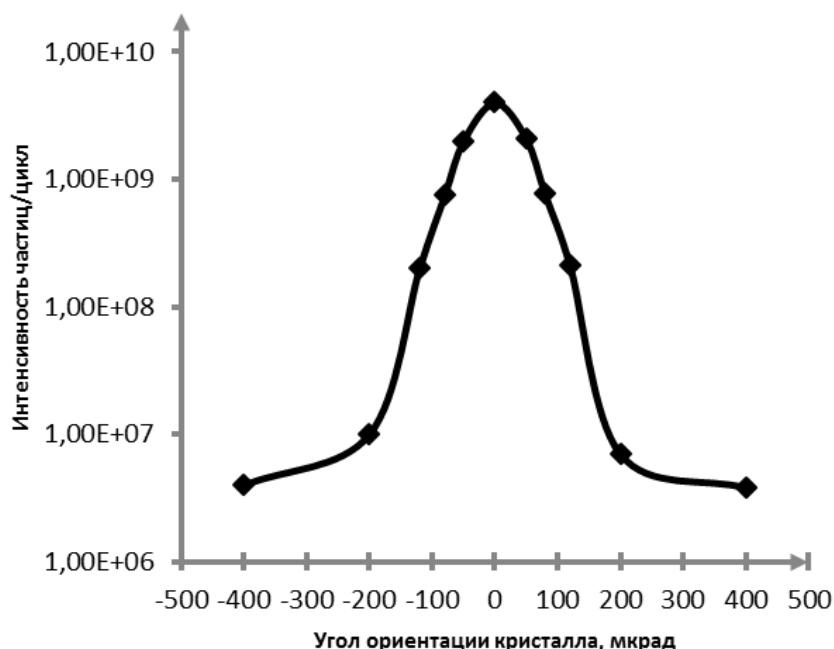


Рисунок 3.22 – Интенсивность выведенного в канал №8 пучка в зависимости от угла ориентации кристалла [2]

Исследование спиновых эффектов [70] на экспериментальной установке СПАСЧАРМ [72] требует возможность варьировать интенсивность пучка на мишени установки в зависимости от условий набора. Для набора физических данных при длительности вывода около 3 сек необходимо обеспечить максимальную (до $5 \cdot 10^6$ прот./цикл), в то время как при короткой длительности вывода (0,2–0,3 сек) и настройке детекторов интенсивность более $5 \cdot 10^4$ прот./цикл может привести к ухудшению характеристик детекторов и наложению событий. Таким образом, требуется обеспечить стабильность и возможность варьировать интенсивность пучка на два порядка. Дополнительной трудностью обеспечить контроль за качеством и положением пучка является его низкая для диагностического оборудования интенсивность.

Для оперативного изменения интенсивности выводимого пучка в заданном диапазоне ($5 \cdot 10^4$ – $5 \cdot 10^6$) частиц/цикл, менялось напряжение на мониторе пучка,

сигнал с которого, заведен в канал обратной связи системы управления бампа 20/26.

На рисунке 3.23 показана зависимость выводимой интенсивности от высокого напряжения на фотоэлектронном умножителе монитора обратной связи.

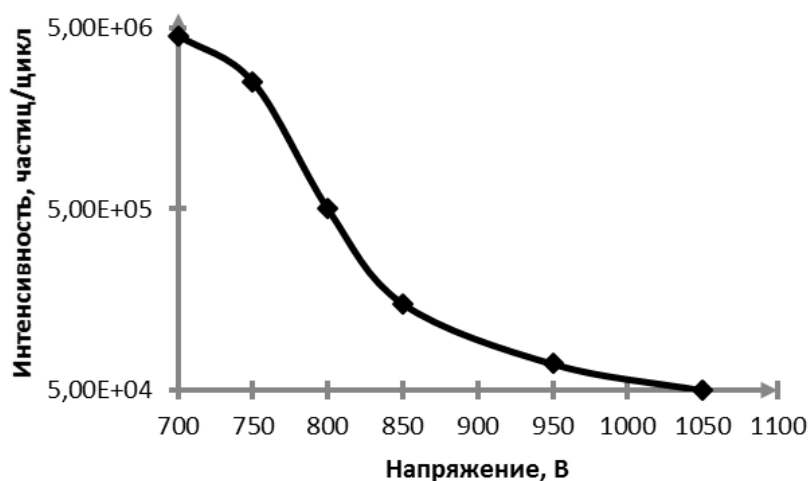


Рисунок 3.23 – Интенсивность выведенного в канал № 14 пучка в зависимости от напряжения монитора обратной связи [2]

Для быстрого изменения интенсивности выводимого пучка использовалась также расстройка угла ориентации кристалла (см. рисунок.3.24).

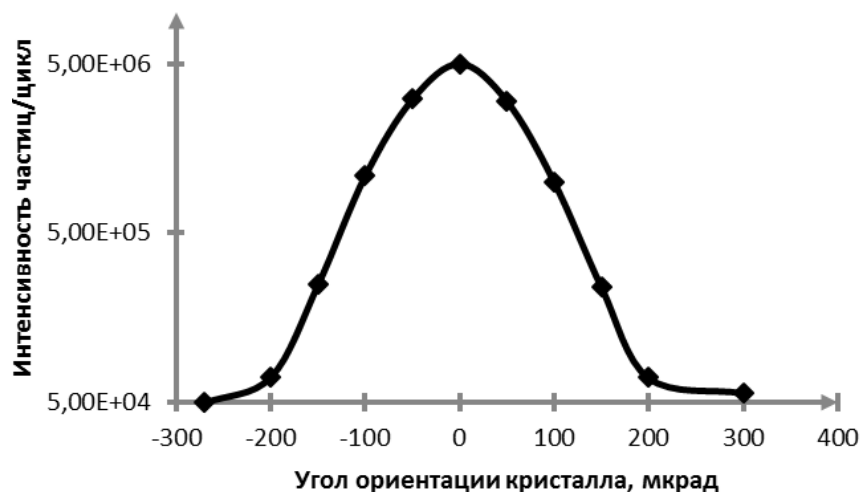


Рисунок 3.24 – Интенсивность выведенного в канал №14 пучка в зависимости от угла ориентации кристалла [2]

Окончательным результатом, позволяющим оценить качество вывода пучка, являются его характеристики на мишени экспериментальной установки. Для определения интенсивности и профиля пучка использовался специально разработанный детектор-профилометр пучка, размещенный на торце мишени

эксперимента и работающий в интегральном режиме. На рисунке 3.25 показан чертеж механической конструкции профилометра.

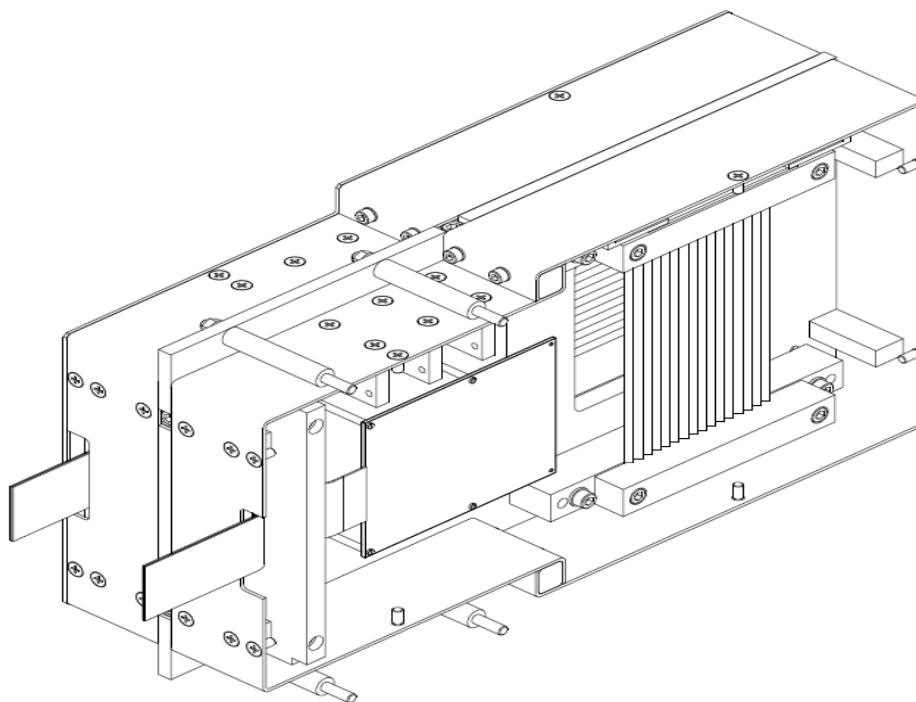


Рисунок 3.25 – Схема механической конструкции профилометра [2]

Размер каждой сцинтилляционной нити был выбран по размеру регистрирующего элемента - кремниевого фотоумножителя (размер фотодетектора $3,4 \times 3,4 \text{ мм}^2$). Два соседних элемента плотно прижаты друг к другу специальными элементами.

К каждой из плат подключены 32 канала, по которым поступают LVDS-сигналы от усилителей дискриминаторов одной из плоскостей профилометра. Для организации интерфейса к фотодетекторам в схеме использован ПЛИС Xilinx серии Spartan6 XC6SLX16. Ресурсы данного ПЛИС позволяют легко организовать 32 счетчика глубиной до 32-х бит для эффективной регистрации сигналов с фотодетектора с интенсивностью пучка до 10^7 частиц за сброс.

На Рис.3.26 показаны профили пучка на мишени экспериментальной установки «СПАСЧАРМ» при разной интенсивности пучка. Видно, что форма профиля и положение пучка слабо меняются во всем динамическом диапазоне.

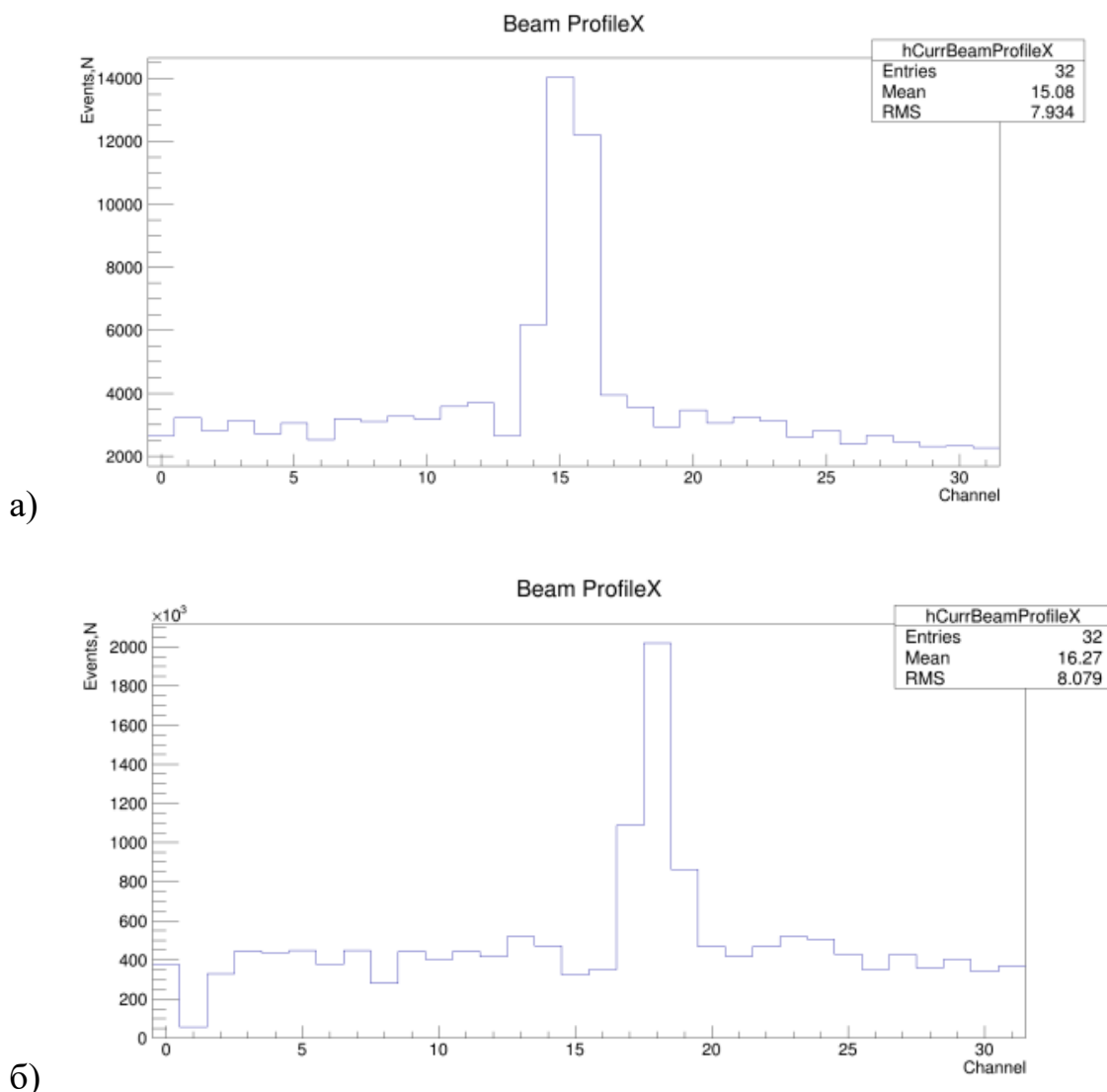


Рисунок 3.26 – Профили пучка в канале №14, при различной интенсивности выведенного пучка. а) $5 \cdot 10^4$ частиц; б) $2 \cdot 10^6$ частиц [2]

Таким образом, была продемонстрирована устойчивая работа вывода пучка для двух экспериментов, где требовалась плавная регулировка интенсивности пучка в широком динамическом диапазоне.

Разработанные методы позволяют варьировать интенсивность пучка в широких пределах без изменения параметров пучка, наводимого на кристалл. Так для кристалла с малым углом изгиба (2 мрад) интенсивность пучка можно варьировать в пределах пяти порядков. Достигнут диапазон интенсивности в интервале от $2 \cdot 10^6$ до $6 \cdot 10^{11}$ частиц/цикл. Это позволило провести исследование характеристик жидкоаргонового детектора. Для кристалла с большим (около 80 мрад) углом изгиба интенсивность пучка можно уменьшить с $4 \cdot 10^6$ до менее $2 \cdot 10^4$

частиц/цикл ускорителя, что позволяет проводить экспериментальные исследования спиновых эффектов на установке «СПАСЧАРМ» при различных условиях набора данных.

3.4 Результаты длительного использования кристаллов для вывода протонов

Во время физических сеансов на ускорительном комплексе У-70, экспериментальные установки с фиксированной мишенью получают пучок при последовательном и параллельном разделении по времени работы (между различными режимами вывода) плоской вершины магнитного поля ускорителя У-70 (около 3,2 секунды при 50 ГэВ). Для обеспечения пучком физических установок используются все доступные режимы вывода пучка из У-70: быстрый однооборотный, медленный резонансный (стохастический и классический), вывод с использованием внутренних мишеней и медленный вывод с помощью изогнутых кристаллов.

Кристаллы на циркулирующем пучке подвергаются сильному радиационному воздействию. Наиболее жесткие условия реализуются для коротких кристаллов. В одном цикле У-70 на них наводится пучок до 10^{12} прот./цикл. Кратность прохождения составляет ≈ 10 (см. [34]), то есть через кристалл проходит $\approx 10^{13}$ прот./цикл. Поперечная площадь используемых кристаллов О-типа составляет 3 мм^2 . С учетом этого поток частиц через кристалл равен $0,3 \cdot 10^{15}$ прот./ $\text{см}^2 \cdot \text{цикл}$. Циклы У-70 следуют через 9,8 сек, за сутки бывает 8640 циклов, а за месяц работы У-70 (средний по продолжительности сеанс) набирается $3 \cdot 10^5$ циклов, и за один сеанс кристалл пропускает поток $\approx 10^{20}$ прот./ см^2 . Практика показывает, только через два сеанса при прохождении $2 \cdot 10^{20}$ прот./ см^2 эффективность короткого кристалла падает примерно в 2 раза, и он подлежит замене. Длинные кристаллы могут работать год непрерывно, и с учетом количества сеансов в году такие кристаллы меняют через пять лет.

Таким образом, в заключение отмечаем: в результате многолетней практики установлено, что кристаллы способны выводить протонные пучки с переменной интенсивностью, в течение тысяч часов без специального охлаждения и без видимой деградации эффективности, работать в параллельном режиме (на плато У-70) с внутренними мишенями, делить выведенный пучок, увеличивая количество потребителей пучка в цикле. Этот метод вывода пучка является хорошим дополнением к резонансному медленному выводу пучка с интенсивностью до 10^{13} частиц за импульс. Вывод с помощью изогнутых кристаллов демонстрирует надежную, воспроизводимую и предсказуемую работу. Пучки, полученные с помощью кристаллов, обладают низким эмиттансом, высокой пространственной стабильностью по сравнению с обычными пучками и легко перестраиваются в широком диапазоне интенсивностей. Следует отметить, что установленный радиационный предел для кристаллов на циркулирующем пучке составляет около $2 \cdot 10^{20}$ прот./см² [6].

Глава 4. Вывод ионов углерода из У-70 кристаллическими дефлекторами

4.1 Вывод ионного пучка в каналы № 4А, № 22 и № 8

На ускорительном комплексе У-70 реализуется программа ускорения легких ионов [73]. Режим вывода шестизарядного ионного пучка углерода с помощью кристаллических дефлекторов изучался в период с 2012 по 2016 год. За это время комплекс У-70 работал с ионами в общей сложности 4 сеанса. В течение этого периода были исследованы различные схемы вывода и типы кристаллических дефлекторов. В таблице 4.1 приведены их общие параметры.

Таблица 4.1 Параметры пучков ионов углерода и кристаллических дефлекторов

Сеанс	2012-1	2013-1	2015-1	2016-1
Энергия, ГэВ/нуклон	25	25	25	20
Номер СКД	22	22	27; 30	19; 27; 30
Длина кристалла, мм	1,9	1,9	60; 16	22; 60; 16
Угол изгиба кристалла, мрад	0,8	0,8	85; 9,5	0,5; 85; 9,5
Канал транспортировки пучка	№ 22	№ 22	№ 4А; № 22	№ 22; № 4А; № 8
Экспериментальная установка	ФОДС	ФОДС	ИСТРА- КРИСТАЛЛ; ФОДС	ФОДС; ВЕС; ИСТРА- КРИСТАЛЛ; СПИН

Весной 2012 года пучок ионов углерода был ускорен до 25 ГэВ на нуклон, интенсивность составляла до $5 \cdot 10^9$ за цикл. В ходе этого сеанса пучок ионов был выведен с помощью кристаллического дефлектора, установленного на СКД22, выведенный пучок был направлен на экспериментальную установку ФОДС (двухплечевой спектрометр с фокусировкой) [67,68]. Этот пучок стал первым

пучком ионов углерода, полученным экспериментальной установкой на ускорительном комплексе У-70. Эффективность вывода составила около 60%. Для диагностики пучка и определения эффективности вывода использовалось стандартное оборудование У-70 [26] и метод активации [4]. В первом сеансе 2013 года с помощью СКД22 был выведен пучок интенсивностью порядка $1,5 \cdot 10^7$ ионов за цикл с длительностью вывода около 700 мс.

Весной 2015 года был исследован вывод ионного пучка в канал транспортировки № 4А. Целью данной работы было получение и изучение стабильного ионного пучка с помощью кристалла для его использования в регулярных сеансах У-70. Схема вывода пучка ионов углерода с помощью кристаллического дефлектора и его транспортировка в канале № 4А показана на рисунке. 4.1.

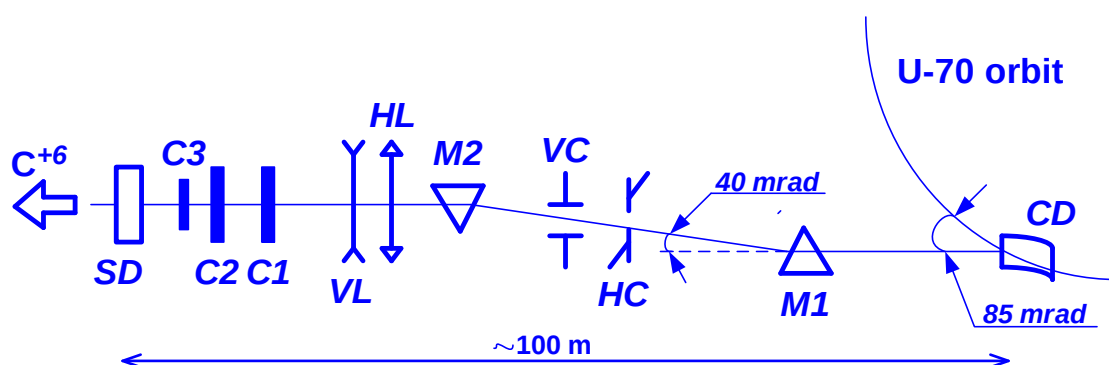


Рисунок 4.1 – Схема вывода пучка ионов углерода в канал № 4А: кристаллический дефлектор (CD), отклоняющие магниты (M1, M2), горизонтальные и вертикальные коллиматоры (HC, VC), горизонтальные и вертикальные квадрупольные линзы (HL, VL), сцинтилляционные счетчики (C1, C2, C3) и полупроводниковый детектор (SD) [7]

Кремниевый кристаллический дефлектор с ориентацией (111) и размерами $0,3 \times 3 \times 60$ мм (толщина, высота и длина по направлению пучка) был установлен внутри 27-го магнитного блока ускорителя У-70 (СКД27). Угол изгиба кристалла составлял 85 мрад. Такое значение угла отклонения объясняется особенностью канала № 4А, который номинально используется для транспортировки отрицательных частиц, полученных на внутренней аморфной мишени. Отрицательные частицы выбрасываются магнитным полем ускорителя на внешнюю сторону кольца, в то время как протоны или ионы, отклоненные

кристаллом, направляются внутрь. Для наведения циркулирующего пучка на кристалл использовались бампы. Два отклоняющих магнита М1 и М2 направляли пучок, который был отклонен кристаллом, в канал транспортировки № 4А, где он затем фокусировался двумя квадрупольными линзами HL и VL. Коллиматоры пучка HC и VC были полностью открыты. Интенсивность пучка измерялась большими сцинтилляционными счетчиками C1 и C2. При наведении на кристалл примерно 10^9 ионов в цикл, в канале № 4А наблюдалось около $2,2 \cdot 10^5$ ионов.

На рисунке 4.2 представлены сигналы сцинтилляционных мониторов, отслеживающих наведение пучка на кристалл в ускорителе. Анализ этих сигналов показывает, что однородность наведения и временная структура пучка хорошие, несмотря на низкую интенсивность циркулирующих частиц.

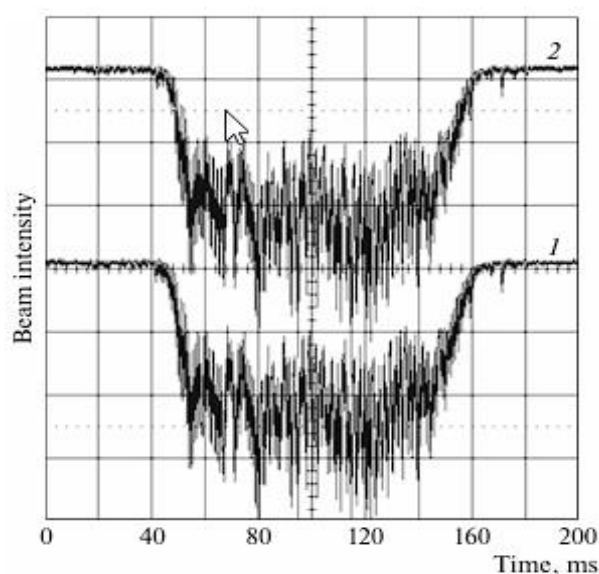


Рисунок 4.2 – Временная структура наводимого на кристалл пучка ионов углерода на сцинтилляционных мониторах [7]

На рисунке 4.3 показано изображение выведенного пучка в месте расположения детекторов, полученное с помощью пленки радиационного мониторинга ЕВТЗ. Полная ширина пучка ионов углерода на полувысоте составляет около 10 мм в обеих плоскостях. Это соответствует размеру ранее выведенного протонного пучка.

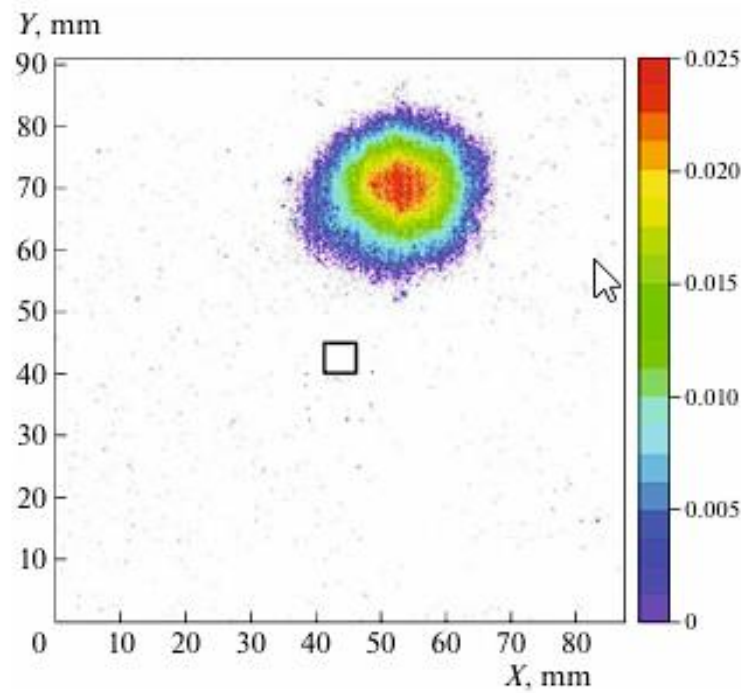


Рисунок 4.3 – Изображение распределения частиц в выведенном пучке [7]

Состав пучка измерялся в его центре по ионизационным потерям в тонком сцинтилляторе СЗ. Результаты представлены на рисунке 4.4. Ионы с различными зарядами идентифицировались по квадратичной зависимости ионизационных потерь.

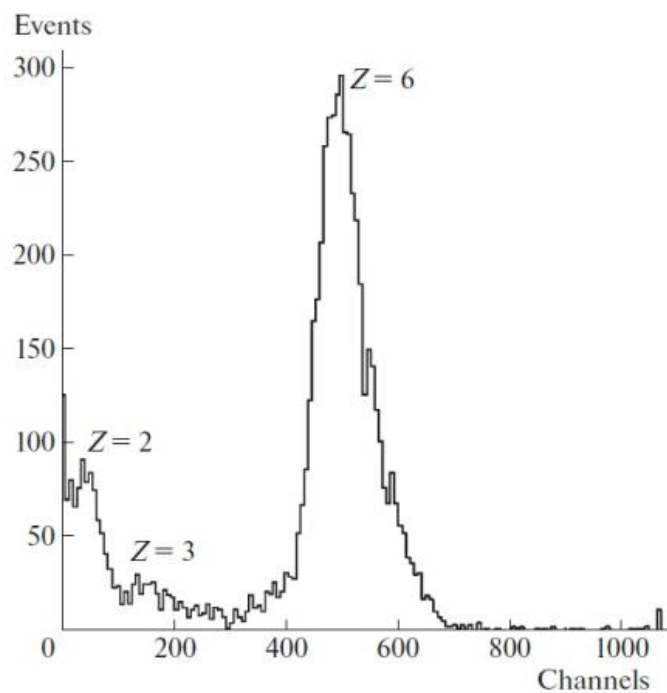


Рисунок 4.4 – Состав выведенного ионного пучка [6]

Очевидно, что пик углерода с зарядом 6 доминирует (около 80%). На периферии пучка, то есть на уровне 1% от основной интенсивности, состав пучка измерялся полупроводниковым поверхностно-барьерным детектором SD (положение детектора относительно центра пучка показано квадратом на рисунке 4.3). На рисунке 4.5 представлены спектры потерь на ионизацию на детекторе. Видно, что присутствует 30% углерода и многочисленные фрагменты. Наличие этих фрагментов в основном обусловлено взаимодействием выведенного пучка углерода с герметичными перегородками и другими материалами в канале транспортировки пучка 4А (~ 5 г/см²).

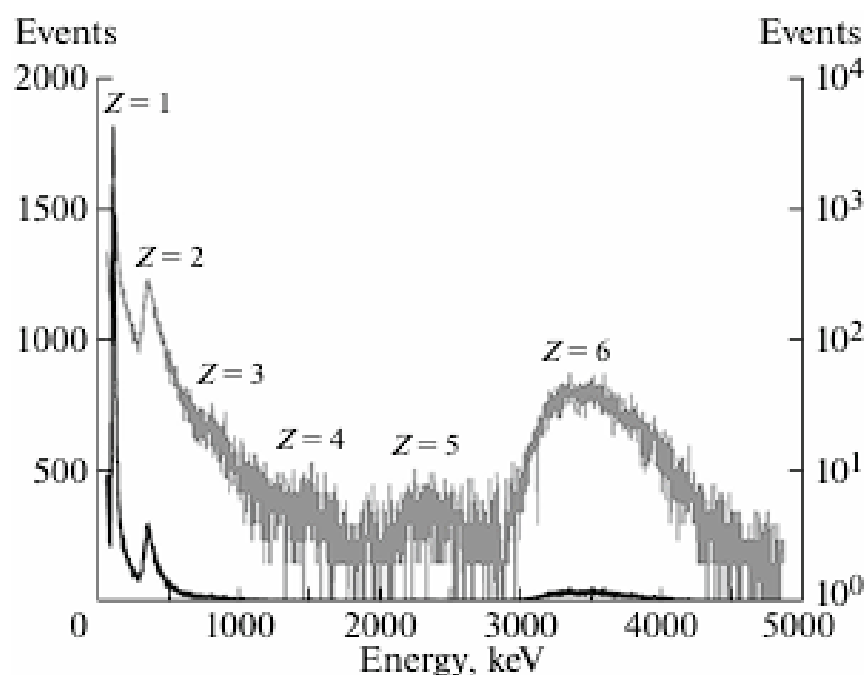


Рисунок 4.5 – Спектры потерь энергии на ионизацию частиц пучка в полупроводнике (черная линия представлена в линейном масштабе, а серая - в логарифмическом) [7]

В первом сеансе 2016 на У-70 был получен пучок ядер углерода с энергией 20 ГэВ/нуклон. Пиковая интенсивность достигала $7 \cdot 10^9$ ионов за цикл. В ходе этого сеанса продолжились исследования различных режимов вывода ионного пучка с помощью кристаллических дефлекторов, включая дефлекторы, установленные на СКД27 и СКД30. Также был протестирован вывод с помощью СКД19 в канал №22.

Ионный пучок был выведен в канал № 22 для установки ФОДС [67,68], в канал № 4 для установок ИСТРА-КРИСТАЛЛ и ВЕС [74], а также в канал № 8 для установки СПИН [75]. В ходе экспериментов, с целью увеличения числа одновременно действующих физических установок, были реализованы различные комбинации режимов вывода (см. рисунок 4.6) на плато магнитного цикла.

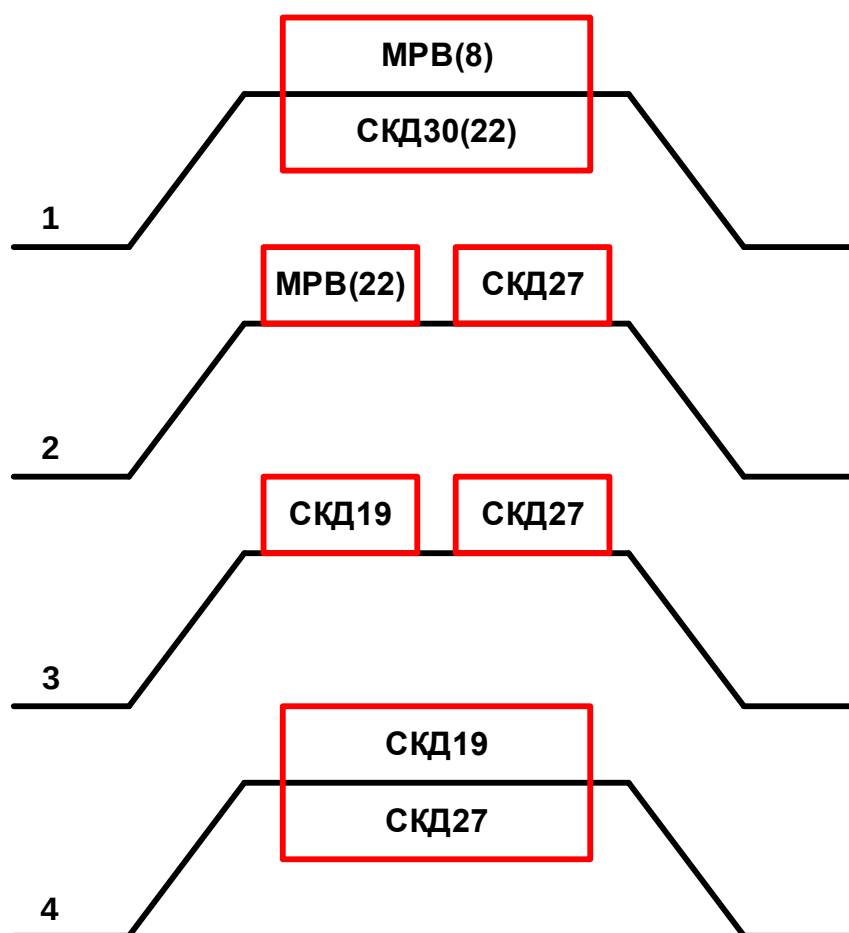


Рисунок 4.6 – Использование плоской вершины магнитного цикла ускорителя У-70. Показаны различные комбинации медленного резонансного вывода (МРВ) и медленного вывода с помощью кристаллов (СКД) (модифицировано по [6])

Установки ФОДС, СПИН, ВЕС провели первое исследование в области релятивистской ядерной физики – новую страницу в программе исследований на ускорительном комплексе У-70 в ИФВЭ. Кроме того, были проведены дополнительные эксперименты с различными СКД: 19,27,30.

Одним из важных параметров выведенного пучка является низкопульсационная структура. Были проведены специальные эксперименты с комбинированным методом наведения циркулирующего пучка на кристалл с

помощью бампов и шумового воздействия [76] на циркулирующий пучок (см. рисунок 4.7).

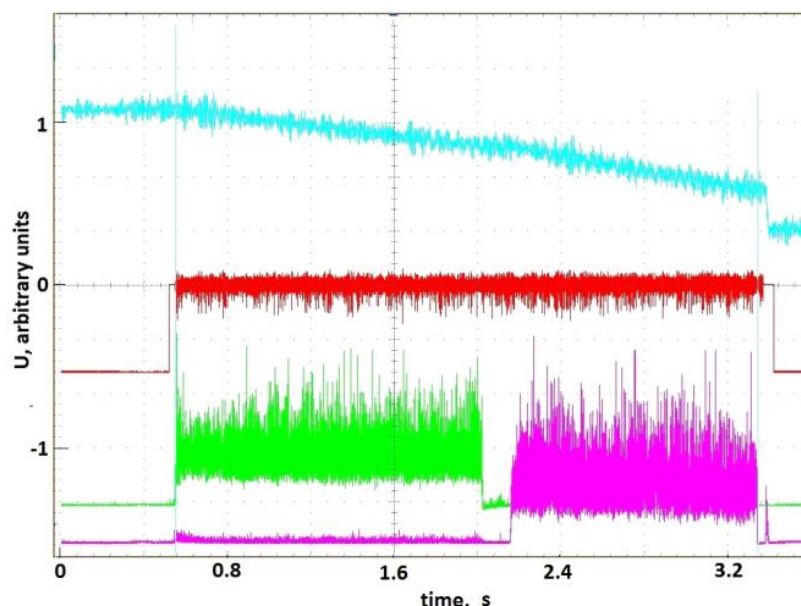


Рисунок 4.7. – Разделение пучка между СКД19 (фиолетовый луч) и СКД27 (зеленый луч). синий луч – интенсивность в У-70, красный луч – ВЧ-шум [6]

Эксперимент по разделению пучка ионов углерода с помощью кристалла (СКД30) также был успешно проведен. На рисунке 4.8 представлен портрет пучка на установке ФОДС.

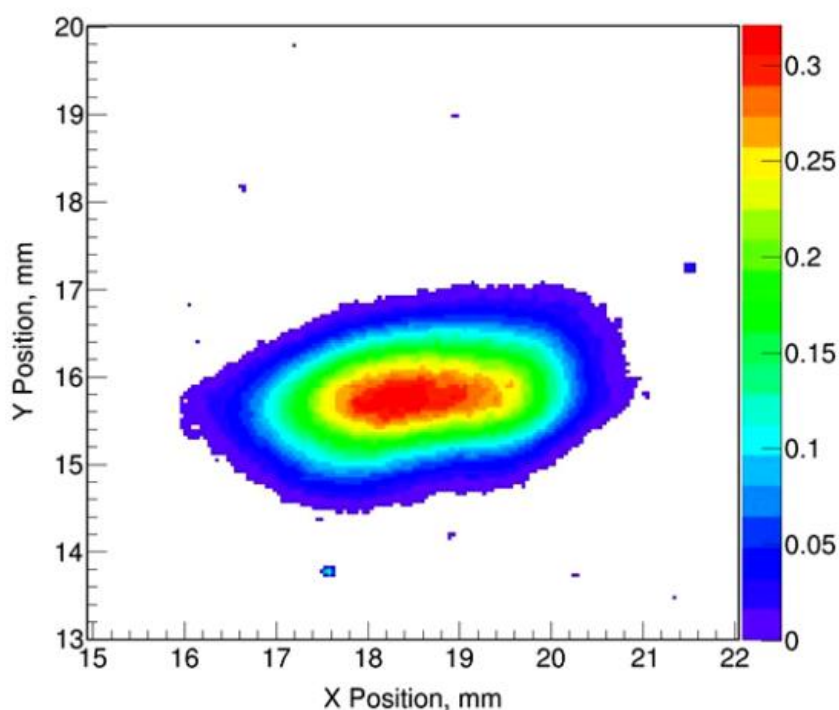


Рисунок 4.8 – Портрет ионных пучков, отклоненных СКД30 [6]

Еще одной целью экспериментов являлось исследование одновременной работы различных кристаллов на ускорителе У-70. Результат этих исследований представлен на рисунке 4.9.

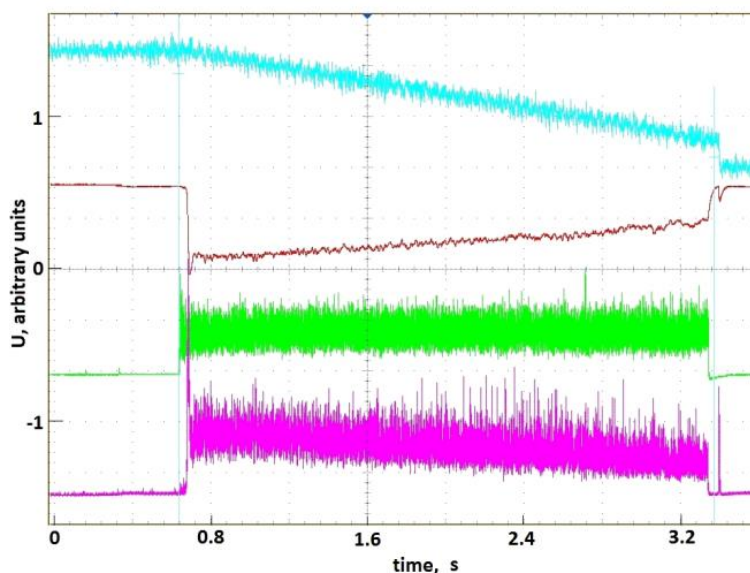


Рисунок 4.9 – Одновременная работа СКД19(фиолетовый луч) и СКД27 (зеленый луч), синий луч – интенсивность У-70 [6]

В результате этих экспериментов было показано, что при использовании изогнутых кристаллов возможно выводить ионные пучки в различные каналы транспортировки заряженных частиц, для обеспечения ионными пучками различных физических установок комплекса У-70, с требуемыми параметрами — интенсивностью, размерами, временной структурой и составом пучка. Нежелательная фрагментация оказалась достаточно низкой. Следует отметить, что повреждение кристалла из-за облучения высокоэнергетическими ионами существенно больше, чем протонами. Эта проблема требует дальнейшего изучения.

4.2 Сравнительные характеристики вывода протонов и ядер

Прямым доказательством того, что выведенный пучок каналирован, является измерение так называемой ориентационной кривой — зависимости интенсивности

выведенного пучка от направления падающего пучка. Такое угловое сканирование для углеродного пучка показано на рисунке 4.10.

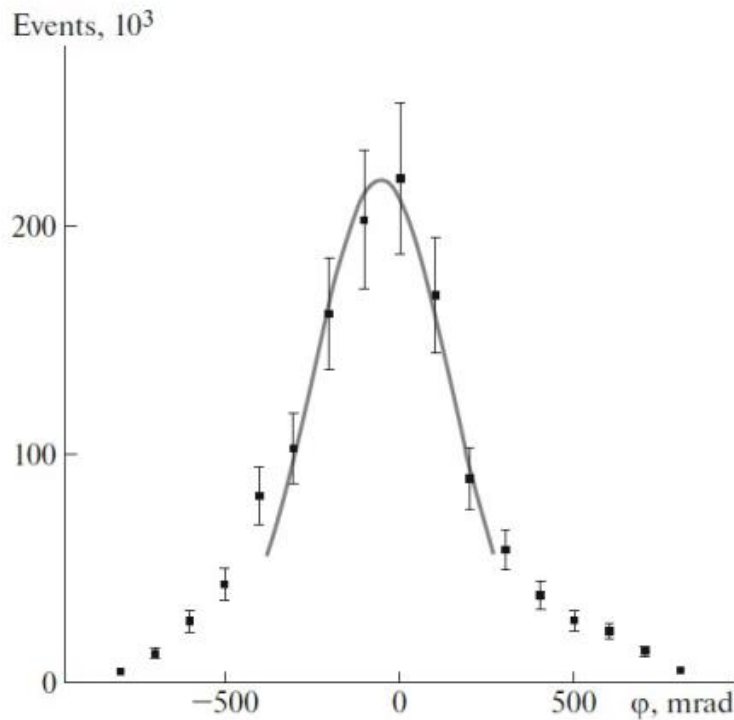


Рисунок 4.10 – Количество извлеченных частиц в зависимости от ориентации кристалла относительно направления пучка [6]

Ширина кривой $\sigma = 0,2$ мрад соответствует угловой расходимости пучка в ускорителе. Полученная эффективность вывода пучка соответствует теоретическим ожиданиям.

На рисунке 4.11 экспериментальные точки (звездочка) для углерода хорошо согласуется с теоретической кривой (пунктирная линия). На рисунке 4.11 также представлены теоретическая кривая и экспериментальные точки для протонного пучка. Эффективность вывода пучка кристаллом рассчитывалась с помощью программы SCRAPER [55]. При расчете учитывались как прохождение частиц через кристалл с учетом ядерных взаимодействий, так и многооборотное движение в ускорителе У-70. Следует отметить, что эффективность вывода ионов углерода ниже соответствующего значения для протонного пучка, хотя свойства каналирования кристаллов идентичны для ионов с равными значениями магнитной

жесткости (отношение импульса частицы к ее заряду p/z), что было установлено в работах [77] и [78].

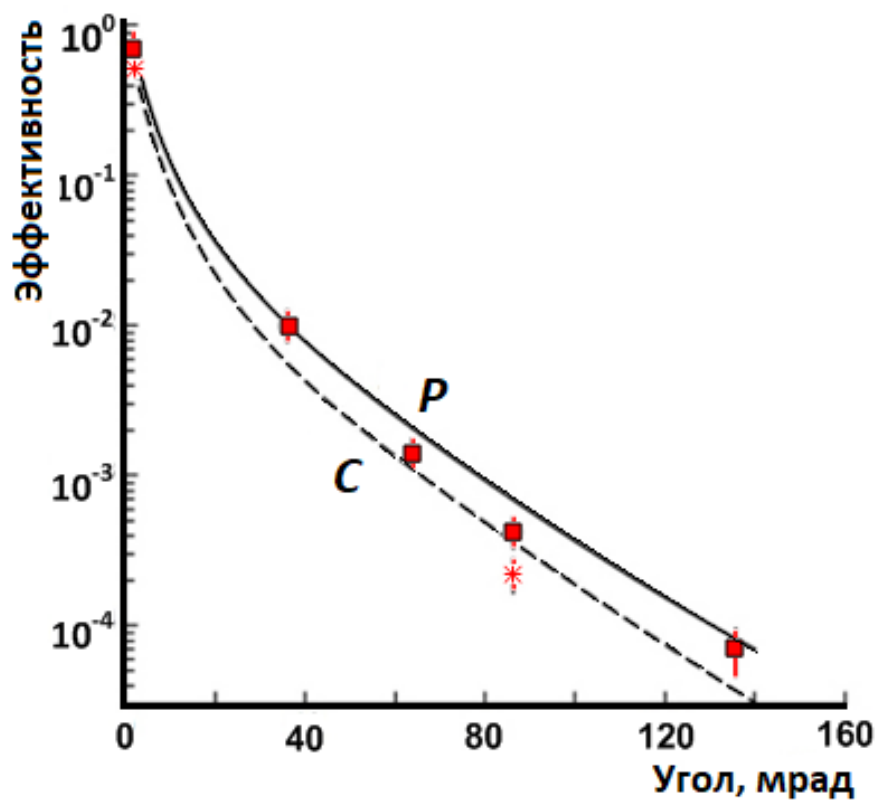


Рисунок 4.11 – Эффективность вывода циркулирующих пучков протонов (p) и углерода (C) с помощью кристаллов в зависимости от угла отклонения. Результаты расчетов представлены кривыми, сплошные точки обозначают экспериментальные значения для протонов, а звездочки—экспериментальные значения для углерода (модифицировано по [6])

Более низкая (по сравнению с протонами) эффективность вывода и коллимации циркулирующего ионного пучка также наблюдалась в работах [27,78,79]. Это объясняется более интенсивным ядерным взаимодействием ионов с кристаллической мишенью по сравнению с протонами при многооборотном движении частиц в ускорителе.

Глава 5. Применение кристаллических дефлекторов на ускорительном комплексе У-70 для решения нестандартных задач

5.1 Получение пучка заряженных адронов низких импульсов на ускорительном комплексе У-70

На синхротроне У-70 в ИФВЭ создан целый комплекс каналов вторичных частиц [80], которые обеспечивают проведение широкой программы физических исследований. Часть экспериментальных установок работают с использованием медленного вывода первичного протонного пучка, несколько установок с использованием внутренних мишеней, либо кристаллических дефлекторов, в частности, установка «СПАСЧАРМ» (Спиновые АСимметрии в образовании ЧАРМония) [72,81] использует внутренние мишени и кристаллические дефлекторы в 24 и 25 магнитных блоках У-70.

Экспериментальная установка «СПАСЧАРМ» была создана для изучения спиновых явлений в инклюзивном рождении большого числа элементарных частиц и резонансов в адрон-адронных столкновениях на ускорительном комплексе У-70 в Протвино. Основной целью эксперимента является систематическое изучение спиновых эффектов во взаимодействиях адронов. В настоящее время установка «СПАСЧАРМ» расположена на канале 14 ускорительного комплекса У-70. В зону установки можно вывести несколько типов пучков для экспериментальной установки. Основным из них является пучок адронов с отрицательным электрическим зарядом, включающего более 98% π^- мезонов, $\sim 1,5\%$ K^- мезонов, и $\sim 0,2\%$ антипротонов. Этот пучок генерируется на внутренней мишени ускорителя, установленной в 24 промежутке вакуумной камеры ускорителя вблизи равновесной орбиты циркулирующего протонного пучка. Поскольку трасса частиц, выходящих из внутренней мишени ускорителя, определяется локальными магнитными полями ускорителя, то в существующей геометрии расположения элементов канала можно инжектировать в магнитооптический канал только пучки

отрицательно заряженных вторичных частиц с импульсами большими 25 ГэВ/с (при энергии ускоренного протонного пучка 50 ГэВ)¹.

Кроме того, используя специальную мишень в блоке 24 ускорителя, установленную на расстоянии 40 мм (в «+» от центра ускорителя) от равновесной орбиты, можно получать пучки электронов с импульсами 18–32 ГэВ/с. При наведении на указанную мишень протонного пучка образуется достаточно интенсивный поток гамма-квантов (от распадов π^0 мезонов), который попадает на свинцовый конвертер, установленный на расстоянии 6,5 метра от мишени на координате 120 мм наружу от орбиты. Рожденные в конвертере электроны направляются магнитным полем ускорителя в направлении 14 канала.

С конца 80-х годов прошлого века появилась возможность работы на первичном протонном пучке интенсивностью 10^6 – 10^7 в цикле, выводимого в канал изогнутым на угол 80 мрад монокристаллом кремния, который был установлен в вакуумную камеру в 25-ом блоке ускорителя с жесткой фокусировкой У-70 [2,21].

Указанные режимы работы обеспечивают необходимый пучок для набора физических данных. Однако для развития экспериментальной установки и, соответственно, для методических измерений важно иметь пучки частиц с относительно низкими (2–13 ГэВ/с) импульсами, в том числе и положительно заряженные. Такие пучки нужны, прежде всего, для исследования детекторов идентификации частиц. В рамках развития экспериментальной установки СПАСЧАРМ [70] и проведения в будущем исследований на пучке поляризованных протонов и антипротонов [82] необходимо разработать и создать детектор колец черенковского излучения. Наиболее подходящим является детектор типа FARICH (Focusing Aerogel Rich Imaging CHerenkov) [83], который, как планируется, позволит проводить разделение заряженных π и К-мезонов, как минимум до импульса 10 ГэВ/с, а в перспективе и до 20 ГэВ/с. Для работы с этим детектором необходимо иметь пучок частиц с импульсами от 5 до 10 ГэВ/с, а при возможности и ниже. Расположенные на канале № 14 пороговые черенковские счетчики

¹ Данное ограничение линейно зависит от энергии протонов, ускоренных в кольце У-70.

позволяют проводить «мечение» π -мезонов и служат дополнительным критерием отбора для проведения исследований по идентификации частиц.

Ниже представлены механизм получения такого пучка на канале № 14 для вывода на установку «СПАСЧАРМ», а также результаты двух сеансов, полученные сначала в тестовом режиме в первом сеансе 2025 г., а затем и в рабочем режиме в 2026 г. при проведении методических работ с исследуемым детектором.

5.1.1 Методика получения низкоэнергетичных пучков адронов для эксперимента «СПАСЧАРМ»

Как было отмечено выше, в существующей геометрии расположения оси канала частиц № 14 относительно внутренних мишеней ускорителя получить адронные пучки низкой энергии с их помощью невозможно. Одним из способов вывода пучков большой интенсивности является медленный вывод, который на ускорительном комплексе У-70 используется для вывода на несколько экспериментальных установок. Однако, в случае 14 канала такой вывод невозможен, так как при использовании медленного вывода угол отклонения частиц в септум-магните значительно меньше требуемого, практически по касательной к орбите пучка. Реализация же новой схемы медленного вывода, специально для канала № 14, предполагает помимо прочего оборудования (секступоли, станция перегруппировки пучка либо квадруполь, “бамп-магниты”, электростатический дефлектор) изготовление и использование трех новых септум магнитов и квадруполя предварительной фокусировки, которые необходимо разместить в прямолинейных промежутках. В текущей конфигурации расположения оборудования на ускорительном комплексе У-70 свободных прямолинейных промежутков нет. В этих условиях с учетом уже реализованного вывода в канал № 14 интенсивного протонного пучка с помощью кристаллических дефлекторов, был предложен метод получения вторичных пучков, генерируемых на дополнительной мишени, установленной в головной части канала с

использованием этого режима вывода. При наведении до $\sim 7 \cdot 10^{11}$ протонов на кристаллический дефлектор, установленный в блоке 25 ускорителя, можно получить на мишени на входе в канал № 14 выведенный пучок протонов с интенсивностью до $\sim 10^8$ протонов в цикле. На рисунке 5.1 показана принципиальная схема получения “низкоэнергетичного” адронного пучка для эксперимента “СПАСЧАРМ”. Отметим, что при этом можно получить пучок как отрицательно, ток и положительно заряженных адронов, что ранее было невозможно на канале № 14.

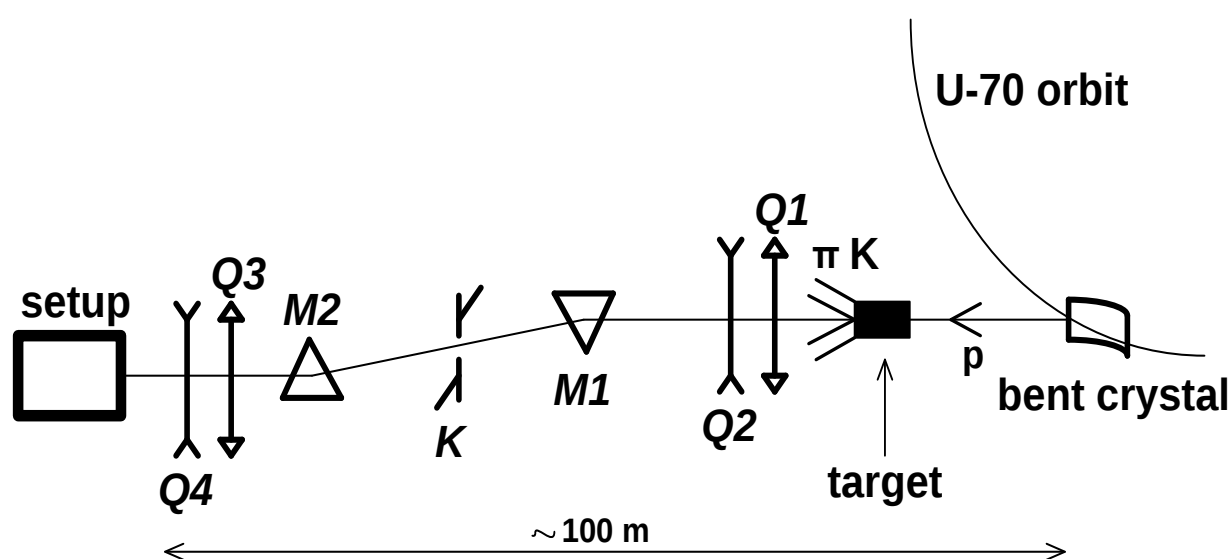


Рисунок 5.1 – Принципиальная схема получения вторичного пучка отрицательных частиц. Q1- Q4 квадрупольные линзы, M1 и M2 поворотные магниты, K – коллиматор [3]

Выведенный изогнутым кристаллом (bent crystal) из ускорителя 50 ГэВ/с протонный пучок попадает на алюминиевую мишень (target), установленную перед первым объективом квадрупольных линз (Q1, Q2). Далее сгенерированный в мишени вторичный адронный пучок захватывается в канал и транспортируется на мишень экспериментальной установки. Транспортировка этого пучка производится существующими квадрупольными линзами и двумя поворотными магнитами и не требует дополнительного оборудования.

Перед проведением эксперимента были выполнены расчеты режимов и сделаны оценки ожидаемых интенсивностей пучка «низкоэнергетичных» адронов (см. рисунок 5.2).

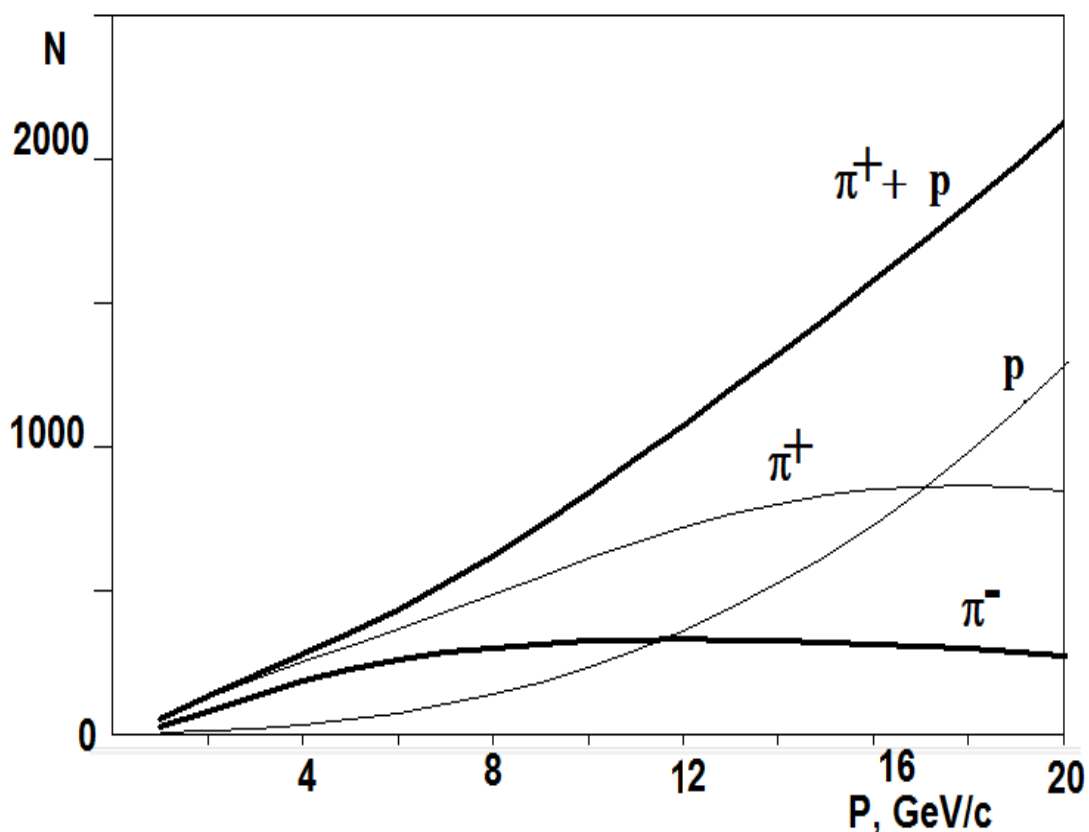


Рисунок 5.2 – Рассчитанные интенсивности адронов генерируемых в алюминиевой мишени при наведении на нее 10^7 протонов. Сорт частиц указан на рисунке. [3]

Расчеты были выполнены на основе полуэмпирической формулы из статьи [84] и в предположении взаимодействия пучка протонов с импульсом 50 ГэВ/с и интенсивностью 10^7 за цикл с алюминиевой мишенью длиной 30 см. Угловой аксептанс канала в расчетах предполагался равным 30 микростер, а импульсный разброс получаемого пучка $\pm 5\%$. Видно, что при сбросе на мишень 10^6 – 10^8 протонов можно ожидать интенсивность вторичного пучка от нескольких сотен частиц, до нескольких десятков тысяч частиц.

Для транспортировки вторичного адронного пучка была разработана на основе существующего оборудования канала № 14 оптическая схема, представленная на рисунке 5.3. Пучок адронов низкой энергии из мишени с помощью магнитов M1 и M2 транспортируется к мишени эксперимента «СПАСЧАРМ», а с помощью квадрупольных линз Q1 – Q8 производится фокусировка пучка.

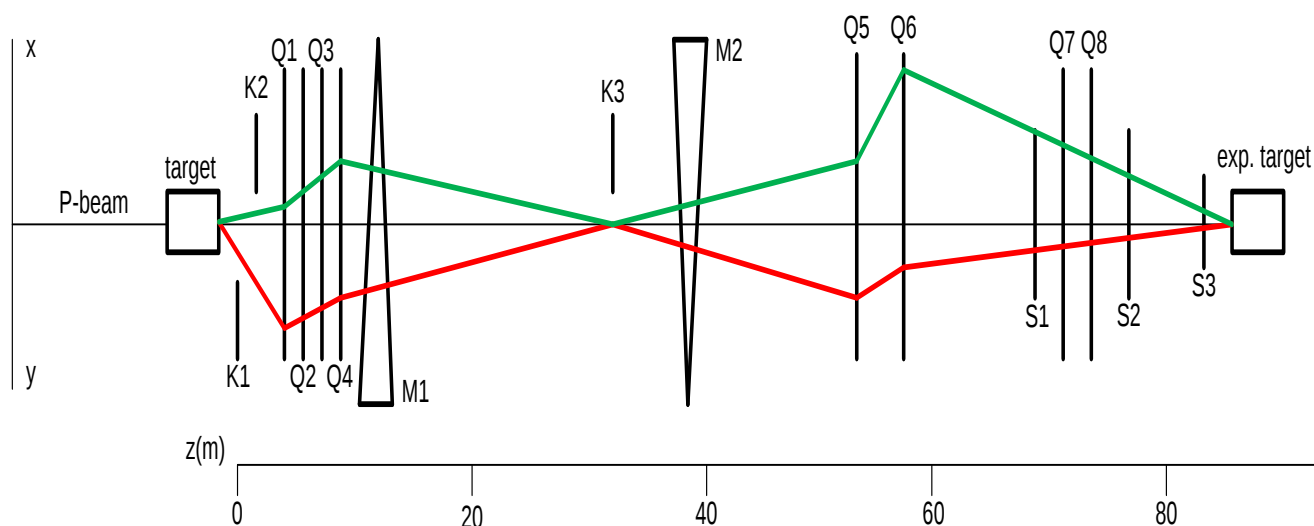


Рисунок 5.3 – Оптическая схема пучка адронов низкой энергии. Q1 – Q8 квадрупольные линзы, M1 и M2 магниты, K1 – K3 коллиматоры, S1 – S3 сцинтилляционные счетчики, X и Y горизонтальная и вертикальная координаты. На схеме зеленым и красным цветом показаны синусные траектории для двух плоскостей (горизонтальной и вертикальной) – траектории частиц, имеющих нулевую координату и угол наклона к оси, соответствующий аксептансу канала [3]

Головной объектив состоит из 4-х линз. Двух длинных (2 м) линз (Q2, Q4) и двух коротких (1 м) линз (Q1, Q3). Для получения пучков с импульсами менее 11 ГэВ/с, согласно расчетам, достаточно использовать две линзы Q3, Q4. Для импульсов больше 11 ГэВ/с необходимо дополнительно использовать линзу Q2. Это объясняется небольшим расстоянием от центра мишени до центра линзы Q3 равному 3,9 м, что требует больших полей и ограничивает импульс пучка. Увеличить указанное расстояние практически невозможно, так как мишень при увеличении расстояния попадает в область больших рассеянных полей ускорителя. Получить импульс более 13 ГэВ/с в нашем случае оказалось невозможно из-за технических ограничений используемого оборудования. Головной объектив фокусирует пучок в коллиматор K3 по обеим плоскостям. В целом система головных линз, магнит M1 и коллиматор K3 задают импульсный разброс пучка. Затем элементы канала магнит M2 и линзы Q5, Q6 направляют и фокусируют пучок на мишень эксперимента. Квадрупольные линзы Q7, Q8 не предполагается использовать в данном случае.

5.1.2 Проведение эксперимента по выводу пучка

Схема получения пучка «мягких» заряженных адронов, показанная на рисунке 5.1, предполагает вывод в направлении канала транспортировки № 14 первичного протонного пучка с импульсом 50 ГэВ/с изогнутым кристаллом на установленную внешнюю мишень.

Таким образом, важная роль отводится наведению протонного пучка с импульсом 50 ГэВ/с повышенной интенсивности до 10^7 – 10^8 частиц в цикле на внешнюю алюминиевую мишень (длина мишени 30 см), установленную на входе в канал транспортировки № 14. Вывод циркулирующего в У-70 пучка был осуществлен новым кристаллическим дефлектором, установленным на унифицированной станции кристаллических дефлекторов СКД25 [1] (см рисунок 3.9), угол отклонения этого дефлектора 80 мрад.

Положительный результат предполагалось достичь за счет оптимизации размеров кристалла. Эффективность поворота пучка в кристалле определяется как $Eff \sim (\theta_c/\varphi) \times \exp(-L/L_d)$ (см. [34]), где характерный параметр L_d , называемый длиной деканализирования, составляет ~ 20 мм для энергии 50 ГэВ, что на 40% меньше, чем использовалось для вывода протонов с энергией 70 ГэВ. В соответствии с этим фактором новый кристалл был укорочен, по сравнению со старыми дефлекторами, применявшимися ранее для 70 ГэВ [21]. Другим важным фактором для успешного проведения эксперимента стало создание новой унифицированной станции кристаллических дефлекторов – СКД25, которая обеспечивает высокую прецизионность ориентации кристалла по направлению пучка (с точностью 10 мкрад) и оснащена автоматизированной системой управления [1]. В начале эксперимента по организации вывода канал № 14 был настроен на импульс первичного пучка 50 ГэВ/с для вывода пучка протонов, а внешняя мишень была выведена из пучка. В этих условиях при оптимальной ориентации кристалла и сбрасываемой интенсивности на кристалл 10^{10} прот./цикл, на установке «СПАСЧАРМ» с помощью сцинтилляционных счетчиков была зафиксирована интенсивность $3 \cdot 10^6$ прот./цикл. Затем с помощью монитора

обратной связи сбрасываемая интенсивность была увеличена до 10^{11} прот./цикл. Величина наводимой интенсивности пучка контролируется с помощью осциллографа (см. рисунок 5.4) с точностью 10%.

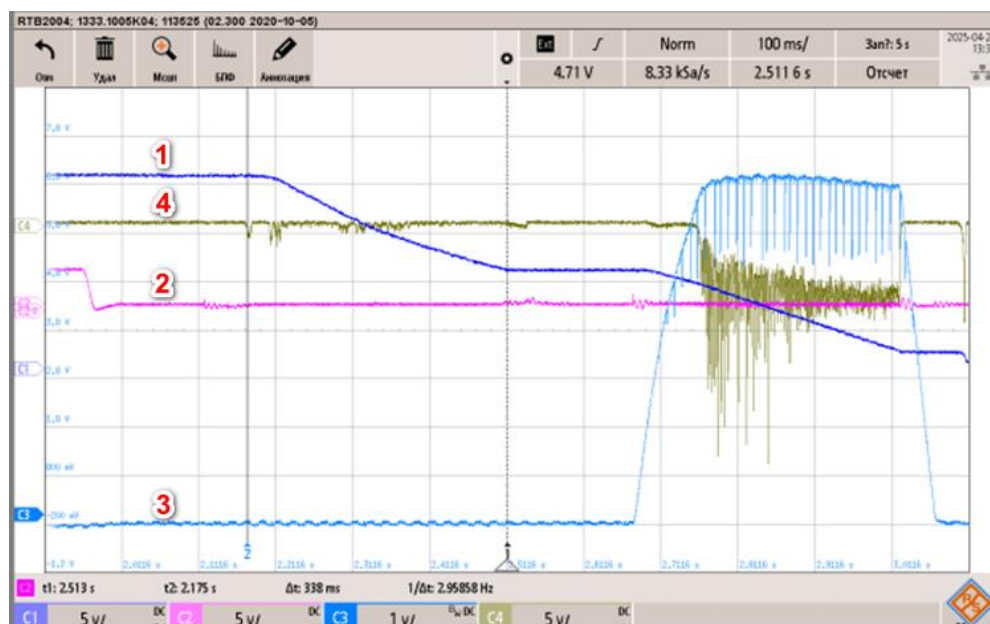


Рисунок 5.4 – Режим работы СКД25 при выводе протонов в направлении канала №14. 1 луч– интенсивность У-70, 2 луч – цикл У-70, 3 луч – ток бампа наведения пучка на кристалл 20/26, 4 луч – сигнал монитора обратной связи в 25 промежутке У-70 [3]

Увеличенную интенсивность уже не регистрировали счетчики экспериментальной установки², но эффективность вывода пучка сохранялась. Таким образом, интенсивность протонного пучка, выводимого в канал № 14 составила порядка $3 \cdot 10^7$ прот./цикл. Это подтверждается также увеличением светимости калиброванного люминофорного экрана (см. рисунок 3.10).

После предварительных операций и подтверждения наведения протонного пучка была введена внешняя алюминиевая мишень, канал № 14 был перестроен на импульс вторичных частиц в диапазоне 2–15 ГэВ/с.

Во время проведения исследования, для быстрого подтверждения наличия пучка нужной энергии, контролировалось попадание пучка в дрейфовые камеры экспериментальной установки. Для этой цели первоначально было проверено, что

² Длительность вывода при проведении исследований ограничивалось временем 400-600 мсек, что превышает возможности регистрации

пучок не попадает в «мертвую» зону трековых детекторов. Трековый спектрометр установки позволяет измерять импульс пучковых частиц, что необходимо для определения характеристик выводимого пучка и важно при проведении методических исследований для изучения характеристик новых детекторов.

На рисунке 5.5 сверху показано положение «прямого» пучка, то есть без поля в спектрометрическом магните. Среднее положение пучка в дрейфовой камере было $\sim 41,7$ отсчета (один отсчет соответствует 3 см). После включения спектрометрического магнита, координата центра пучка стала примерно $\sim 37,2$ отсчета (см. рисунок 5.5 посередине), что соответствует импульсу около 10 ГэВ/с. После выставления режима канала, примерно соответствующему расчетному импульсу 5 ГэВ/с, среднее положение пучка стало $\sim 32,4$ (см. рисунок. 5.5, снизу), что соответствует импульсу около 5 ГэВ/с.

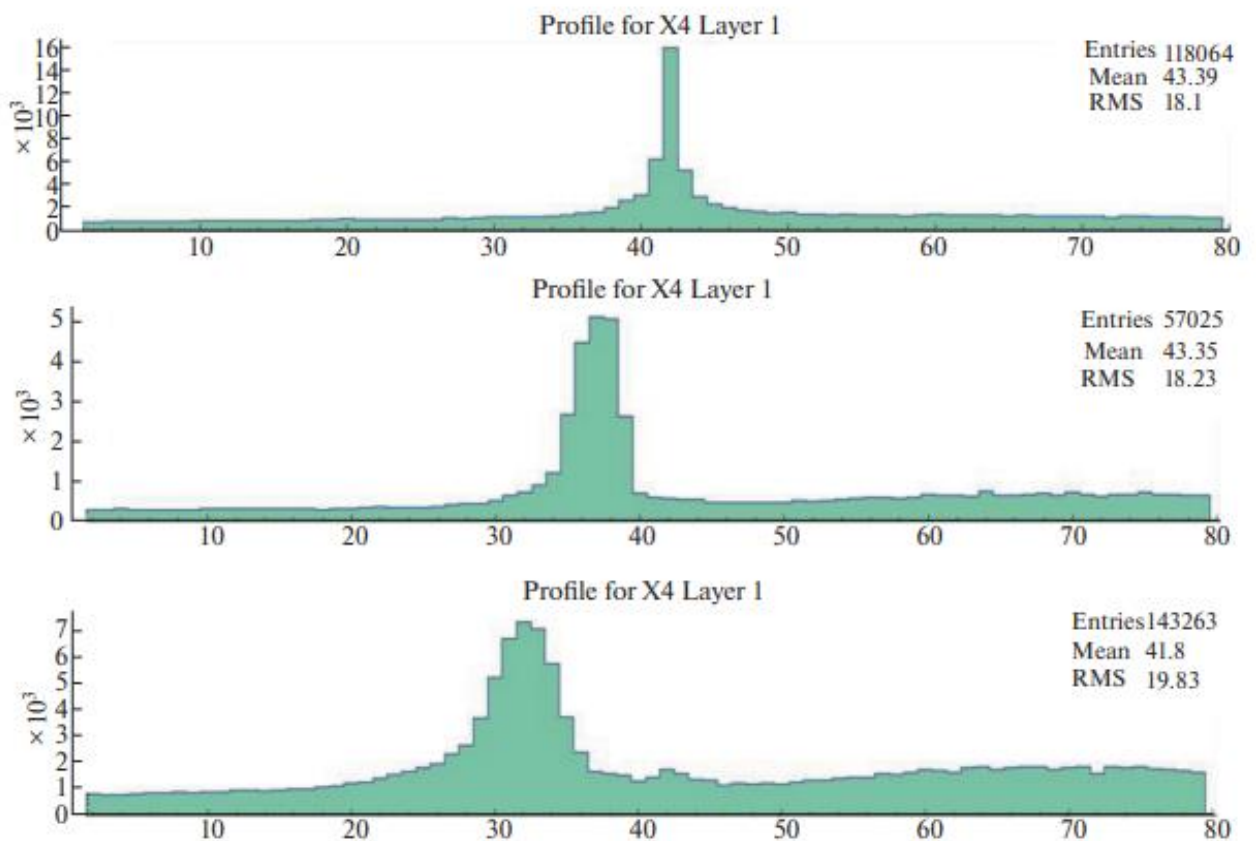


Рисунок 5.5 – Профиль пучка «мягких» пионов на камере ДК4 установки «СПАСЧАРМ» при выключенном спектрометрическом магните (сверху), в режиме «10 ГэВ» (в центре) и в режиме «5 ГэВ» (снизу) [3]

5.1.3 Результаты экспериментального исследования

После сеанса была проведена обработка экспериментальных данных, в том числе геометрическая привязка детекторов. Как результат для двух режимов магнитных элементов канала № 14 (двух значений выводимого импульса) были получены реальные импульсные спектры пучка с использованием трековой системы установки, состоящей из 57 плоскостей трековых детекторов и спектрометрического магнита. При первом режиме реально измеренное среднее значение импульса основного пучка $9,91 \pm 0,01$ ГэВ/с, импульсный разброс $13 \pm 1\%$ (см. рисунок 5.6 слева), во втором режиме среднее значение импульса $4,85 \pm 0,01$ ГэВ/с, импульсный разброс $12 \pm 1\%$ (см. рисунок 5.6 справа). При сбросе на кристалл 10^{11} прот./цикл интенсивность пучка на мишени была порядка $3 \cdot 10^7$ прот./цикл. В этих условиях интенсивность пучка вторичных частиц в канале, по измерениям установки «СПАСЧАРМ», составляла в среднем около ~ 2500 частиц для режима «10 ГэВ» и около ~ 1800 частиц для режима «5 ГэВ», при этом в заданный диапазон импульсов попадает около 60% событий.

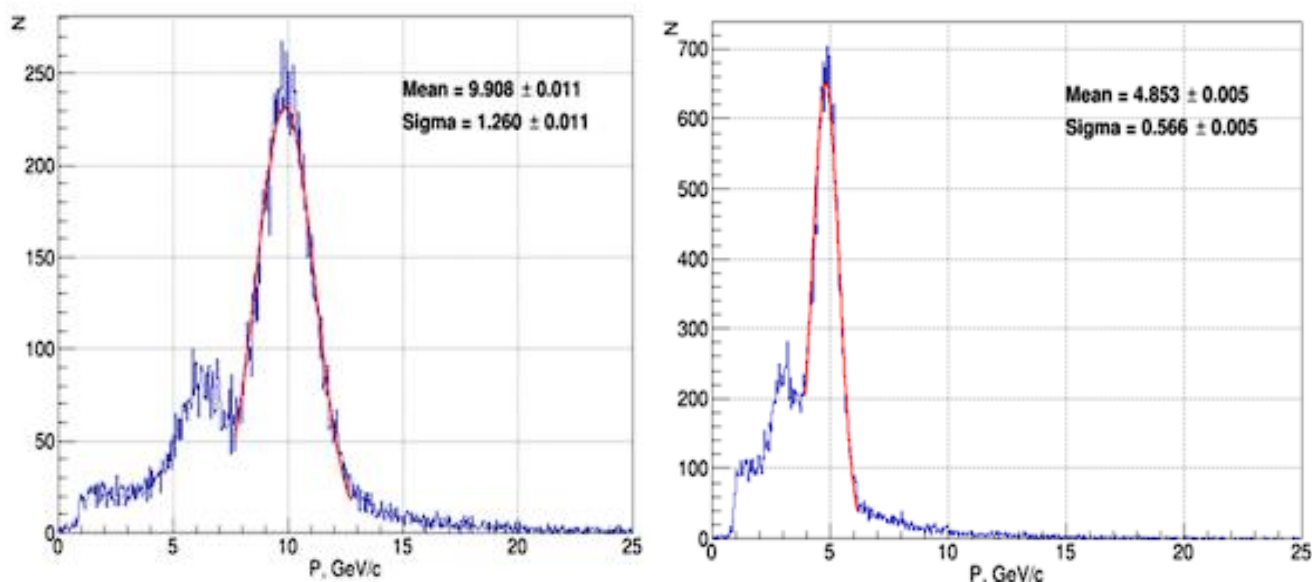


Рисунок 5.6 – Импульсные спектры пучка для двух режимов магнитных элементов канала № 14 [3]

Разработанный метод получения «мягких» адронов показал успешный результат при его апробации в ходе экспериментальных исследований в первом

сеансе 2025 г. на ускорительном комплексе У-70. В сеансе 2025 г. было впервые продемонстрировано, что данный метод позволяет получить пучок адронов в диапазоне импульсов от ~ 2 до 13 ГэВ/с и интенсивностью несколько тысяч частиц, что удовлетворяет требованиям для проведения методических исследований.

В сеансе 2026 г. были проведены методические измерения прототипа детектора FARICH [83]. При этом удалось получить пучок даже более низкой энергии, чем ожидалось, а именно, минимальный импульс реально полученного на экспериментальной установке пучка составил примерно 1,4 ГэВ/с, что позволило набрать данные для изучения характеристик прототипа детектора FARICH при пяти различных импульсах ($\sim 1,4$, ~ 3 , ~ 5 , ~ 6 , ~ 10) ГэВ/с. На рисунке 5.7 представлены импульсные спектры полученных пучков адронов для четырех значений импульсов.

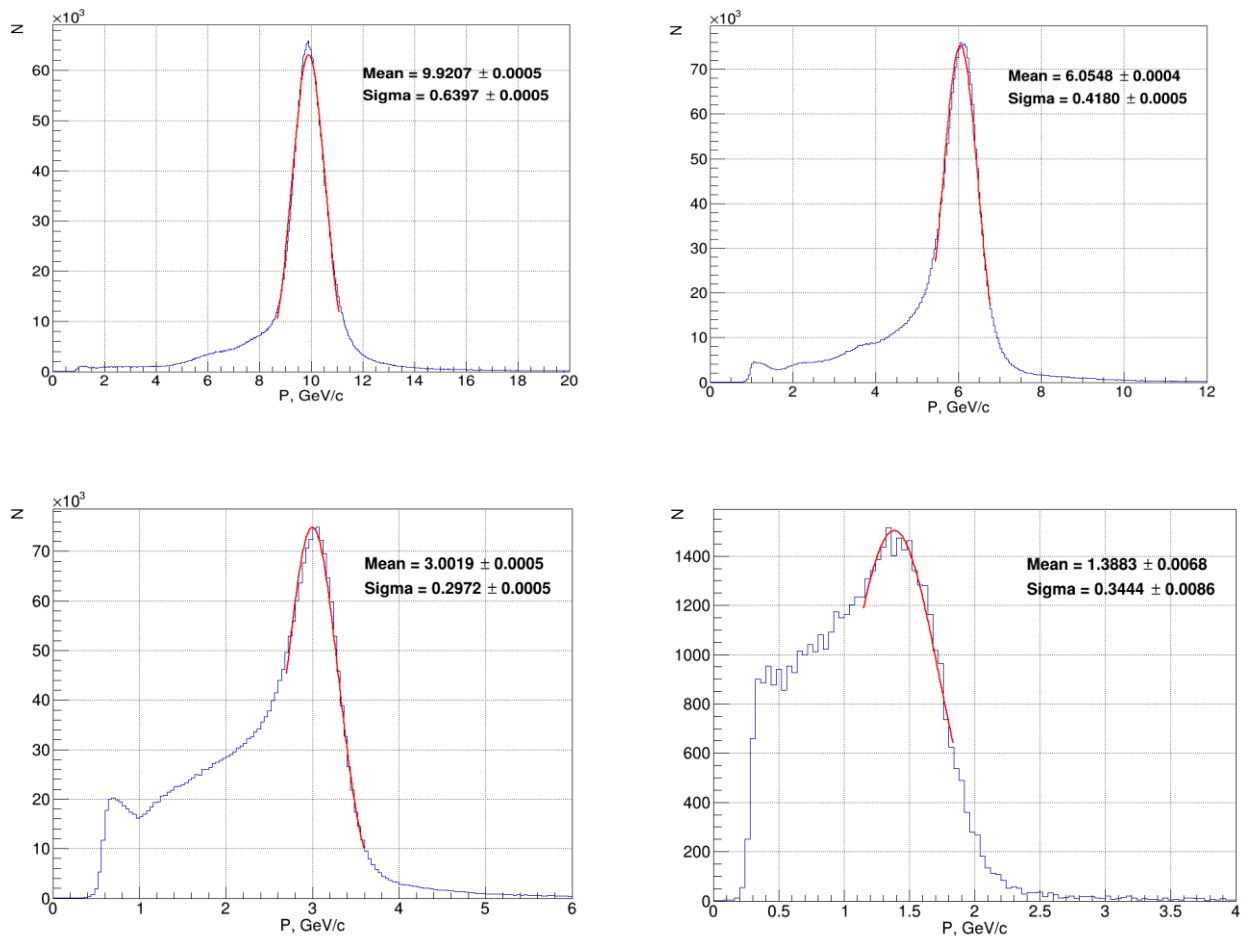


Рисунок 5.7 – Импульсные спектры пучков адронов при исследовании детектора колец черенковского излучения (FARICH)

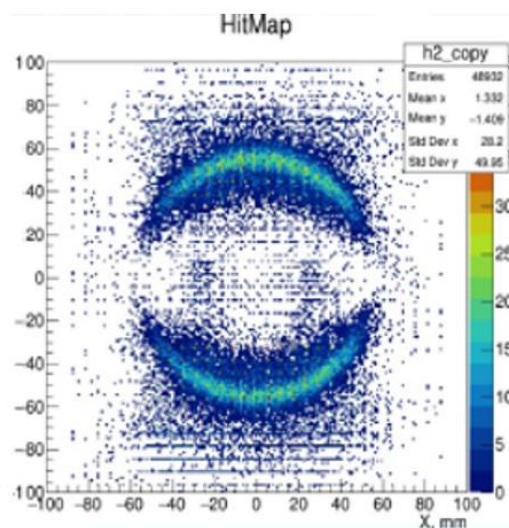


Рисунок 5.8 – Исследование детектора колец черенковского излучения (FARICH)

На рисунке 5.8 показаны кольца черенковского излучения, полученные при обработке «в линию» непосредственно при измерениях, как иллюстрация использования данного пучка для проведения методических исследований. Полученные в ходе этих исследований результаты подтвердили важное практическое значение разработанного метода получения «мягких» адронов для экспериментальных установок комплекса У-70. В дальнейшем этот метод может использоваться для устойчивой работы при проведении методических исследований на экспериментальной установке «СПАСЧАРМ».

5.2 Вывод пучка протонов из ускорителя У-70 при помощи кристаллического дефлектора с использованием явления объемного захвата в каналирование

Одним из первых применений изогнутых кристаллов в ИФВЭ стал вывод протонного пучка умеренной интенсивности в канал № 14, где сейчас работает установка СПАСЧАРМ [70,81]. При установке в 25 блоке У-70 изогнутого на большой угол 80 мрад кристалла появилась возможность работать с первичным протонным пучком интенсивностью 10^6 – 10^7 частиц в цикле [3,21]. Часть циркулирующего пучка направляется к кристаллу медленно нарастающим магнитным полем дополнительных катушек (так называемых бампов). Система с обратной связью может регулировать эту часть пучка в широком диапазоне, как

наведение к внутренним мишеням [2]. Эта система позволяет реализовать режим одновременного вывода пучка протонов с кристалла 25 блока с работой внутренних мишеней для других установок [6].

Неудобство работы кристалла в таких сложных условиях связано с необходимостью периодически менять угловое положение кристалла при переменах координат соседних мишеней, или нестабильности режима ускорителя, поскольку в каналирование с торца кристалла захватываются только частицы, влетающие в кристалл в пределах угла Линдхарда (25 мкрад для 50 ГэВ, см. [34]). Вторым неудобством работы с таким кристаллом является необходимость с высокой точностью выполнить изгиб кристалла, так как данный угол однозначно определяет величину угла поворота пучка.

Ниже описан более стабильный режим вывода протонного пучка, который использует режим объемного захвата в каналирование.

5.2.1 Метод вывода при объемном захвате и оценка эффективности

Принцип вывода пучка с помощью объемного захвата показан на рисунке 5.9. Если в стандартном режиме (торцевой захват) пучок наводится перпендикулярно торцу изогнутого кристалла, то в этом случае кристалл устанавливается на циркулирующий пучок под некоторым углом, важно, чтобы выходной торец был сориентирован так, чтобы пучок выходил под нужным углом. Захват частиц в каналирование с определенной вероятностью (см. [84,85,86]) осуществляется в области, где траектории падающих протонов выходят на касательные к изогнутым кристаллографическим плоскостям. Отметим, что в этом случае точность выполнения изгиба кристалла не является критической, так как если правильно направить выходной торец кристалла в зону установки и изогнуть кристалл на угол, превышающий необходимый, то всегда найдутся касательные, с помощью которых можно провести захват пучка. Объемный захват рассматривался в ряде статей [34,84,85,86,87,88,89]. Здесь мы будем использовать рассмотрение процесса захвата, предложенное в [84,87].

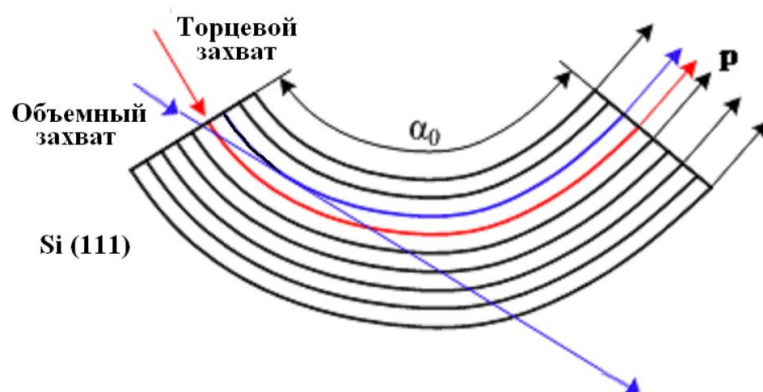


Рисунок 5.9 – Схема вывода частиц при объемном захвате

В первой из указанных статей рассматривается в основном случай плоскостной ориентации кристалла (110) и небольшие радиусы изгиба, в то время как другая статья посвящена в значительной мере плоскостной ориентации (111) и достаточно большим радиусам изгиба кристалла. Мы считаем большими величины радиусов изгиба R когда отношение величины радиуса к критическому радиусу R_c более ~ 50 . Когда $R/R_c \leq \sim 50$ мы считаем их малыми. В рассматриваемом случае радиус изгиба кристалла равен $R = L/\alpha = 6/0,075 = 80$ см, где L и α длина кристалла в см и угол изгиба в радианах, $R_c = 8,9$ см ($R/R_c = 9$).

Для оценки эффективности вывода на основе объемного захвата необходимо определить траектории частиц входящих в кристалл, а также определить область в кристалле, в которой возможен захват (см. рисунок 5.10).

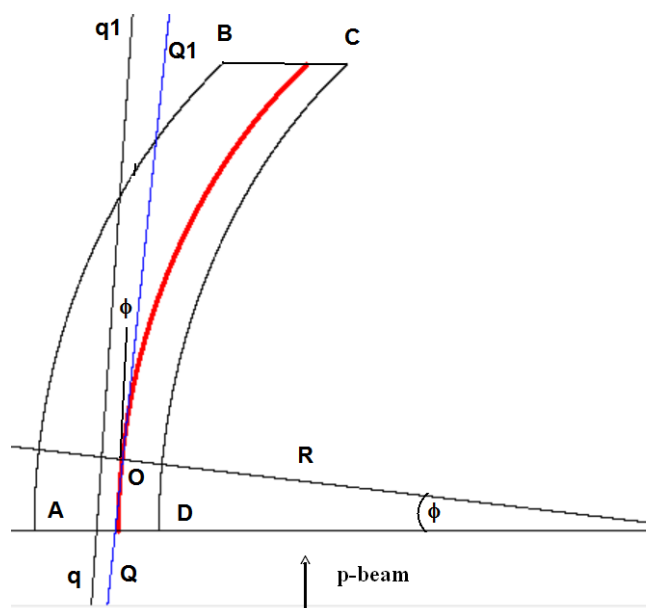


Рисунок 5.10 – Геометрия вывода протонов на основе объемного захвата

Введем декартову систему координат, в которой x и y поперечные координаты то горизонтали и вертикали и z продольная координата. Координата $x=0$ соответствует центру кристалла по горизонтали (при $z = 0$). Найдем сечение кристаллического дефлектора в плоскости z (см. рисунок 5.10)

$$X = R - R\cos(\varphi) + x_0, \quad (5.1)$$

$$Z = R\sin(\varphi), \quad (5.2)$$

где $x_0 = \pm D/2 = 0,25 \text{ см}$, D – толщина монокристалла в поперечной плоскости, φ текущий угол изгиба. В общем случае $-D/2 < x_0 < D/2$ и соответствует кристаллической плоскости с $x = x_0$ на входе в кристалл.

Рассмотрим траекторию частицы (с углом входа $\Phi = 5$ милирад) входящую в кристалл с координатами x_1 в области от A до D (см. рисунок 5.10),

$$z = (1/\Phi)(x - x_1), \quad (5.3)$$

Можно показать, что прямая линия исходящая из области координат AD под углом $1/\varphi$ с осью z является касательной (в некоторой точки с координатами x и z) к кривой, задаваемой уравнениями (5.1) и (5.2). В нашем случае $\varphi = \Phi$, $\Phi = 0,005$ рад, а следовательно координата захвата $z = R\Phi = 0,4 \text{ см}$.

Таким образом, получаем, что на расстоянии $z = 4 \text{ мм}$ от входа в кристалл направление движения частиц совпадает с направлением плоскости. Некоторая часть этих частиц захватывается в плоскостные каналы монокристалла. Согласно уравнениям из работы [87] получаем, что вероятность этого захвата для конкретных рассматриваемых условий равна 2,67%. Как известно, плоскость (111) кремния состоит из 2-х каналов узкого и широкого. В работе [87] показано, что частицы могут захватываться и в узкий канал, но они очень быстро выходят из режима каналирования в узком канале и не представляют интереса для нашей проблемы, поэтому рассчитанная указанная вероятность относится к широкому каналу плоскости (111). Захваченные в каналирование в широком канале частицы движутся в этом режиме до конца монокристалла. В итоге они отклоняются на угол $5,6 \text{ см} / 80 \text{ см} = 0,07$ радиан и движутся в направлении магнитооптического канала

№ 14. Разумеется, что часть захваченных частиц деканализирует при движении, и, согласно расчетам, вероятность для частицы захватиться в каналирование и дойти в этом режиме до выходного торца кристаллического дефлектора равна $1,11 \times 10^{-4}$ (см. рисунок 5.11).

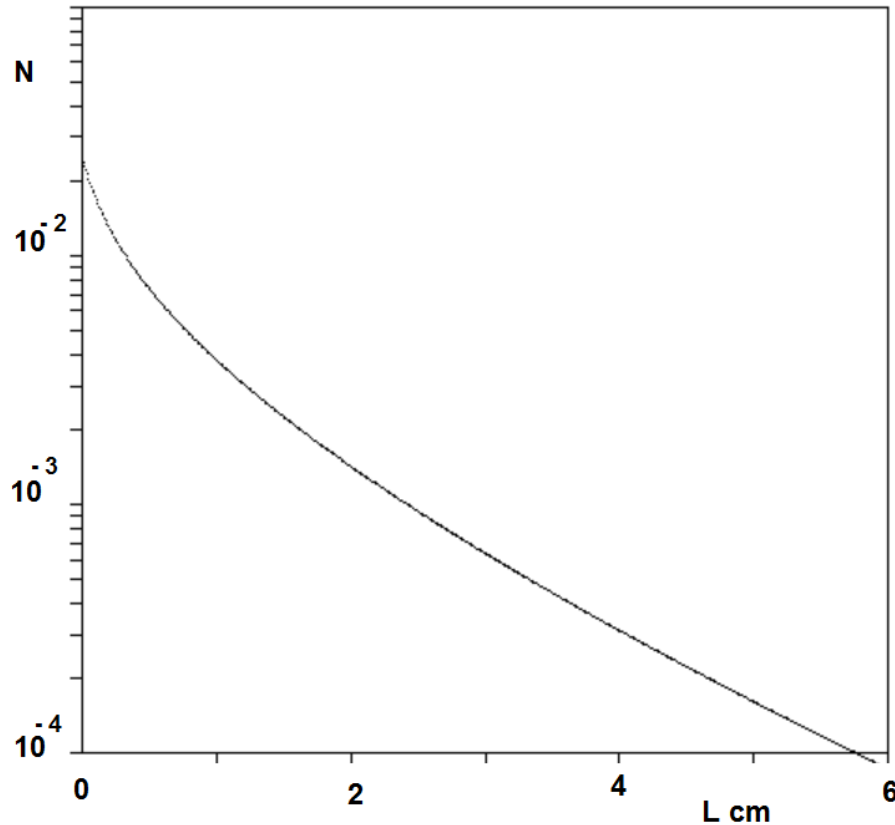


Рисунок 5.11 – Эффективность отклонения при объемном захвате в каналирование в зависимости от длины кристалла. Расчет выполнен согласно статье [87]

Отметим, что протонный пучок с расходимостью $A \ll \Phi$ может быть захвачен (с некоторой вероятностью) в каналирование в диапазоне углов от $\Phi - A$ до $\Phi + A$, в то время как в прежнем традиционном случае этот диапазон углов равен от $-\theta_c$ до θ_c (θ_c критический угол каналирования). Рисунок 5.10 показывает положение мишени относительно циркулирующего протонного пучка. Видно, что в принципе протонный пучок может облучать мишень от точек A до C , но очевидно, что только частицы, попадающие в область AD могут быть захвачены в каналирование. Принимая во внимание, что длина мишени L значительно меньше длины поглощения протонов в кремнии, можно найти, что число протонов, имеющих возможность быть захваченными в каналирование составляет примерно

30% от полного числа взаимодействующих частиц с мишенью. С учетом этого фактора, вероятность (эффективность) вывода частиц с захватом в канал уменьшается до примерно величины $3 \cdot 10^{-5}$. Однако эту величину можно принять только как верхнюю границу искомой вероятности. Действительно данное рассмотрение не принимает в расчет многократное прохождение циркулирующего протонного пучка через кристаллический дефлектор. Причем такое прохождение сопровождается заметным многократным рассеянием пучка на веществе мишени (дефлекторе), что приводит к существенному увеличению его угловых и координатных характеристик. Корректный учет этого фактора требует сложных расчетов этого процесса. В данном случае мы используем полученный ранее для условий ускорителя ИФВЭ результат. В начале 70-ых годов, сразу после запуска ускорителя, были проведены измерения эффективности бериллиевой и алюминиевой мишеней, установленных в вакуумной камере У-70. С помощью этих мишеней генерировались пучки вторичных частиц, с последующим их использованием в экспериментах. Многократное прохождение через мишени и многократное рассеяние частиц приводило к уменьшению интенсивности вторичных частиц по сравнению с однократным прохождением. Согласно работе [51], эта эффективность составляла для бериллия 70%, а для алюминия – 40%. Мы предлагаем использовать значение 40% в качестве грубой оценки для нашего случая. Таким образом, получаем для полной вероятности захвата величину порядка $1,2 \cdot 10^{-5}$. При сбросе на кристаллический дефлектор $3 \cdot 10^{11}$ протонов в канале, согласно этой оценке, должно быть $3,6 \cdot 10^6$ протонов.

5.2.2 Вывод протонного пучка на установку «СПАСЧАРМ»

Необходимый кристалл (с увеличенным углом изгиба) был подготовлен для канала № 14 и установлен в 24 блоке У-70. Конструкция кристаллического дефлектора аналогична той, что описана в [2]. Для попадания в аксептанс канала с выбранной координаты необходим угол поворота протонов 70 мрад, но кристалл

был изогнут чуть больше, а именно на угол 75 мрад. В этом случае кристалл устанавливается на циркулирующий пучок так как показано на рисунке 5.10.

Захват частиц в каналирование с определенной вероятностью (см. [84,85,86]) осуществляется в области кристалла, где траектории падающих протонов выходят на касательные к изогнутым кристаллографическим плоскостям. На старте эксперимента, с помощью монитора обратной связи был подобран режим наведения на кристалл интенсивности циркулирующего пучка $3 \cdot 10^{11}$ прот./цикл (см. рисунок 5.12).

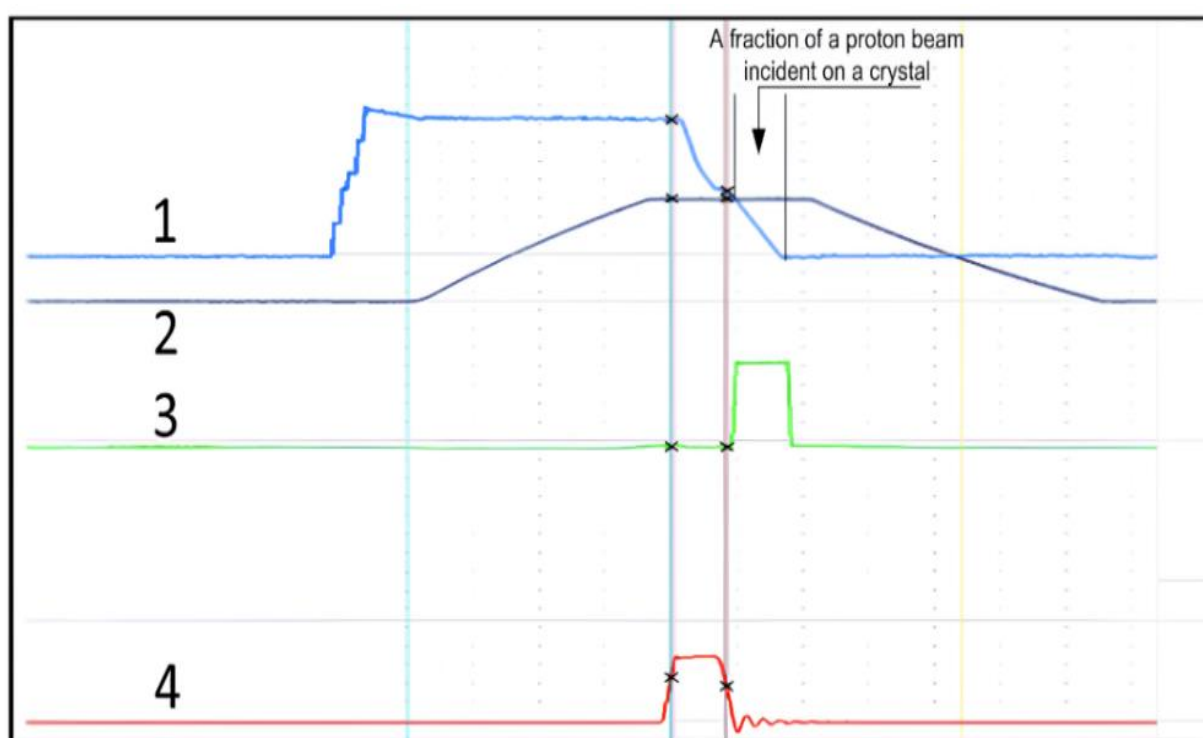


Рисунок 5.12 – Режим работы систем вывода на У-70 (на первой половине стола – медленный резонансный вывод, на второй половине медленный вывод с помощью кристалла). 1 луч – интенсивность У-70, 2 луч – цикл У-70, 3 луч – ток бампа наведения на кристалл, 4 луч – ток секступольной линзы

Затем был настроен вывода пучка, при котором кристалл работает в режиме торцевого каналирования. Этот режим настраивался с помощью дистанционного вращения кристалла на станции и наблюдения изображения отклоненного пучка на люминофорном экране большого размера. Найденный пучок не попадал в канал, так как угол изгиба больше требуемого, но был хорошо виден на экране (рисунок 5.13). Полученное изображение демонстрирует, что пучок проходил примерно на 3

см левее центра канала (размер одного люминофора около 5 см). В таком положении провести пучок по каналу невозможно.



Рисунок 5.13 – Изображение пучка, сильно смещенное от ускорителя от нужной координаты, видимое в режиме каналирования с торца

Затем кристалл был повернут на 5 мрад, таким образом кристалл начал работу в режиме объемного захвата в каналирование, а координата выводимого пучка сместилась и стала достаточной для транспортировки частиц по каналу №14. После этого режимы магнитов настраивались для оптимального прохождения пучка по годоскопам экспериментальной установки «СПАСЧАРМ».

Следует отметить, настройка канала достаточно простая для пучков, которые выводятся кристаллами, так как они имеют малый эмиттанс и не требуют фокусировки головными линзами, проходя около 100 метров до конечной оптики. Оптическая схема канала для кристаллического вывода показана на рисунке 5.14. При сбросе на кристалл интенсивности $3 \cdot 10^{11}$ прот./цикл на сцинтилляционных счетчиках установки «СПАСЧАРМ» наблюдалась интенсивность $2 \cdot 10^6$ прот./цикл, что является приемлемой величиной для работы физической установки. Так как импульс пучка при выводе с помощью кристаллов не меняется, то режим фокусирующих элементов канала не меняется и совпадает с обычным режимом вывода протонного пучка [2]. Однако угол входа пучка в канал может отличаться, поэтому подстройка наведения пучка осуществляется двумя магнитными элементами M1 и M2 (см. рисунок 5.14).

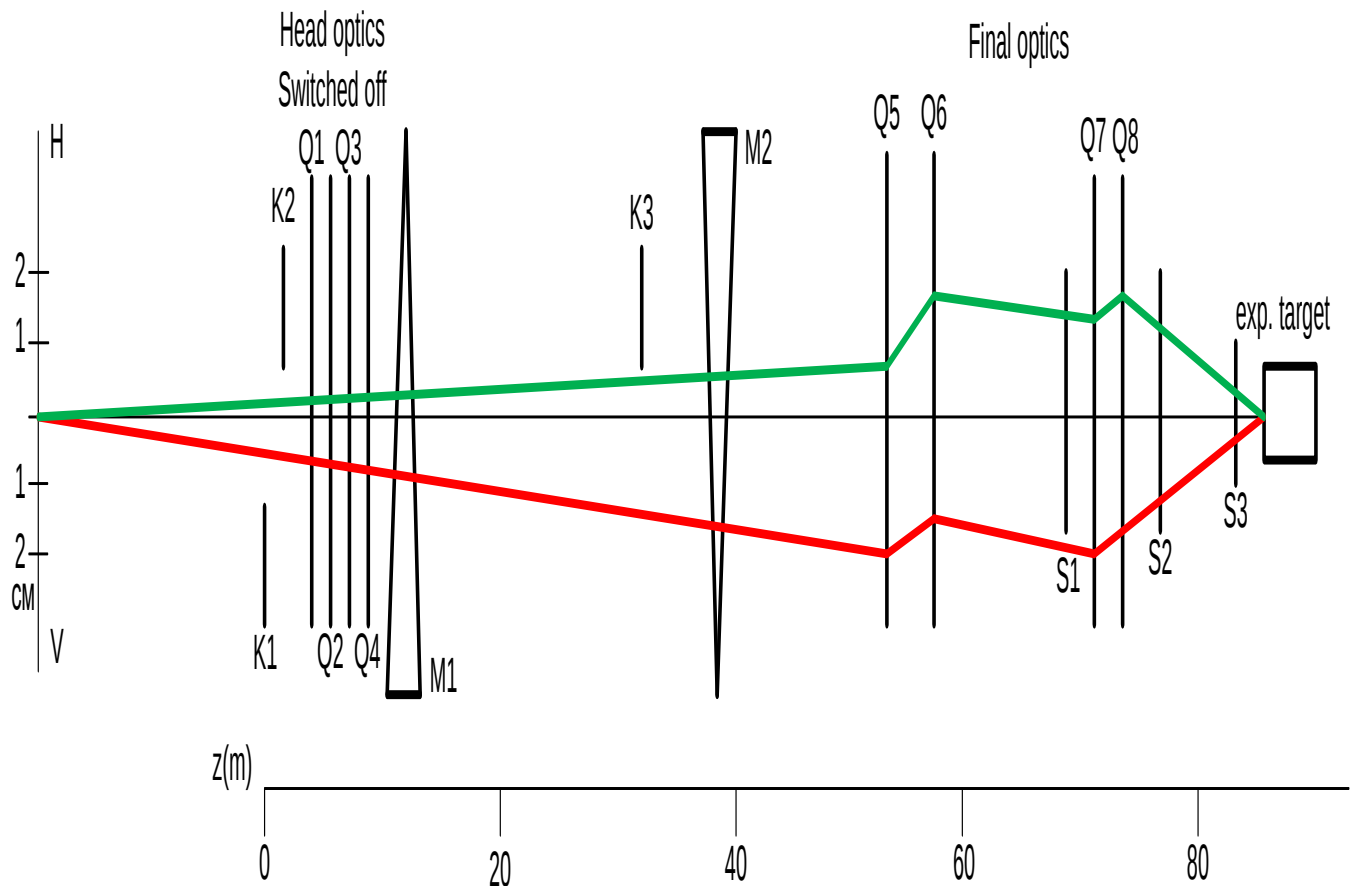


Рисунок 5.14 – Оптическая схема канала №14 для протонного пучка, выведенного кристаллом. Q1 – Q8 квадрупольные линзы, M1 и M2 магниты, K1- K3 коллиматоры, S1 - S3 сцинтилляционные счетчики, X и Y горизонтальная и вертикальная координаты. На схеме зеленым и красным цветом показаны синусные траектории для двух плоскостей (горизонталь и вертикаль) – траектории частиц, имеющих нулевую координату и угол наклона к оси, соответствующий аксептансу канала

Быстрая настройка вывода и оценка интенсивности пучка проводилась при помощи профилометра и системы измерения частиц пучка установки СПАСЧАРМ. На рисунке 5.15 показан профиль пучка, полученный с помощью пучкового годоскопа с шагом 5 мм, размещенного на входе в зону экспериментальной установки в первом пробном сеансе тестирования данного метода вывода пучка. Данный метод вывода пучка (с помощью объемного захвата) первоначально планировалось только проверить и подтвердить работоспособность данного способа; однако в первом сеансе 2026 г. в связи с нестабильностью наведения на кристалл временная структура пучка на мишени, выведенного с помощью

стандартного метода (торцевого захвата), оказалась неравномерной (см. рис. 5.16 слева), что ограничивало скорость набора экспериментальных данных.

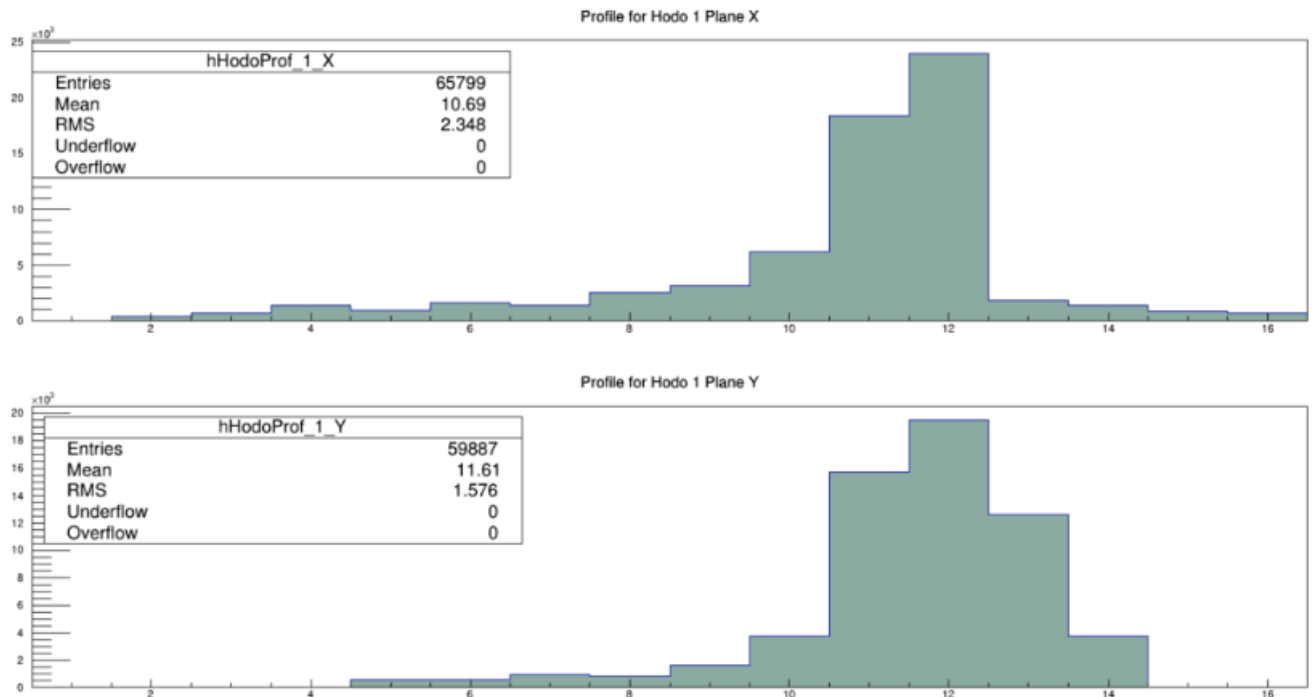


Рисунок 5.15 – Профили пучка на экспериментальной установке СПАСЧАРМ, полученный с помощью пучкового годоскопа N1 установки, по оси X – номер палочки годоскопа шириной 5 мм

Причина такого нестабильного наведения заключалась в том, что при одновременной работе кристалла и нескольких внутренних мишеней ускорителя мы не могли использовать один из бампов ускорителя, необходимый для устойчивого наведения пучка на кристаллический дефлектор, расположенный в 25 блоке У-70, при этом для стабильного наведения на данный кристалл необходимо использовать два бампа. В этих условиях угол наведения пучка на кристаллический дефлектор внутри одного цикла менялся, и, соответственно, вывод пучка на мишень установки был неустойчивый. Чтобы получить равномерную временную структуру было предложено попробовать метод вывода пучка с помощью объемного захвата. Временные структуры такого пучка приведены на рисунке 5.16 справа. Полученная временная структура оказалась намного устойчивее к условиям наведения пучка на кристалл и позволила принимать в два раза больше событий при той же интенсивности выведенного пучка просто за счет его равномерности во времени.

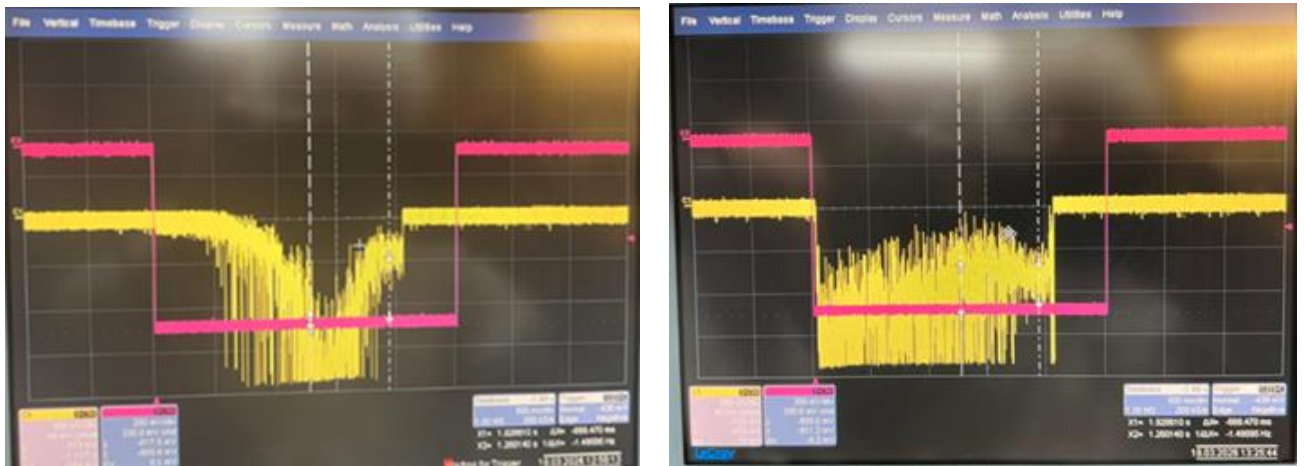


Рисунок 5.16 – Временные структуры пучка, выведенного на мишень установки СПАСЧАРМ: слева с помощью стандартного метода (торцевой захват), справа с помощью объемного захвата

На рисунке 5.17 показан горизонтальный профиль пучка на мишени экспериментальной установки «СПАСЧАРМ». Положение пучка определяется системой годоскопов экспериментальной установки СПАСЧАРМ [81], в том числе с помощью прецизионного волоконного годоскопа с разрешением около 0,2 мм [90]. Даже без дополнительной настройки узкий пучок (ширина пучка по основанию около 1 см) хорошо проходит через центр мишени (диаметр мишени 4 см). Ширина пучка по вертикали без дополнительной настройки (фокусировки) пучка примерно в два раза хуже. Небольшой пик слева от основного пучка определяется взаимодействием пучка с триггерным сцинтилляционным счетчиком. Размер и положение пучка удовлетворяет требованию эксперимента. Данный профиль получен при интенсивности пучка до $(6-7) \cdot 10^6$ прот./цикл ускорителя, что даже превышает в несколько раз требование по интенсивности. При получении пучка вторичных частиц низких энергий (метод разработан ранее специально для канала № 14) необходима полная интенсивность выведенного пучка. При наборе физических данных в эксперименте СПАСЧАРМ интенсивность пучка понижалась на порядок, чтобы уменьшить радиационные повреждения в трековых детекторах установки.

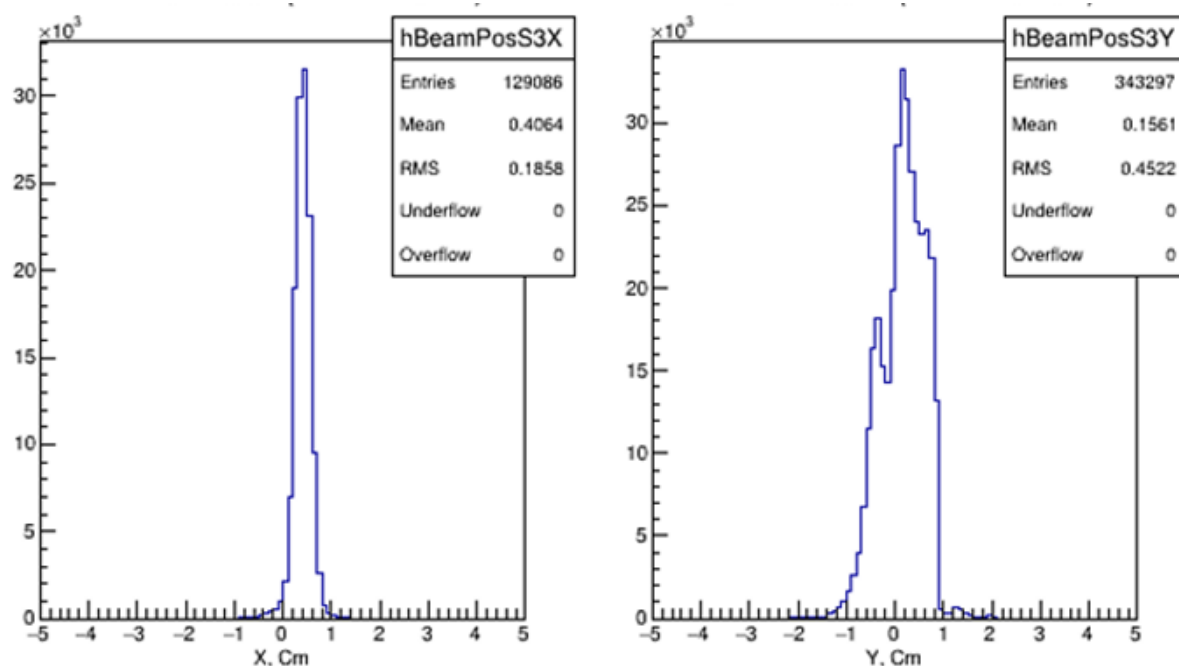


Рисунок 5.17 – Профиль пучка протонов, выведенного кристаллом с использованием явления объемного захвата на установку «СПАСЧАРМ»

Итогом проведенных экспериментальных исследований стало то, что впервые осуществлен вывод пучка из вакуумной камеры ускорителя изогнутым кристаллом методом объемного захвата, в том числе выведенный данным методом пучок позволил провести сеанс по набору физических данных с высокой эффективностью и стабильностью.

Эффективность вывода (и интенсивность выведенного пучка) с хорошей точностью совпадают с результатами расчетов. Возможность организации вывода протонного пучка и проверка характеристик пучка были проверены в двух методических сеансах на 14-ом канале ускорительного комплекса У-70.

Вывод пучка планируется использовать для проведения физических исследований на экспериментальной установке СПАСЧАРМ наряду со стандартным и осуществленным ранее выводом с помощью торцевого захвата. Вероятность объемного захвата несколько ниже, чем при торцевом захвате, но имеется ряд положительных особенностей, а именно:

- Улучшается временная структура пучка.
- Увеличивается эффективная растяжка вывода пучка, так как появляется независимость параметров вывода от угла падения частиц пучка на кристалл.

- Не требуется подстройка угла наведения кристалла при изменении условий наведения на кристалл.
- Угол ориентации кристалла достаточно настроить только один раз, затем в сеансах можно пользоваться только линейными перемещениями кристалла. При этом исчезает необходимость подстройки угла кристалла, как это делается каждый раз при выводе пучка с помощью торцевого захвата.

Полученный метод вывода протонного пучка существенно повышает надежность организации вывода протонного пучка на экспериментальную установку СПАСЧАРМ, дублируя уже имеющийся вывод с помощью СКД25 и позволяя получить более стабильный режим вывода протонного пучка при нестабильном режиме работы ускорительного комплекса.

5.3 Защита септума в ускорителе У-70 с помощью отражения частиц в мультикристаллических структурах

На крупных ускорителях циркулирующий пучок частиц выводится из кольца с помощью устройств, называемых септумами [91]. Схема работы такого устройства показана на рисунке 5.18 слева. Часть циркулирующего пучка наводится в апертуру септума, отделенного металлической перегородкой, и отклоняется дальше электростатическим или магнитным полем. Частицы, попадающие в перегородку, вызывают радиационный разогрев перегородки и создают фон на установках. Кристаллический отклоняющий прибор, установленный на определенном расстоянии от септума, может уменьшить долю частиц, взаимодействующих с перегородкой, путем каналирования или отражения частиц в изогнутом кристалле, как это показано на рисунке 5.18 справа. Первые экспериментальные результаты такого применения кристалла были получены на ускорителях У-70, СПС и Бустере Фермилаб [5,92,93]. В частности, при использовании одиночной изогнутой кристаллической полоски в режиме

каналирования на ускорителе СПС в ЦЕРН затенение электростатического септума составило 40% [92].

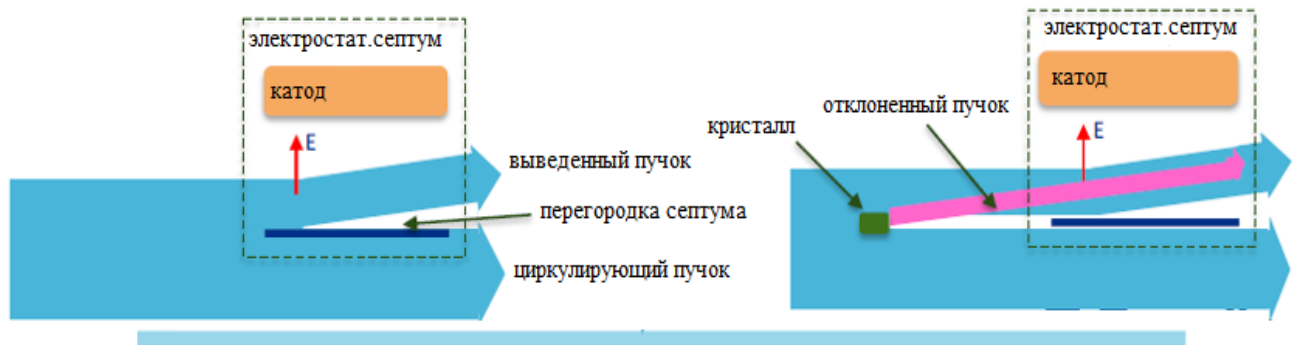


Рисунок 5.18 - Демонстрация принципа защиты септум-магнита (либо электростатического септума) кристаллом в ускорителе

На У-70 был проведен демонстрационный эксперимент по защите магнитного септума ОМ24 с использованием пучка быстрого вывода, который наводился прямо на нож септума. Причем, на У-70 применялось более эффективное мультикристаллическое устройство, работающее на отражении [5]. При оптимальной ориентации кристалла потери уменьшились на 58%.

Таким образом экспериментально была продемонстрирована возможность использования объемного отражения протонного пучка мультикристаллическим устройством для защиты септум-магнитов в ускорителях.

Следующим этапом является защита септума на реально работающем медленном выводе, для чего создано и проверено на канале 4А новое, оптимальное устройство.

5.3.1 Кристаллическое устройство

Это устройство должно отклонять значительную долю пучка в апертуру септума с первого оборота за счет объемного отражения [59,94,95,96], увеличивая эффективность вывода. Меньшая доля пучка, порядка 10% [89], отклоняется в сторону ускорителя и участвует в многооборотном процессе. Поэтому параметры устройства оптимизированы с учетом этого фактора, который приводит к

ограничению изгиба каждой полоски до величины 0.3 мрад, чтобы отклоненный пучок не терялся на апертурах вакуумной камеры У-70.

Для радиационной защиты токовой перегородки выводного септум-магнита предлагается устройство для кратного отклонения протонного пучка несколькими изогнутыми полосками кремния в режиме объемного отражения. Объемное отражение обусловлено взаимодействием налетающего протона с потенциалом изогнутой атомной решетки и происходит на малой длине в области касательной к изогнутой атомной плоскости. Вероятность однократного отражения высока и при энергиях около 100 ГэВ приближается к единице. Для увеличения угла отражения и практического применения объемного отражения необходимо увеличить значение угла отклонения заряженных частиц. Это делается с помощью взаимно ориентированных с высокой точностью кристаллов, расположенных последовательно. Для защиты септум-магнита У-70 с токовой перегородкой 2 мм нами разработано устройство «бутерброд» (см. рисунок 5.19). Устройство содержит 42 изогнутых кристалла в виде изогнутых полосок. Шесть полосок по 3 мм длиной вдоль пучка усиливают эффект отражения, а семь слоев толщиной 350 мкм поперек пучка обеспечивают необходимый поперечный размер 2,4 мм.

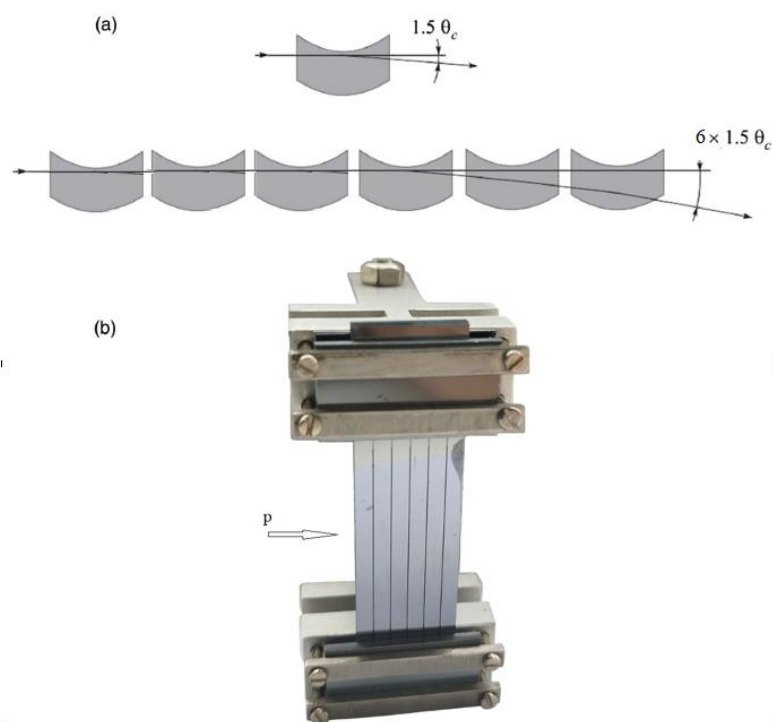


Рисунок 5.19 – а – принцип работы устройства, б – его внешний вид

5.3.3 Экспериментальная проверка мультикристалла на пучке 50 ГэВ

Работы по тестированию устройства проводились на выведенном пучке в канале частиц 4А. Вывод в канал 4А протонного пучка с энергией 50 ГэВ интенсивностью $\sim 10^6$ протон/цикл обеспечивался с помощью кристалла, установленного в 27 блоке У-70. На выходе канала был получен параллельный пучок с расходимостью $\sigma_x, \sigma_y \sim 0.1$ мрад и направлен на установку ИСТРА-КРИСТАЛЛ. Схема установки приведена на рисунке 5.20. Начальное выравнивание кристаллического устройства осуществлялось с помощью отражения лазерного луча от граней кристалла до меток, связанных с протонным пучком. Интенсивность прямого пучка протонов измерялась сцинтилляционными счетчиками S1&S2 в режиме совпадений, а отклоненного кристаллом пучка счетчиками S3&Sm. Счетчик S3 был смонтирован около торца кристалла и мог перемещаться вместе с ним в гониометре благодаря оптоволоконному соединению с ФЭУ. Ориентационный эффект действия кристалла на пучок находился с помощью двух методик: с помощью сканирующего счетчика Sm и наблюдения 2D профиля пучка цифровой телевизионной камерой с люминофорным экраном (медицинский люминофор на основе иттриевого соединения). Режим обработки информации с камеры оптимизировался (подбирался коэффициент усиления, время экспозиции и т.д.). С помощью вращения кристалла в гониометре с мелким шагом 20 мкрад и наблюдению профилей пучка за кристаллом при каждом фиксированном угловом положении описанными методиками находилась оптимальная ориентация кристалла в пучке, когда тень от кристаллического устройства на профиле пучка была максимальна. Окончательное измерение эффекта затенения пучка кристаллическим устройством было проведено с помощью полимерной радиохромной дозиметрической пленки GAFCHROMIC EBТ3 [97], которая обеспечила наибольшую точность измерений. Активный компонент пленки состоит из кристаллов радиационно-чувствительного мономера субмикронного размера.

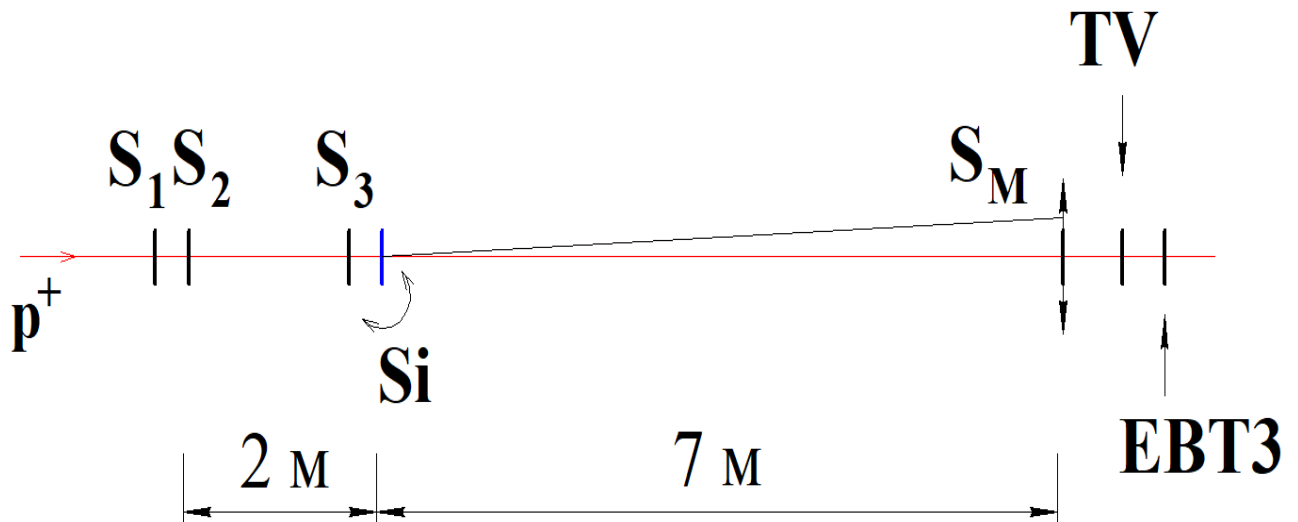


Рисунок 5.20 – Схема установки ИСТРА-КРИСТАЛЛ (вид сверху). S1, S2, S3, SM – сцинтилляционные счетчики, Si – кристалл в гониометре, TV – телевизионная камера, направленная на люминофорный экран, EBT3 – дозиметрическая пленка

Когда пленка подвергается воздействию ионизирующего излучения, начинается реакция полимеризации, что приводит к изменению ее оптической плотности, а глубина изменения пропорциональна поглощенной дозе (соответственно потоку прошедших частиц) в активном слое. Процесс полимеризации не передается от кристалла к кристаллу, и после облучения отсутствует процесс проявления, который мог бы изменить размер или форму частиц. Следовательно, эта пленка имеет пространственное разрешение в микронах, которое ограничено только оборудованием, используемым во время работы. Пленку сканировали на планшетном сканере EPSON EXPRESSION 10000 XL в пропускающем режиме, без цветокоррекции, с разрешением 2400 точек на дюйм. В результате мы получили 48-битное цветное изображение по 16 бит на канал в формате TIFF. Оцифрованное изображение обрабатывалось по красному каналу. Значение оптической плотности для одного пикселя изображения определялось из выражения: $OD(x_i, y_j) = \log_{10}(\frac{I_0(x_i, y_j)}{I(x_i, y_j)})$, где $I_0(x_i, y_j)$, $I(x_i, y_j)$ – интенсивность цвета для пикселя с координатами до и после облучения пленки соответственно. Абсолютную калибровку пленки проводили однократно с использованием сцинтилляционных счетчиков в режиме накопления статистики за несколько сотен циклов ускорителя.

Рисунок 5.21 демонстрирует возможность затенения септума кристаллическим устройством.

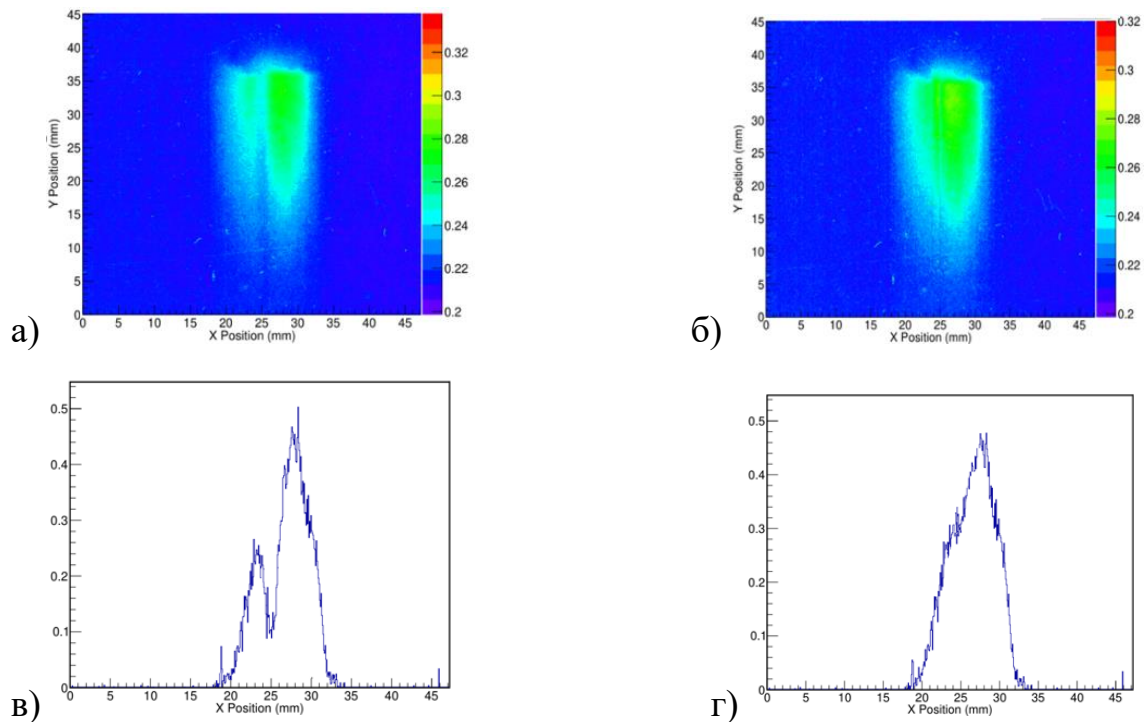


Рисунок 5.21 – Измеренный профиль пучка через 7 метров после кристалла: а, б – 2D профиль пучка за ориентированным и разориентированным кристаллом на расстоянии 7 м (ориентированный (слева) и неориентированный кристалл (справа)). в, г – соответствующие одномерные проекции профиля по горизонтальной координате.

Как видно из рисунка, в случае ориентированного кристалла на профиле образуется большой провал, вызванный отклонением частиц за счет объемного отражения. Коэффициент затенения при тестировании на канале 4А составил 65% (это заметно лучше, чем ранние результаты ЦЕРН – 40%). По нашим оценкам расчетный коэффициент «затенения» септума мультикристаллом при медленном выводе составит 60%. Эксперимент на медленном выводе запланирован на будущие сеансы У-70, когда реализуется высокая интенсивность пучка в У-70. Ожидается, что эффективность вывода может возрасти на несколько процентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе обобщены данные, полученные при проведении различных экспериментальных исследований по управлению пучками заряженных частиц с помощью изогнутых кристаллических дефлекторов на ускорительном комплексе У-70.

Основные результаты диссертационной работы таковы:

- Создана унифицированная станция кристаллических дефлекторов на У-70 новой конструкции и новый автоматизированный комплекс управления станциями кристаллических дефлекторов. Это позволило достичь универсализации комплекса управления СКД, распространяемой на любую унифицированную станцию кристаллических дефлекторов, расположенную на У-70, и значительно упростило ремонт в случае выхода из строя периферийного блока управления СКД, который располагается в ускорительном зале У-70, в зоне с повышенным фоном ионизирующего излучения.

- Проведено экспериментальное исследование зависимости эффективности вывода пучка протонов из У-70 изогнутыми кристаллами от угла изгиба кристаллов. Показано, что в коротких кристаллах с углом изгиба 1 мрад, эффективность вывода достигает величины 0,85, а в протяженных кристаллах при углах изгиба 135 мрад она равна $5 \cdot 10^{-5}$.

- Экспериментально исследована тепловая и радиационная стойкость кристаллов и стабильность вывода при длительном взаимодействии кристалла с циркулирующим пучком. Установлено, что кристаллы кремния выдерживают потоки частиц до $2 \cdot 10^{20}$ частиц на см^2 без существенной деградации каналирующих свойств, нагреваясь до сотен градусов.

- Разработаны методы, позволяющие варьировать интенсивность выведенного пучка в широких пределах. На ускорительном комплексе У-70 при выводе с использованием изогнутых кристаллов получены пучки варьируемой интенсивности. Для коротких кристаллов (5мм) с малым углом изгиба (1–2 мрад) интенсивность выведенного пучка варьировалась в пределах от $2 \cdot 10^6$ до $6 \cdot 10^{11}$

частиц/цикл, для длинных кристаллов (70 мм) с большим углом изгиба (80–90 мрад) – от $2 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^6$ частиц/цикл.

– Разработан и внедрен режим одновременной работы кристаллов (от одного до трех) и нескольких внутренних мишеней для экспериментальных установок. Примеры конфигураций:

- Параллельная работа внутренней мишени в 35-м блоке магнита У-70 (для вывода в канал № 18 на установку ГИПЕРОН) с двумя кристаллами в 25-м и 27-м блоках магнита У-70 (вывод в каналы № 14 на установку СПАСЧАРМ и № 4А на установку ИСТРА-КРИСТАЛЛ).
- Работа СКД19 для каналов № 8 или № 22 совместно с тремя внутренними мишенями в 24-м, 27-м и 35-м блоках У-70 для установок СПАСЧАРМ (канал № 14), ВЕС (канал № 4) и ГИПЕРОН (канал № 18).

– Реализовано развитие метода деления пучка между каналами № 8 и 22 слабовозмущающим кристаллическим сплиттером. В канал № 22 отклоняется тысячная (10^{-3}) часть пучка, выводимого в канал № 8, при потерях 0,002%. Такой режим вывода пучка длительное время использовался для установки СВД-2 (а в настоящее время – для установки ФОДС) на канале № 22 при одновременной работе установки ОКА на канале № 8.

– Проведены экспериментальные исследования и реализован вывод ионов углерода из ускорителя У-70 в каналы транспортировки заряженных частиц № 22, № 8 и № 4А. Полученные таким образом пучки обладают следующими характеристиками: достаточной интенсивностью, подходящим размером, правильной временной структурой и требуемым составом. Также были проведены специальные эксперименты с комбинированным методом наведения циркулирующего пучка на кристалл с помощью бампов и шумового воздействия на пучок, в результате чего получена низкопульсационная структура выведенного пучка.

– Определены сравнительные характеристики вывода протонов и ядер углерода из У-70 изогнутыми кристаллами, например, показано, что

эффективность вывода ядер углерода в канал 22 несколько ниже, около 70%, тогда как протоны выводились с эффективностью 85%.

– Проведены экспериментальные исследования по применению изогнутых кристаллических дефлекторов на ускорителе У-70 для получения пучков заряженных адронов в диапазоне импульсов 1,4–13 ГэВ/с при выводе первичных протонов на внешнюю алюминиевую мишень. В марте 2025 г. продемонстрирована, а в марте 2026 г. реализована возможность использования такого режима вывода для обеспечения методических работ на физических установках в сеансах на ускорителе У-70. В сеансе 2026 г. данный метод был применен для получения пучка положительно заряженных адронов в диапазоне импульсов от 1,4 до 10 ГэВ/с для методических работ на установке СПАСЧАРМ.

– Разработан и реализован вывод пучка кристаллом в канал № 14 с использованием объемного захвата в каналирование. При эффективности вывода порядка 10^{-5} , что совпадает с расчетами, получен пучок с высокой стабильностью, достаточный по интенсивности для работы установки СПАСЧАРМ. При сбросе на кристалл интенсивности от $3 \cdot 10^{10}$ до $3 \cdot 10^{11}$ прот./цикл на установке «СПАСЧАРМ» получен пучок с интенсивностью в диапазоне от $2 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^6$ прот./цикл соответственно, в зависимости от требования экспериментаторов. Этот режим имеет ряд положительных особенностей, а именно: улучшается временная структура пучка, увеличивается эффективная растяжка вывода пучка, так как появляется независимость параметров вывода от угла падения частиц пучка на кристалл, не требуется подстройка угла наведения кристалла при изменении условий наведения на кристалл. Данный режим в 2026 г. впервые использовался в сеансе по набору экспериментальных данных на установке СПАСЧАРМ и позволил увеличить скорость набора данных вдвое.

– Исследована возможность защиты септум-магнита СМ24 с помощью кристаллического устройства при интенсивном медленном выводе пучка. Подготовлено и проверено на выведенном пучке высокоэффективное (около 65%) кристаллическое устройство, которое по расчётам позволит увеличить эффективность медленного вывода на несколько процентов.

Основные выводы диссертационной работы:

- Создание унифицированной станции кристаллических дефлекторов и нового автоматизированного комплекса управления станциями кристаллических дефлекторов существенно повысило оперативность и надежность управления выводом пучков частиц высоких энергий с помощью изогнутых кристаллов, что привело к повышению коэффициента использования ускорительного времени при работе ускорителя.
- Наблюдается хорошее согласие экспериментальных данных с результатами математического моделирования по эффективности отклонения пучка кристаллом в зависимости от угла изгиба, полученных для ионов водорода (протонов) энергии 50 ГэВ, что позволяет делать прогнозы для вывода ионов и оптимизации режимов работы У-70 с ионами. Для более тяжелых ионов эффективность вывода падает из-за увеличения сечения неупругого ядерного взаимодействия с веществом кристалла. Так, для ионов углерода при энергии $E = 25$ ГэВ/нуклон расчетная эффективность падает в два раза при углах отклонения более 20 мрад. Полученные результаты демонстрируют надежность расчетов.
- Продемонстрирована устойчивая работа вывода пучка с помощью кристаллов для двух экспериментов, где требовалась плавная регулировка интенсивности пучка в широком динамическом диапазоне. Разработанные методы позволяют варьировать интенсивность пучка в широких пределах без изменения параметров пучка, наводимого на кристалл.
- Установлено, что короткие кристаллы кремния в пучках с интенсивностью порядка 10^{12} частиц/цикл могут работать 60 дней, а протяженные кристаллы кремния около года.
- В ходе экспериментов показано, что изогнутые кристаллы могут направлять ионные пучки к разным установкам комплекса У-70, при этом несколько установок могут работать одновременно.
- Установлено, что использование изогнутого кристалла в режиме объемного захвата в каналирование существенно улучшает временную структуру выведенного пучка, что в сочетании с высокой стабильностью данного режима

позволяет обеспечить необходимую интенсивность выведенного на мишень экспериментальной установки пучка. Проведенные исследования демонстрируют хорошую точность расчетов. Вывод пучка кристаллом в режиме объемного захвата может использоваться для проведения физических исследований на экспериментальных установках.

В заключение выражаю искреннюю благодарность и глубокую признательность.

Прежде всего, хочу поблагодарить моего научного руководителя, Чеснокова Ю.А., за постоянную поддержку, всестороннюю помощь и ценное научное руководство. Особая признательность Афонину А.Г., который много лет руководил службой оперативного управления систем вывода У-70. Ваше наставничество и вклад в это диссертационное исследование поистине бесценны!

Благодарю Терехова В.И., начальника лаборатории систем диагностики пучка, за помощь в проведении экспериментов и важные замечания при написании работы. Выражаю признательность Уханову М.Н. за колоссальный вклад в создание автоматизированной системы управления для унифицированной СКД.

Отдельная благодарность Мочалову В.В. и Васильеву А.Н. за плодотворное сотрудничество в ходе экспериментальных исследований, а также за активное участие в обсуждении результатов и ценные комментарии при подготовке диссертации.

Огромное спасибо Иванову С. В. и Зайцеву А. М. за их вдохновляющую поддержку, помощь и содействие при написании диссертационной работы. Благодарю Воронкова Н. Е. за ценные замечания при написании работы и постоянную готовность помогать.

Также хочу поблагодарить коллективы ОСВ и ОУК У-70, а также ОП, ОЭФ и ОРИ за профессионализм и предоставленную возможность провести экспериментальные исследования, легшие в основу данной диссертации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Решетников С. Ф.** и др. Унифицированная станция кристаллических дефлекторов на ускорителе У-70 //Ядерная физика и инжиниринг. – 2025. – Т. 16. – №. 6. – С. 873-880.
doi:10.56304/S2079562925060223
2. **Решетников С.Ф.** и др. Вывод пучка протонов варьируемой интенсивности из ускорителя У-70 с помощью изогнутых кристаллов //Ядерная физика и инжиниринг. – 2025. – Т. 16. – №. 1. – С. 80-86.
doi: 10.56304/S2079562924060307
3. **Решетников С.Ф.,** и др. Получение пучка заряженных адронов в диапазоне импульсов 2–13 ГэВ/с на ускорительном комплексе У-70 //Ядерная физика и инжиниринг. – 2026. – Т. 17. – №. 2. – С. 303-309.
doi: 10.56304/S2079562926020053
4. Arkhipenko A. A., ..., **Reshetnikov S. F.**, et al. Investigation of the efficiency of the extraction of a 50-GeV proton beam from a ring accelerator with the use of silicon crystals bent at various angles //JETP letters. – 2008. – Т. 88. – №. 4. – С. 229-231
doi: 10.1134/S0021364008160017
5. Афонин А. Г., ..., **Решетников С.Ф.,** и др. Использование новых кристаллических устройств на ускорителе У-70 //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2021. – Т. 113. – №. 4. – С. 223-228.
doi: 10.31857/S1234567821040029
6. Afonin A.G., ..., **Reshetnikov S.F.**, et al. Positive features of crystal extraction of protons and carbon ions from the U-70 on basis of long-term experience //International Journal of Modern Physics A. – 2018. – Т. 33. – №. 23. – С. 1850138.
doi: 10.1142/S0217751X18501385

7. Афонин А. Г., ..., **Решетников С.Ф.** и др. Вывод пучка ионов углерода из ускорителя У-70 в канал 4а с помощью изогнутого монокристалла //Приборы и техника эксперимента. – 2016. – №. 4. – С. 16-19.
doi: 10.7868/S0032816216030162
8. Arkhipenko A. A., ..., **Reshetnikov S. F.**, et al. Splitting of a 50-GeV proton beam by a slightly disturbing bent crystal //Instruments and Experimental Techniques. – 2009. – Т. 52. – №. 2. – С. 155-158.
doi: 10.1134/S0020441209020018
9. Бокий Г. Б., Порай-Кошиц М. А. Рентгеноструктурный анализ //М.: Изд-во МГУ. – 1964. – Т. 1. – С. 620.
10. Томпсон М. У. Каналирование частиц в кристаллах //Успехи физических наук. – 1969. – Т. 99. – №. 10. – С. 297-317.
11. Stark J. Phys. Zs. 13, 973 (1912).
12. Robinson M. T., Oen O. S. Computer studies of the slowing down of energetic atoms in crystals //Physical Review. – 1963. – Т. 132. – №. 6. – С. 2385.
13. Piercy G. R. et al. Experimental evidence for the increase of heavy ion ranges by channeling in crystalline structure //Physical Review Letters. – 1963. – Т. 10. – №. 9. – С. 399.
14. Линдхард Й. Влияние кристаллической решетки на движение быстрых заряженных частиц //Успехи физических наук. – 1969. – Т. 99. – №. 10. – С. 249-296.
15. Gemmell D. S. Channeling and related effects in the motion of charged particles through crystals //Reviews of Modern Physics. – 1974. – Т. 46. – №. 1. – С. 129.
16. Feldman L. C., Mayer J. W. and Picraux S. T. Materials Analysis by Ion Channeling: Submicron Crystallography //Academic Press, New York, 1982.
17. Кумахов М. А., Ширмер Г. Атомные столкновения в кристаллах // М.: Атомиздат, 1980. – с. 192.

18. Tsyganov E. N. Estimates of cooling and bending processes for charged particle penetration through a mono crystal //preprint Fermilab TM-684, Batavia USA. – 1976.
19. Elishev A. F. et al. Steering of charged particle trajectories by a bent crystal //Physics Letters B. – 1979. – Т. 88. – №. 3-4. – С. 387-391.
20. Avdeichikov V.V., Buldakovskii V.N., Buchkiv A.V. [et al.] Accelerated Beam Extraction by Means of a Bent Single Crystal at the JINR Synchrophasotron // Technical Repot, Fermilab. – 1986. – FN-0429 – February 1986. - Pp. 1-6.
21. Asseev A. A. et al. Extraction of the 70 GeV proton beam from the IHEP accelerator towards beam line 2 (14) with a bent single crystal //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1991. – Т. 309. – №. 1-2. – С. 1-4.;
22. Akbari H. et al. First results on proton extraction from the CERN-SPS with a bent crystal //Physics Letters B. – 1993. – Т. 313. – №. 3-4. – С. 491-497.
23. Carrigan Jr R. A. et al. Extraction from TeV-range accelerators using bent crystal channeling //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1994. – Т. 90. – №. 1-4. – С. 128-132.
24. Афонин А. Г. и др. Новые результаты по изучению эффективного вывода протонов кристаллом из 70 ГэВ ускорителя ИФВЭ // Письма в ЖЭТФ, 1998, Т. 68, № 7, Октябрь 1998, С. 544-548.
25. Afonin A. G. et al. High-efficiency beam extraction and collimation using channeling in very short bent crystals //Physical review letters. – 2001. – Т. 87. – №. 9. – С. 094802.
26. Афонин А. Г. и др. Вывод пучка протонов из ускорителя ИФВЭ с помощью коротких кристаллов кремния //Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2005. – Т. 36. – №. 1.

27. Fliller III R. P. et al. Results of bent crystal channeling and collimation at the Relativistic Heavy Ion Collider //Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams. – 2006. – Т. 9. – №. 1. – С. 013501.
28. Mokhov N. V. et al. Crystal collimation studies at the Tevatron (T-980) //International Journal of Modern Physics A. – 2010. – Т. 25. – №. supp01. – С. 98-105.
29. Scandale W. et al. First results on the SPS beam collimation with bent crystals //Physics Letters B. – 2010. – Т. 692. – №. 2. – С. 78-82.
30. Scandale W. et al. Observation of channeling for 6500 GeV/c protons in the crystal assisted collimation setup for LHC //Physics Letters B. – 2016. – Т. 758. – С. 129-133.
31. Афонин А. Г. и др. Коллимация циркулирующего пучка в синхротроне У-70 с помощью отражения частиц в кристаллах с осевой ориентацией //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2011. – Т. 93. – №. 4. – С. 205-208.
32. Scandale W. et al. Deflection of high energy protons by multiple volume reflections in a modified multi-strip silicon deflector //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2014. – Т. 338. – С. 108-111.
33. Бирюков В. М., Котов В. И., Чесноков Ю. А. Управление пучками заряженных частиц высоких энергий при помощи изогнутых монокристаллов //Успехи физических наук. – 1994. – Т. 164. – №. 10. – С. 1017-1040.
34. Biryukov V. M., Chesnokov Y. A., Kotov V. I. Crystal channeling and its application at high-energy accelerators. – Springer Science & Business Media, 2013.
35. Moliere G. Theorie der streuung schneller geladener teilchen i. einzelstreuung am abgeschirmten coulomb-feld //Zeitschrift für Naturforschung A. – 1947. – Т. 2. – №. 3. – С. 133-145.; Moliere G. Theorie der streuung schneller geladener

- teilchen ii mehrfach-und vielfachstreuung //Zeitschrift für Naturforschung A. – 1948. – T. 3. – №. 2. – C. 78-97.
36. Bak J. F. et al. Detailed investigation of the channeling phenomena involved in bending of high-energy beams by means of crystals //Nuclear Physics B. – 1984. – T. 242. – №. 1. – C. 1-30.
 37. Baker S. I. et al. Deflection of charged particles in the hundred GeV regime using channeling in bent single crystals //Physics Letters B. – 1984. – T. 137. – №. 1-2. – C. 129-134;
 38. Gibson W. M. et al. Deflection of high energy channeled charged particles by elastically bent silicon single crystals //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1984. – T. 2. – №. 1-3. – C. 54-59.;
 39. Baker S. I. et al. First operation with a crystal septum to replace a magnet in a charged particle beam //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1985. – T. 234. – №. 3. – C. 602-605.;
 40. Baker S. I. et al. Deflection of an 800 GeV particle beam using channeling //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1986. – T. 248. – №. 2-3. – C. 301-308.
 41. Бирюков В. М., Галяев Н. А. и др. Измерение длин деканалирования протонов с энергией 70 ГэВ в кристаллах кремния ориентации (110) и (111). Препринт ИФВЭ 92-156. Протвино 1992.
 42. Scandale W. et al. Dechanneling of high energy particles in a long bent crystal //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2019. – T. 438. – C. 38-41.
 43. Taratin A. M. et al. Computer simulation of multibeam extraction from accelerators by bent crystals //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1991. – T. 58. – №. 1. – C. 103-108.

44. Biryukov V. Computer simulation of crystal extraction of protons from a large-hadron-collider beam //Physical review letters. – 1995. – Т. 74. – №. 13. – С. 2471.
45. <https://debian.org/>
46. <https://qt.io/>
47. Афонин А. Г., ..., **Решетников С. Ф.** и др. Развитие аппаратно-программных средств системы медленного вывода с использованием кристаллических дефлекторов на синхротроне У-70 // Препринт НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ 2017-3, Протвино, 2017.
48. Максимов А. В. Разработка, создание и ввод в эксплуатацию магнитооптической структуры и системы многооборотного быстрого вывода протонного радиографического комплекса на энергию 50÷70 ГэВ на базе синхротрона У-70 // Диссертация на соискание степени кандидат физико-математических наук, НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, Протвино, 2017.
49. Брюнетон К., и др. Поляризация в упругом рассеянии π^+ -, K^+ -мезонов и протонов на протонах при импульсе 45 ГэВ/с // ПТЭ 1976, № 5, с. 46-51.
50. Raoul J. C. et al. Apparatus for simultaneous measurements of the polarization and spin-rotation parameters in high-energy elastic scattering on polarized protons //Nuclear Instruments and Methods. – 1975. – Т. 125. – №. 4. – С. 585-597.
51. Гридасов В. И., Мызников К. П., Чепегин В. Н. Эффективность внутренних мишеней ускорителя ИФВЭ на 70 ГэВ. Ж. техн. физ., – 1974. – Т. 44 № 7 – С. 1477–1483.
52. Bugorsky A. P. et al. Extraction of a 70-GeV/cProton Beam to the RAMPEX Setup by Using a Silicon Crystal //Instruments and Experimental Techniques. – 2001. – Т. 44. – №. 1. – С. 1-11.
53. Strokov S. et al. Steering beam of charged particles using Silicon crystals //Journal of the Physical Society of Japan. – 2007. – Т. 76. – №. 6. – С. 064007.

54. Jung R., Ferioli G., Hutchins S. Single pass optical profile monitoring. – 2003. – №. CERN-AB-2003-064-BDI.
55. Degtyarev I. I., Liashenko O. A., Yazynin I. A. Applications of Coupled SCRAPER-RTS&T Code in Radiation Therapy //Proc. of EPAC. – 2000. – С. 2506-2508.
56. Афонин А. Г., Федотов Ю. С., Чесноков Ю. А., Язынин И. А. О возможности вывода ускоренного пучка легких ионов в направлении 18 канала при помощи изогнутого кристалла // Доклад на международном совещании «Взаимодействие легких ядер с ионами». - Протвино, 2006.
57. Афонин А. Г., Котов В. И., Маишеев В. А., Максимов А. В., Язынин И. А. Развитие системы медленного вывода пучка с помощью изогнутых кристаллов применительно к выводу ионов // Рабочее совещание по проблемам взаимодействия легких ионов с ядрами. Протвино, 2008. // URL /ihp/doc_seminar/LINC-2008/linc_2008.html/.
58. Ivanov Y. M. et al. Volume reflection of a proton beam in a bent crystal //Physical review letters. – 2006. – Т. 97. – №. 14. – С. 144801.
59. Scandale W. et al. High-efficiency volume reflection of an ultrarelativistic proton beam with a bent silicon crystal //Physical review letters. – 2007. – Т. 98. – №. 15. – С. 154801.
60. Chesnokov Y. A. et al. Modern success in channeling study and applications at the U-70 accelerator of IHEP //arXiv preprint arXiv:1110.3580. – 2011.
61. Afonin A. G. et al. Use of particle reflection in curved crystals to improve beam collimation in a ring accelerator //Atomic Energy. – 2009. – Т. 106. – №. 6. – С. 409-414.
62. Afonin A. G. et al. Investigation of the focusing of a 50-GeV proton beam using a new crystal device //JETP letters. – 2012. – Т. 96. – №. 7. – С. 424-426.
63. Biryukov V. M. On the theory of proton beam multiturn extraction with bent single crystals //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1991. – Т. 53. – №. 2. – С. 202-207.

64. Afonin A. G. et al. Crystal undulator experiment at IHEP //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2005. – Т. 234. – №. 1-2. – С. 122-127.
65. Ардашев Е. Н. и др. Электроника считывания с кремниевых микрополосковых детекторов спектрометра СВД // Приборы и техника эксперимента. — 2007. — № 5. — С. 75–83.
66. Авдейчиков В. В. и др. Спектрометр с вершинным детектором для экспериментов на ускорителе ИФВЭ //Приборы и техника эксперимента. – 2013. – №. 1. – С. 14-14.
- 67.Абрамов В.В. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1992. Т. 35. № 6. С. 75. 2.
68. Абрамов В.В. Спиновая физика при взаимодействии адронов высоких энергий // Препринт ИФВЭ. 2004–13, Протвино 2004.
69. Glatte A. et al. Liquid argon calorimeter performance at high rates //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2012. – Т. 669. – С. 47-65.
70. Abramov V. V. et al. Conceptual Design of the SPASCHARM Experiment //Physics of Particles and Nuclei. – 2023. – Т. 54. – №. 1. – С. 69-184.
71. Abramov V. V. et al. Study of single-spin asymmetries with polarized target at the SPASCHARM experiment at U70 accelerator //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 798. – №. 1. – С. 012096.
72. Semenov P. A., Spascharm Collaboration. Detectors of the SPASCHARM Experiment at U-70 Accelerator //Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Т. 86. – №. 5. – С. 817-821.
73. Ivanov S. V., Proc. RUPAC 2012, Saint-Petersburg, Russia (2012), Advances of light-ion acceleration program in the U-70, p. 120,
URL <https://proceedings.jacow.org/rupac2012/papers/wecch01.pdf>
74. Bitukov S. I. et al. Observation of a resonance with mass $M= 1814$ MeV, decaying into $\pi^- \eta \eta$ //Physics Letters B. – 1991. – Т. 268. – №. 1. – С. 137-141.

75. Антонов Н. Н. и др. Установка СПИН на У-70. Описание аппаратуры // Приборы и техника эксперимента, 2022, № 5, с. 43-57.
76. Ivanov S. V., Lebedev O. P. Attaining square-wave stochastic slow extraction spills from the U-70 synchrotron // Instruments and Experimental Techniques. – 2015. – Т. 58. – №. 4. – С. 456-464.
77. Belzer L. I. et al. Deflection of a beam of relativistic carbon nuclei with a momentum 53-gev/c by a bent silicon crystal // JETP LETTERS-USSR. – 1987. – Т. 46. – С. 381-383.
78. Arduini G. et al. Deflection and extraction of Pb ions up to 33 TeV/c by a bent silicon crystal // Physical Review Letters. – 1997. – Т. 79. – №. 21. – С. 4182.
79. Scandale W. et al. Comparative results on collimation of the SPS beam of protons and Pb ions with bent crystals // Physics Letters B. – 2011. – Т. 703. – №. 5. – С. 547-551.
80. Адо Ю. М. и др. Развитие каналов частиц на ускорителе ИФВЭ // Препринт ИФВЭ. – 1985-182, 1985, Серпухов: ИФВЭ.
81. Абрамов В. В. и др. Экспериментальная установка СПАСЧАРМ для исследования спиновых эффектов в адронных взаимодействиях на ускорительном комплексе У-70 // Приборы и техника эксперимента. – 2024. – №. 6. – С. 4-21.
82. Abramov V. V. et al. The polarized proton and antiproton beam project at U-70 accelerator // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2018. – Т. 901. – С. 62-68.
83. Barnyakov A. Y. et al. R&D status of FARICH option for PID // International Journal of Modern Physics A. – 2024. – Т. 39. – №. 26n27. – С. 2442012.
84. Bellucci S. et al. Volume reflection and volume capture of ultrarelativistic particles in bent single crystals // Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams. – 2015. – Т. 18. – №. 11. – С. 114701.

85. Andreev V. A. et al. Experimental observation of volume capture by a curved single crystal in the channeling regime// JETP Lett. – 1982. – T. 36. – №. 9. – C. 415-419.
86. Chesnokov Y. A. et al. 70 GeV proton volume capture into channeling mode with a bent Si single crystal //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1992. – T. 69. – №. 2-3. – C. 247-252.
87. Maisheev V. A. Volume capture of positive charged particles in bent single crystals //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2025. – T. 1077. – C. 170487.
88. Scandale W., Taratin A. M. Channeling and volume reflection of high-energy charged particles in short bent crystals. Crystal assisted collimation of the accelerator beam halo //Physics Reports. – 2019. – T. 815. – C. 1-107.
89. Vasil'eva A. G. et al. Volume Capture into Channeling in a Weakly Bent Crystal //JETP Letters. – 2025. – T. 122. – №. 1. – C. 8-11.
90. Рязанцев А. В. и др. Сцинтилляционный волоконный годоскоп эксперимента СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70 //Приборы и техника эксперимента. – 2023 – № 4, С. 48–54.
91. Fedotov Y. S. et al. Slow Extraction System From IHEP Accelerator U-70 Status And Development //transfer. – 2004. – T. 110. – №. 106. – C. 12.
URL <https://proceedings.jacow.org/r04/papers/TUCO03.PDF>
92. Velotti F. M. et al. Septum shadowing by means of a bent crystal to reduce slow extraction beam loss //Physical Review Accelerators and Beams. – 2019. – T. 22. – №. 9. – C. 093502.
93. Nagaslaev V. et al. Feasibility of using crystal channeling for the beam loss mitigation in slow extraction at 8GeV //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2024. – T. 1058. – C. 168892.

94. Taratin A. M., Vorobiev S. A. “Volume reflection” of high-energy charged particles in quasi-channeling states in bent crystals // *Physics Letters A*. – 1987. – Т. 119. – №. 8. – С. 425-428.
95. Maisheev V. A. Volume reflection of ultrarelativistic particles in single crystals // *Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams*. – 2007. – Т. 10. – №. 8. – С. 084701.
96. Маишеев В. А., Чесноков М. Ю. Управление траекториями положительно и отрицательно заряженных частиц с помощью отражения на цепочке изогнутых монокристаллов // *Журнал технической физики*. – 2020. – Т. 90. – №. 5. – С. 856-861.
97. Sorriaux J. et al. Evaluation of Gafchromic® EBT3 films characteristics in therapy photon, electron and proton beams // *Physica Medica*. – 2013. – Т. 29. – №. 6. – С. 599-606.