

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

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Протвино-2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Научный руководитель: **Чесноков Юрий Андреевич**

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт»-ИФВЭ, Протвино

Официальные оппоненты: **Сыресин Евгений Михайлович**

доктор физико-математических наук, профессор, главный инженер установки Ускорительный комплекс Коллайдера НИСА, Международная межправительственная научно-исследовательская организация Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Савченко Александр Алексеевич

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики конденсированных сред (№67) института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Защита диссертации состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета 75.2.005.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по адресу: 142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ и на сайте www.ihep.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, д. 1, ученому секретарю диссертационного совета 75.2.005.01.

Автореферат разослан _____ 2026

Ученый секретарь

диссертационного совета 75.2.005.01,

доктор физ.-мат. наук

Мочалов Василий Вадимович

Общая характеристика диссертации

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 промышленности: 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.

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.

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, СПАС-ЧАРМ, 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.

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. **С.Ф. Решетников**, А.Г. Афонин, Е.В. Барнов, А.Н. Васильев, В.А. Майшеев, В.В. Мочалов, П.А. Семенов, Ю.А. Чесноков: X Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2024» НИЯУ МИФИ, г. Москва, (26 – 29) марта 2024.

3. **С.Ф. Решетников**, А.Г. Афонин, Е.В. Барнов, А.Я. Левин, Ю.А. Чесноков // 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. **С.Ф. Решетников**, А.Г. Васильева, А.А. Дурум, М.Ю. Костин, В.А. Маишеев, Е.В. Парменова, И.В. Полуэктов, Ю.Е. Сандомирский, Ю.А. Чесноков, А.А. Янович // 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, входящих в перечень ВАК и индексируемых в базах данных Scopus и WoS.

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 [**Reshetnikov S.F.** et al. Unified Crystal Station at U-70 Accelerator //Physics of Atomic Nuclei. – 2025. – Т. 88. – №. 10. – С. 1957-1964, doi: 10.1134/s1063778825090546]
2. **Решетников С.Ф.** и др. Вывод пучка протонов варьированной интенсивности из ускорителя У-70 с помощью изогнутых кристаллов //Ядерная физика и инжиниринг. – 2025. – Т. 16. – №. 1. – С. 80-86, doi: 10.56304/S2079562924060307 [**Reshetnikov S.F.** et al. Extraction of a Proton Beam of Variable Intensity from the U-70 Accelerator Using Bent Crystals //Physics of Atomic Nuclei. – 2024. – Т. 87. – №. 10. – С. 1455-1461, doi: 10.1134/s1063778824090291]
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 [**Reshetnikov S.F.** et al. Production of a Charged Hadron Beam in the Momentum Range of 2–13 GeV/c at the U-70 Accelerator //Physics of Atomic Nuclei. – 2025. – Т. 88. – №. 12. – С. 2534-2539, doi: 10.1134/s1063778825110043]
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 [Afonin A.G.,..., **Reshetnikov S.F.**, et al. New Crystal Devices for Use at the U-70 Accelerator //JETP letters. – 2021. – Т. 113. – №. 4. – С. 226-230, doi: 10.1134/s002136402104007X]
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 [Afonin A.G.,..., **Reshetnikov S.F.**, et al. Extraction of the carbon ion beam from the U-70 accelerator into beamline 4a using a bent single crystal //Instruments and Experimental Techniques. – 2016. – Т. 59. – №. 4. – С. 497-500, doi: 10.1134/s002044121603012X]
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

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 и деканалирования прямом и изогнутом кристалле [1], представлен принцип работы эффективного вывода ускоренных частиц с применением изогнутых кристаллов [1]. Описаны методы изгиба кристаллических устройств [1-4]. Важнейшими параметрами для каналирования являются:

– вероятность захвата в каналирование в прямом кристалле η_0

$$\eta_0 = \frac{\pi x_c \Psi_c}{2d\varphi} \quad (1)$$

где Ψ_c – критический угол каналирования, φ – угловая расходимость пучка, падающего на кристалл, d – межплоскостное расстояние.

– вероятность захвата в каналирование в изогнутом кристалле η

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

где $(pv)_c$ – критическая энергия

– длина деканалирования в прямом кристалле L_d^0

$$L_d^0 = \frac{256}{9\pi^2} \frac{pv}{\ln\left(2E_0\gamma/I\right) - 1} \frac{a_{\text{ТФ}}d}{Z_i r_e E_0} \quad (3)$$

где $a_{\text{ТФ}}$ – радиус экранирования Томаса-Ферми, $E_0 = 0.511$ МэВ – энергия покоя электрона, r_e – радиус электрона, Z_i – заряд каналируемой частицы, I – ионизационный потенциал (для кремния 172 эВ)

– длина деканалирования в изогнутом кристалле L_d

$$L_d \sim pv \left(1 - \frac{pv}{(pv)_c}\right)^2 \quad (4)$$

– критический радиус каналирования R_c

$$R_c = \frac{pv}{U'(x_c)} \quad (5)$$

– вероятность захвата частиц в каналирование при многообратном проходе через кристалл P

$$P = \sum_{K=1}^N P_K = F_1 W + \sum_{K=2}^N F_K W^K \prod_{m=1}^{K-1} (1 - F_m) \quad (6)$$

где $F_1 W$ – доля выведенных частиц при первом прохождении кристалла.

Вторая глава посвящена разработке, созданию, внедрению и масштабированию унифицированной станции кристаллических дефлекторов (СКД) на ускорителе У-70, а также автоматизированной системы управления этой станцией. Дано подробное техническое описание систем и представлены результаты их эксплуатации в сеансах на У-70. Станции кристаллических дефлекторов, которые ранее использовались на У-70, не были унифицированы: они различались по конструкции, техническим параметрам и системам управления. Также в процессе их эксплуатации были выявлены определенные недостатки. Такие 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. Унифицированная станция кристаллических дефлекторов лишена прежних недостатков. На рис. 1 показана унифицированная СКД30, предназначенная для деления пучка,

и представлены изображения пучков, выведенных с помощью унифицированных СКД (на комплексе ПРГК-100 и в канале № 22).

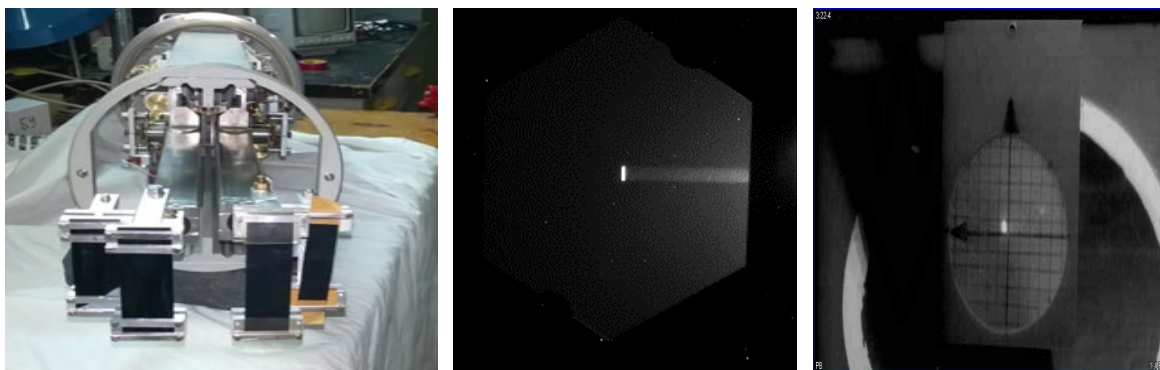


Рис. 1 – Унифицированная СКД30 с установленными кристаллами (кристаллическими сплиттерами) и фото пучков, выведенных с помощью унифицированных СКД

Создание унифицированной станции кристаллических дефлекторов новой конструкции обеспечило улучшение технических характеристик, позволило размещать на СКД резервный рабочий кристалл или кристалл с другими параметрами, детерминировало 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 надёжности 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 У-70.

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

В первом разделе третьей главы рассматривается экспериментальное исследование эффективности вывода пучка протонов кристаллом в зависимости от угла изгиба, проведенное на

ускорителе У-70. Приведены результаты измерения эффективности вывода для четырёх кристаллов, изогнутых на 36, 64, 100 и 135 мрад соответственно. Проведено сравнение полученных данных с результатами компьютерного моделирования [5]. Полученные в ходе экспериментов результаты, а также ранее опубликованные данные [1,3], представлены на рис. 2.

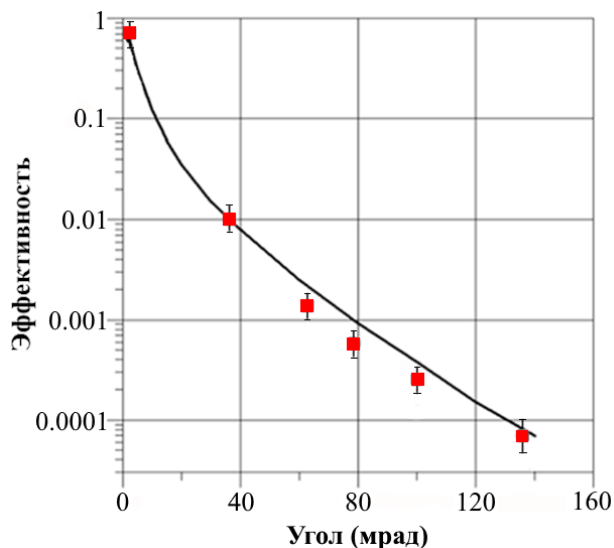


Рис. 2 – Зависимость эффективности вывода пучка протонов из У-70 от угла изгиба кристалла. Точки – эксперимент, кривая – расчет по программе СКРЕПЕР

Установленные зависимости эффективности вывода пучка кристаллом от угла его изгиба носят универсальный характер и применимы не только к ускорителю У-70. Эти результаты отражают общую закономерность, характерную для широкого спектра ускорителей и коллайдеров, с учетом допустимых вариаций, обусловленных спецификой конфигурации кристаллов и параметрами конкретных ускорительных комплексов.

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 настоящее время на У-70 реализованы разнообразные режимы вывода пучка, основанные на использовании изогнутых кристаллов и сопутствующего аппаратного обеспечения. Данные режимы применяются как для непосредственного вывода пучка, так и для проведения экспериментальных исследований новых кристаллических устройств и изучения механизмов коллимации пучка. На сегодня в ускорителе У-70 функционирует 12 станций кристаллических дефлекторов, оснащенных различными кристаллическими элементами. На рис. 3 приведена схема размещения унифицированных станций кристаллических дефлекторов на периметре ускорителя У-70, там же продемонстрированы образцы различных типов кристаллических дефлекторов, применяемых для вывода пучков заряженных частиц. Один из способов использования изогнутых кристаллов – прямой вывод протонов с помощью кристалла из вакуумной камеры ускорителя.

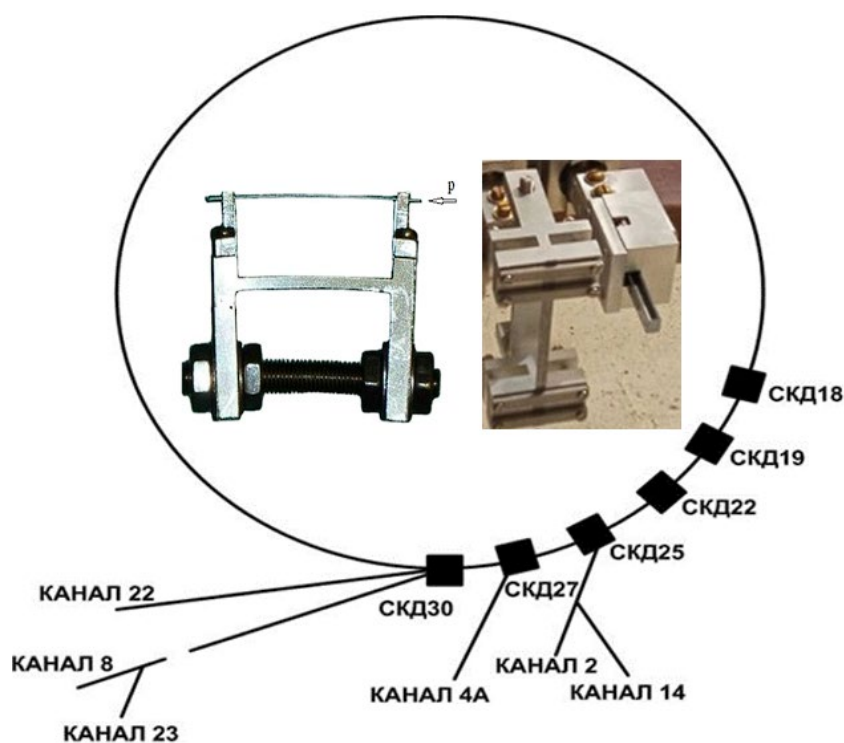


Рис.3 – Расположение унифицированных СКД на периметре У-70, а также типы кристаллических дефлекторов (слева – длинный кристалл, справа – короткие кристаллы (полосковый и О-образный))

В этом случае используются длинные кристаллы (технология изготовления таких кристаллов базируется на конструкции, использующей метод моментов четырехточечного изгиба), которые позволяют получать большие углы отклонения, сравнимые с θ_{max} (максимальный угол отклонения), для направления пучка из ускорителя в канал транспортировки пучка. На ускорителе У-70 есть три такие станции (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, 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} . Использование данных кристаллов позволяет организовать параллельный вывод пучка на плато магнитного цикла ускорителя У-70. В качестве примера можно привести конфигурацию (см. рис. 4), 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.

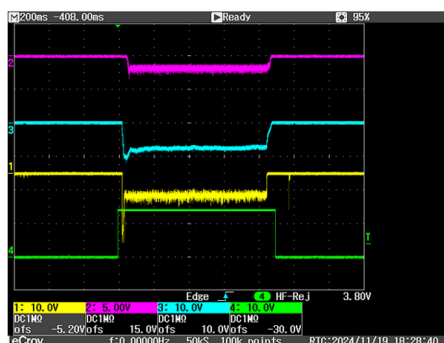


Рис. 4 – Сигналы мониторов пучка при работе установок Гиперон, СПАСЧАРМ и ИСТРА-КРИСТАЛЛ. Розовый луч – сигнал монитора пучка, расположенного в районе внутренней мишени в 35 м блоке У-70; голубой луч – сигнал монитора пучка, расположенного в районе СКД25; желтый луч – сигнал монитора пучка, расположенного в районе СКД27

Другой способ вывода пучков с помощью кристаллов заключается в использовании коротких кристаллов с малым углом отклонения, которые делятся на два типа: полосковые и О-образные. При изготовлении полоскового кристалла используется анизотропия кристаллической решетки: индуцирование продольного изгиба, вызывает поперечный изгиб, радиус которого в несколько раз превышает радиус продольного изгиба (для кристаллов с ориентацией (111) этот коэффициент составляет приблизительно 4). Технология изготовления О-образного кристалла основана на создании кристалла из монокристаллического материала в форме буквы «О». Изгиб кристалла достигается посредством компрессии его центральной части.

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. Этот режим вывода позволяет работать одновременно с внутренними мишенями (см. рис. 5).

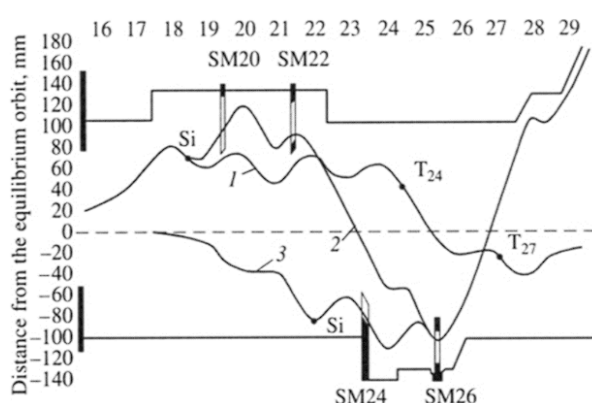


Рис. 5 – Схема высокоэффективного вывода пучка с помощью кристаллических дефлекторов. Si — кристаллические дефлекторы, SM — септум-магниты, Т — внутренние мишени, 1 — траектория циркулирующего пучка, 2 — траектория вывода с помощью СКД19, 3 — траектория вывода с помощью СКД22

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). 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% [1]).

Ещё одним методом управления пучками заряженных частиц является режим, при котором, используя кристаллический дефлектор (слабовозмущающий кристаллический сплиттер), можно осуществить деление уже выведенного пучка, отклонив небольшую его часть. Для этого режима используется унифицированная станция кристаллических дефлекторов, размещенная в прямолинейном промежутке № 30 ускорителя У-70 (см. рис. 6).

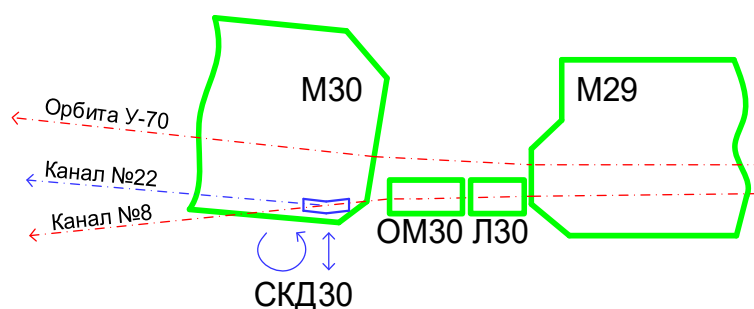


Рис. 6 – Схема отклонения пучка в канал №22 с помощью кристаллического сплиттера. СКД30 – станция кристаллических дефлекторов, ОМ30 – отклоняющий магнит, Л30 – квадрупольная линза, М29 и М30 – магнитные блоки ускорителя У-70

Установленные на ней слабовозмущающие кристаллические сплиттеры обеспечивают отклонение одной тысячной части основного пучка (типично $10^8 - 10^9$ протонов за цикл) на угол 9 мрад, с последующим направлением в каналы транспортировки № 8 или № 22. Завершают второй раздел третьей главы описание технологических аспектов изготовления слабовозмущающих кристаллических сплиттеров, методика их использования, а также анализ результатов применения этих кристаллических устройств для обеспечения работы двух экспериментальных установок в сеансах на У-70.

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 наведения пучка на кристалл и его угловой ориентации. На ускорителе У-70 была подтверждена работоспособность как длинных, так и коротких кристаллических дефлекторов в режиме оперативной модуляции интенсивности выводимого пучка в широком динамическом диапазоне.

Так для эксперимента КМН-АТЛАС по исследованию жидко-аргоновых детекторов [6] на

канале № 8 ускорительного комплекса У-70 были установлены требования к пучку частиц в диапазоне 10^6 – 10^{11} частиц/цикл. Медленный вывод пучков с такой низкой интенсивностью не обеспечивает удовлетворительную временную структуру из-за особенностей динамики процесса. Для первой фазы эксперимента СПАСЧАРМ [7] на канале № 14 [8] предъявляются еще более строгие требования к минимальной интенсивности пучка, составляющей от 10^4 до 10^7 частиц/цикл. Применение кристаллических дефлекторов позволило решить эти задачи.

Показано, что 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 (см. рис. 7). Это позволило провести исследование характеристик жидко-аргонового детектора [6].

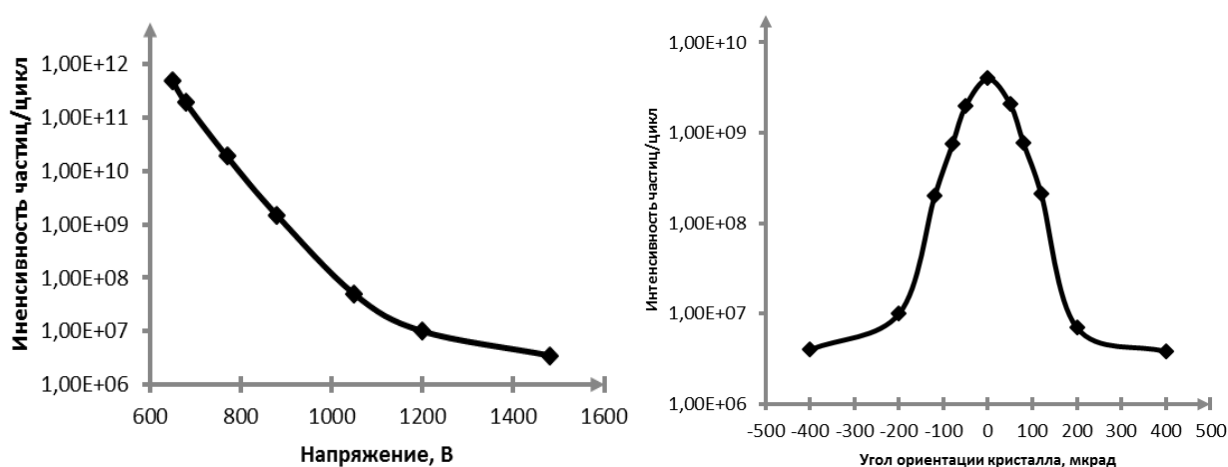


Рис. 7 – Интенсивность выведенного в канал №8 пучка в зависимости от напряжения монитора обратной связи (слева) и в зависимости от угла ориентации кристалла (справа)

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 (см рис. 8), что позволяет проводить экспериментальные исследования спиновых эффектов на установке СПАСЧАРМ при различных условиях проведения набора данных.

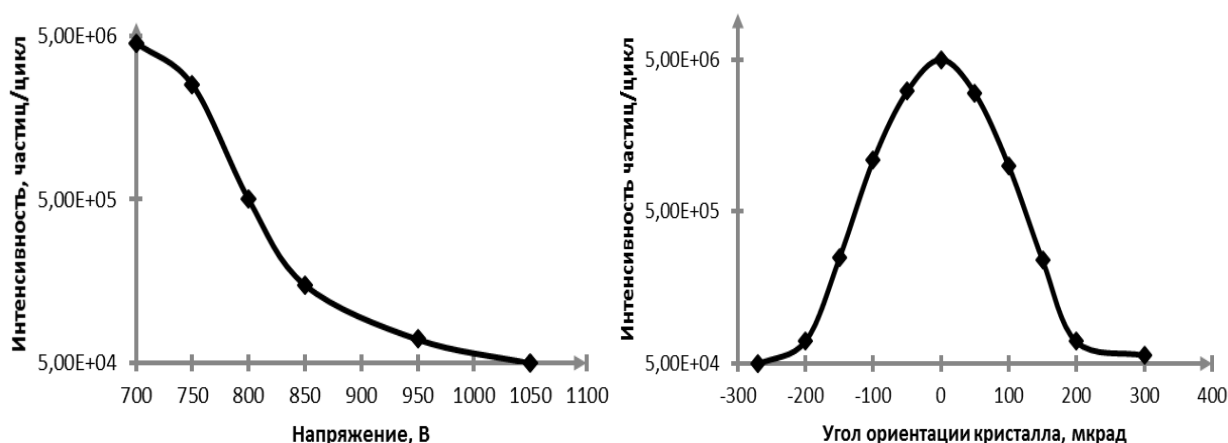


Рис. 8 – Интенсивность выведенного в канал №14 пучка в зависимости от напряжения монитора обратной связи (слева) и в зависимости от угла ориентации кристалла (справа)

Таким образом, была продемонстрирована устойчивая работа вывода пучка для двух экспериментов, где требовалась плавная регулировка интенсивности пучка в большом динамическом диапазоне. Разработанные методы позволяют варьировать интенсивность пучка в больших пределах без изменения параметров пучка, наводимого на кристалл.

В четвертом разделе третьей главы обобщаются результаты длительного использования изогнутых кристаллов для управления пучками заряженных частиц 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 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 цикл. Вывод с помощью изогнутых кристаллов демонстрирует надежный, воспроизводимый и предсказуемый результат. Пучки, полученные с помощью кристаллов, обладают низкой эмиттансностью, пространственной стабильностью по сравнению с обычными пучками и легко настраиваются в широком диапазоне интенсивностей. Следует отметить, что установленный радиационный предел для кристаллов на циркулирующем пучке составляет около $2 \cdot 10^{20}$ прот./см².

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 период с 2012 по 2016 год проводились исследования по выводу шестизарядных ионов углерода с использованием изогнутых кристаллов. В этот период было проведено четыре сеанса ускорения ионов, в ходе которых тестировались различные методы вывода и типы кристаллов. В 2012 году был успешно ускорен пучок ионов углерода до 25 ГэВ/нуклон с интенсивностью до $5 \cdot 10^9$ нуклонов за цикл. Этот пучок, выведенный с помощью кристаллического дефлектора, установленного на СКД22 и направленный на установку ФОДС [9,10], стал первым ионным пучком, полученным экспериментальной установкой на У-70. Эффективность вывода составила примерно 60%, что определялось стандартными методами диагностики и активационным методом. Значительный прорыв в исследованиях был достигнут в начале 2016 года, когда на У-70 был успешно сформирован пучок ядер углерода с высокой энергией (20 ГэВ/нуклон) и пиковой интенсивностью до $7 \cdot 10^9$ ионов за цикл.

В ходе этого сеанса были проведены эксперименты с кристаллическими станциями СКД19, СКД27 и СКД30. Ионный пучок был направлен в каналы, соответствующие потребностям установок: № 22 для ФОДС (см. рис. 9 (слева)), №№ 4А и 4 для ИСТРА-КРИСТАЛЛ (см. рис. 9 (справа)) и ВЕС [11], № 8 для СПИН [12]. Были разработаны и реализованы различные

конфигурации систем вывода пучка на плато магнитного цикла (см. рис. 10), что позволило одновременно задействовать несколько физических установок. Установки ФОДС, СПИН и ВЕС получили возможность приступить к новаторским исследованиям в области релятивистской ядерной физики.).

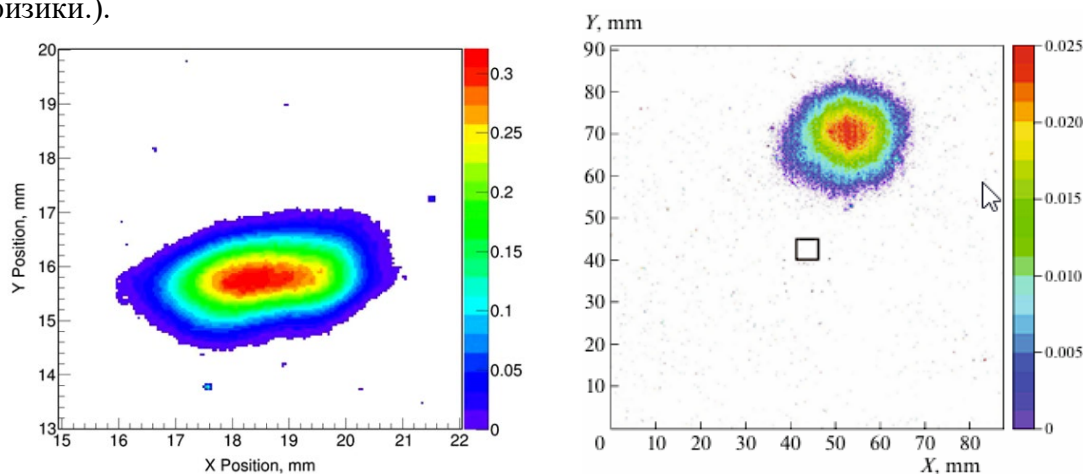


Рис. 9 – Изображение распределения частиц в выведенном пучке шестизарядных ионов углерода (слева установка – ФОДС, справа – Истра-Кристалл)

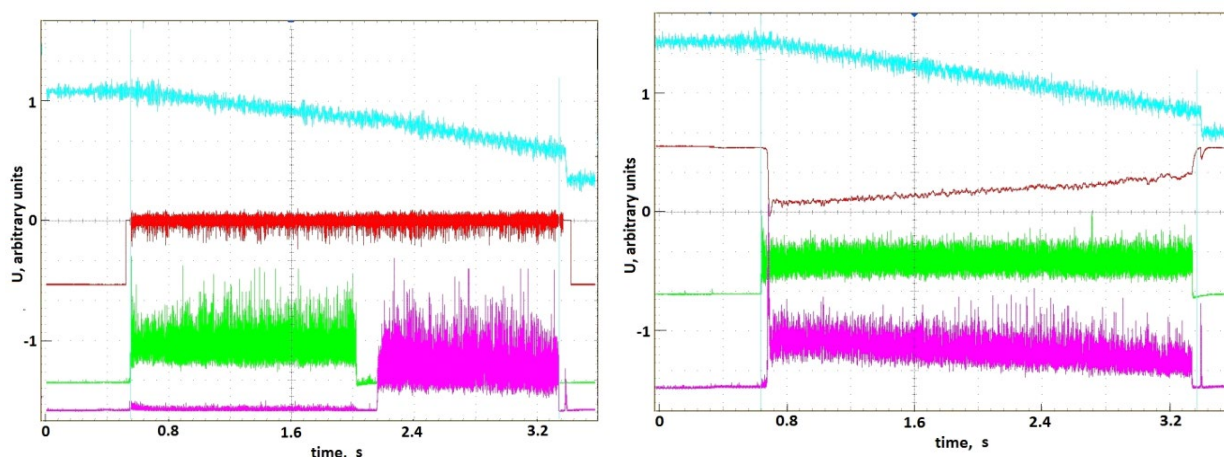


Рис. 10 – Различные конфигурации систем вывода пучка на плато магнитного цикла. Слева – Разделение пучка между СКД19 (фиолетовый луч) и СКД27 (зеленый луч). синий луч – интенсивность в У-70, красный луч – ВЧ-шум. Справа – Одновременная работа СКД19 (фиолетовый луч) и СКД27 (зеленый луч), синий луч – интенсивность У-70

Состав пучка измерялся в его центре по ионизационным потерям в тонком сцинтилляторе. Результаты представлены на рис. 11 (слева). Ионы с различными зарядами идентифицировались по квадратичной зависимости ионизационных потерь. Очевидно, что пик углерода с зарядом 6 доминирует (около 80%). По результатам исследований получены сравнительные характеристики вывода с помощью изогнутых кристаллов протонов и ядер углерода (см. рис.11 справа).

В результате этих экспериментов 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 приемлемыми параметрами — интенсивностью, размерами, временной структурой и составом пучка.

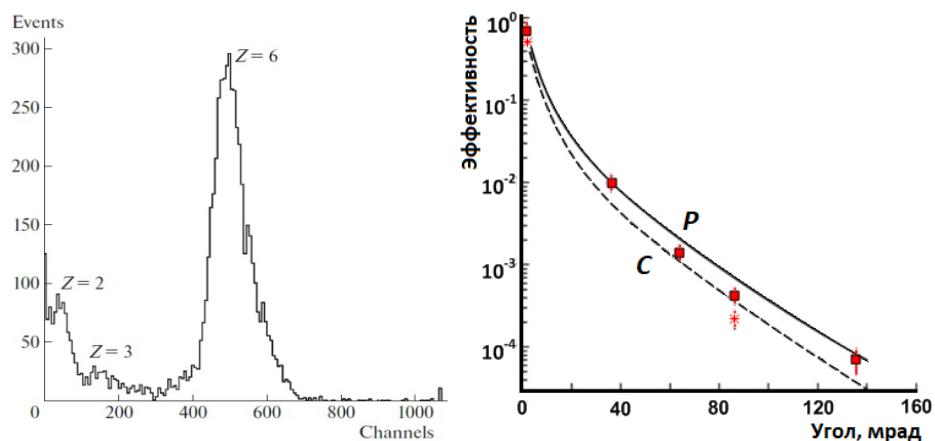


Рис. 11 – Слева – состав выведенного ионного пучка. Справа – эффективность вывода циркулирующих пучков протонов (р) и углерода (С) с помощью кристаллов в зависимости от угла отклонения. Результаты расчетов представлены кривыми, сплошные точки обозначают экспериментальные значения для протонов, а звездочки—экспериментальные значения для углерода

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 1,4–13 ГэВ/с в канале вторичных частиц № 14 на ускорительном комплексе У-70.

Экспериментальная установка СПАСЧАРМ предназначена для исследования спиновых эффектов при рождении множества элементарных частиц и резонансов в адрон-адронных столкновениях на ускорительном комплексе У-70, она расположена на канале № 14. Основной пучок, на котором работает СПАСЧАРМ, состоит из отрицательно заряженных адронов с импульсами не ниже 23 ГэВ/с. Можно также получить электронные пучки с импульсами 18–32 ГэВ/с и использовать первичный протонный пучок с интенсивностью 10^6 – 10^7 частиц за цикл. Текущие режимы работы позволяют получать нужные пучки для сбора физических данных, однако для дальнейшего развития установки и проведения методических измерений требуются пучки частиц с более низкими импульсами (2–13 ГэВ/с), включая положительно заряженные. Эти пучки необходимы в первую очередь для методических исследований детекторов частиц. Предложен метод генерации таких пучков. Метод основан на использовании дополнительной мишени, установленной в головной части канала (см. рис. 12) на пути интенсивного пучка протонов.

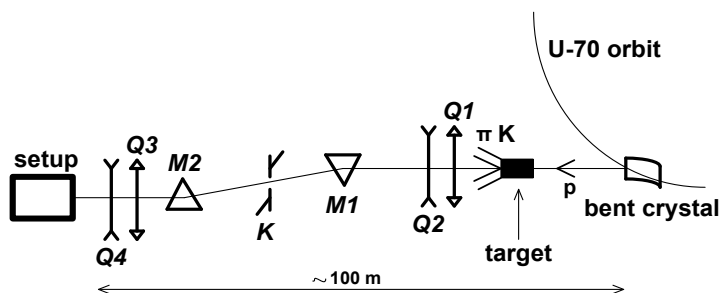


Рис. 12 – Принципиальная схема получения вторичного пучка отрицательных частиц. Q1- Q4 квадрупольные линзы, M1 и M2 поворотные магниты, К – коллиматор

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. Предварительно были выполнены расчеты режимов и сделаны оценки ожидаемых интенсивностей пучка «низкоэнергетичных» адронов (см. рис. 13). Расчеты были выполнены на основе полуэмпирической формулы 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 $\pm 5\%$.

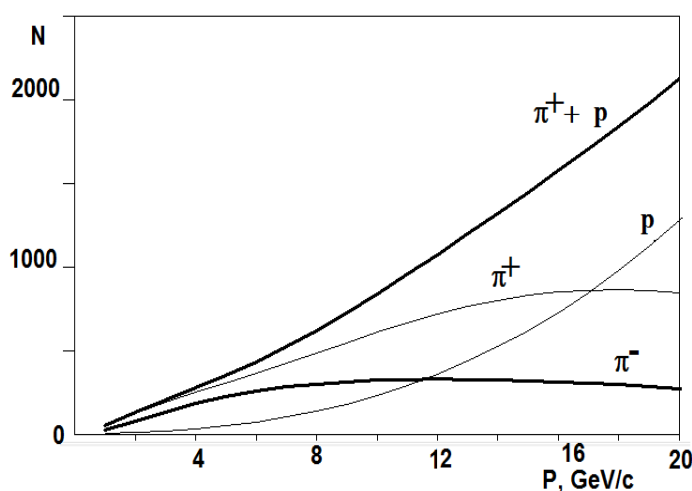


Рис. 13 – Рассчитанные интенсивности адронов генерируемых в алюминиевой мишени при наведении на нее 10^7 протонов

Экспериментальные исследования на ускорителе У-70 в 2025 году подтвердили эффективность разработанного метода получения положительно заряженных "мягких" адронов в канале № 14. Ключевым достижением является формирование пучка адронов с импульсами в диапазоне 2–13 ГэВ/с и интенсивностью, достигающей нескольких тысяч частиц, что открывает новые возможности для методических исследований на установке «СПАСЧАРМ».

В первом сеансе 2026 г. этот режим использовался для проведения исследований детектора черенковского излучения (FARICH) [13] на установке СПАСЧАРМ. На рис. 14 представлены импульсные спектры полученных пучков адронов. Исследования проводились при пяти различных импульсах (1,5,3,5,6,10) ГэВ/с. Система черенковских счетчиков на канале № 14 обеспечивала идентификацию π -мезонов, а трековый спектрометр позволял точно измерять импульс частиц. На рис. 15 представлено зарегистрированное черенковское кольцо от адронов (π/K – мезонов) с использованием разработанного метода получения пучка «низких» импульсов. Таким образом подтверждено важное практическое значение разработанного метода получения заряженных адронов «низких» импульсов для экспериментальных установок комплекса У-70. Впервые на канале № 14 удалось получить пучок положительно заряженных адронов.

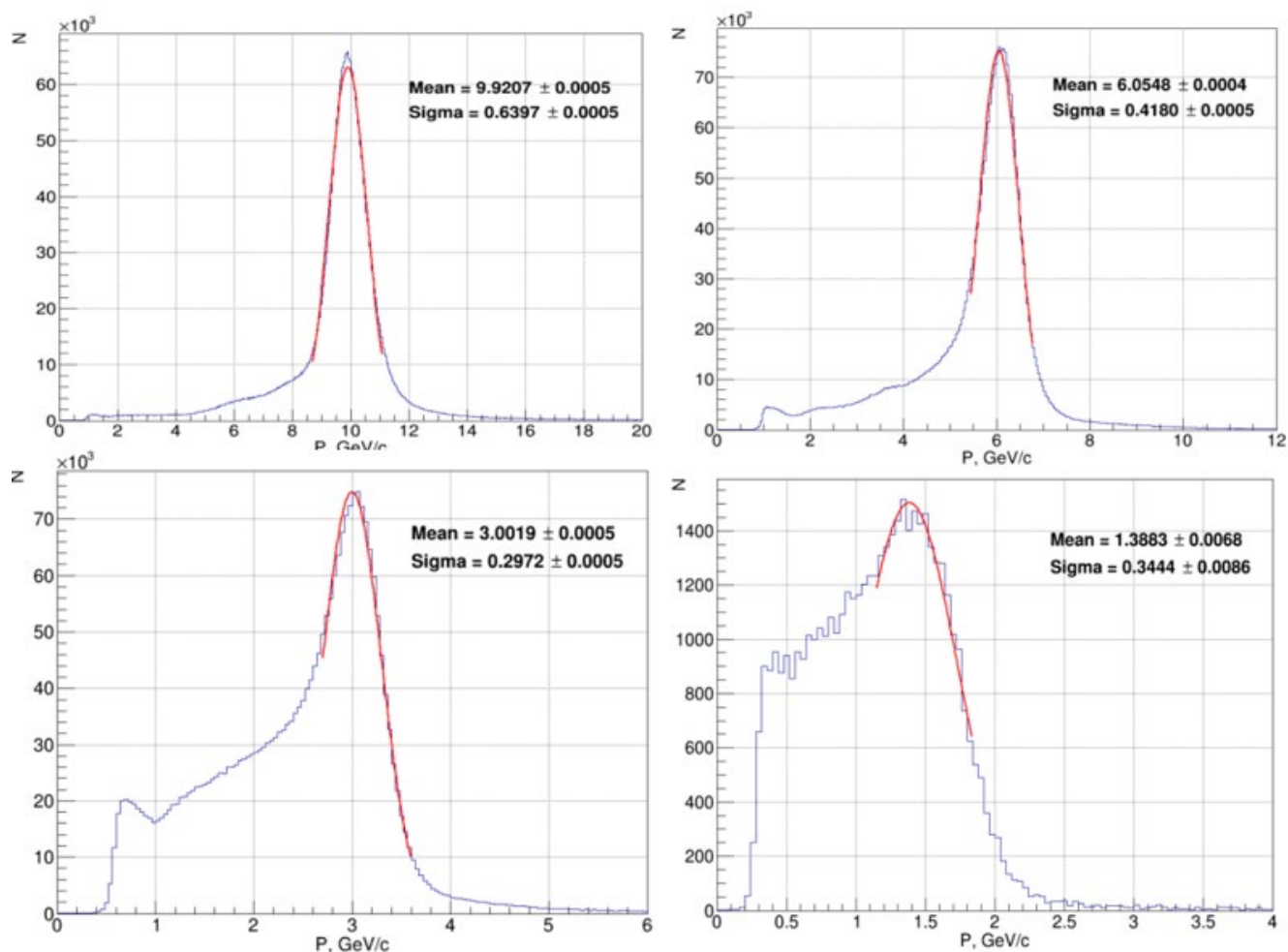


Рис. 14 – Импульсные спектры пучка при исследовании детектора черенковского излучения (FARICH)

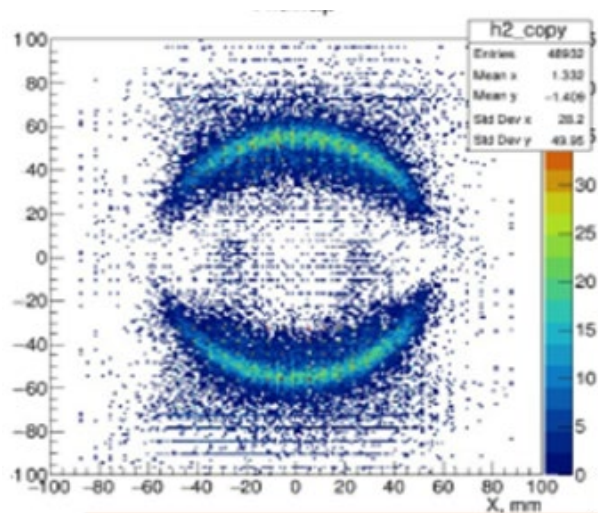


Рис. 15 – Исследование детектора колец черенковского излучения (FARICH)

Во втором разделе пятой главы рассматриваются результаты новаторского эксперимента по выводу пучка протонов из ускорителя У-70 в канал транспортировки частиц № 14 при помощи кристаллического дефлектора, с использованием явления объемного захвата в каналирование. Результатом проведенного в первом сеансе 2025 г. на У-70 экспериментального исследования

стало то, что впервые в мире удалось вывести пучок частиц из вакуумной камеры ускорителя при помощи изогнутого кристалла, используя метод объемного захвата в каналирование. Полученные значения эффективности и интенсивности выведенного пучка хорошо согласуются с теоретическими расчетами (см рис.16).

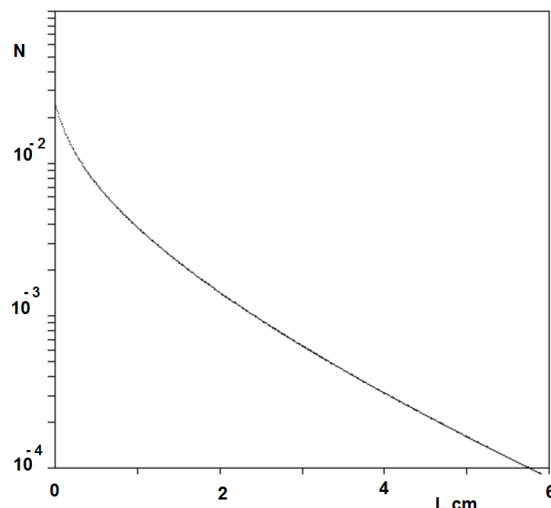


Рис. 16 – Эффективность отклонения в зависимости от длины кристалла, при объемном захвате в каналирование. Расчет выполнен согласно статье [14]

В первом сеансе 2026 г., при работе установки «СПАСЧАРМ» на пучке, выводимом с помощью кристалла, расположенного в 25 блоке У-70, в связи с нестабильностью наведения на кристалл временная структура пучка на мишени установки, выведенного с помощью стандартного метода (торцевого захвата) оказалась неравномерной (см. рис. 17 слева), что ограничивало скорость набора экспериментальных данных. Причина такого нестабильного наведения заключалась в том, что при одновременной работе кристалла и нескольких внутренних мишеней ускорителя невозможно было использовать один из бампов ускорителя, необходимый для устойчивого наведения пучка на кристаллический дефлектор, расположенный в 25 блоке У-70. Чтобы получить равномерную временную структуру было предложено попробовать метод вывода пучка с помощью объемного захвата. Временные структуры такого пучка приведены на рис. 17 справа.

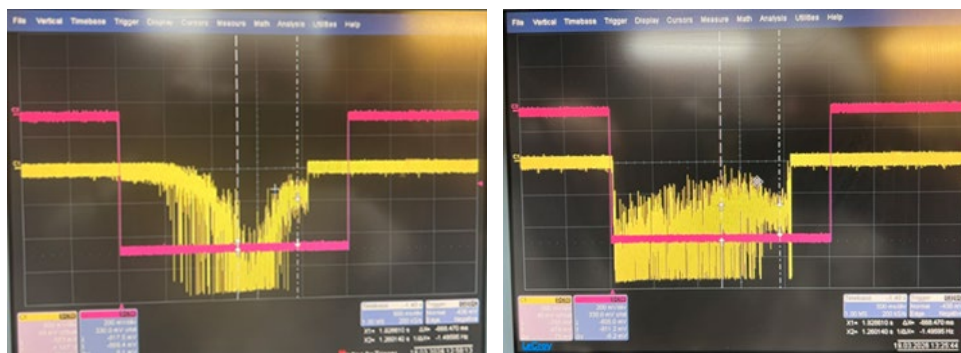


Рис. 17 – Временные структуры пучка, выведенного на мишень установки СПАСЧАРМ: слева — с помощью торцевого захвата, справа — с помощью объемного захвата

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. На рисунке 18 (слева) показан горизонтальный профиль пучка на мишени экспериментальной установки СПАСЧАРМ. Положение пучка определяется системой годоскопов экспериментальной установки СПАСЧАРМ [15], в том числе с помощью прецизионного волоконного годоскопа с разрешением около 0,2 мм [16]. 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 (см. рис.18 (справа)) 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 эксперимента 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.

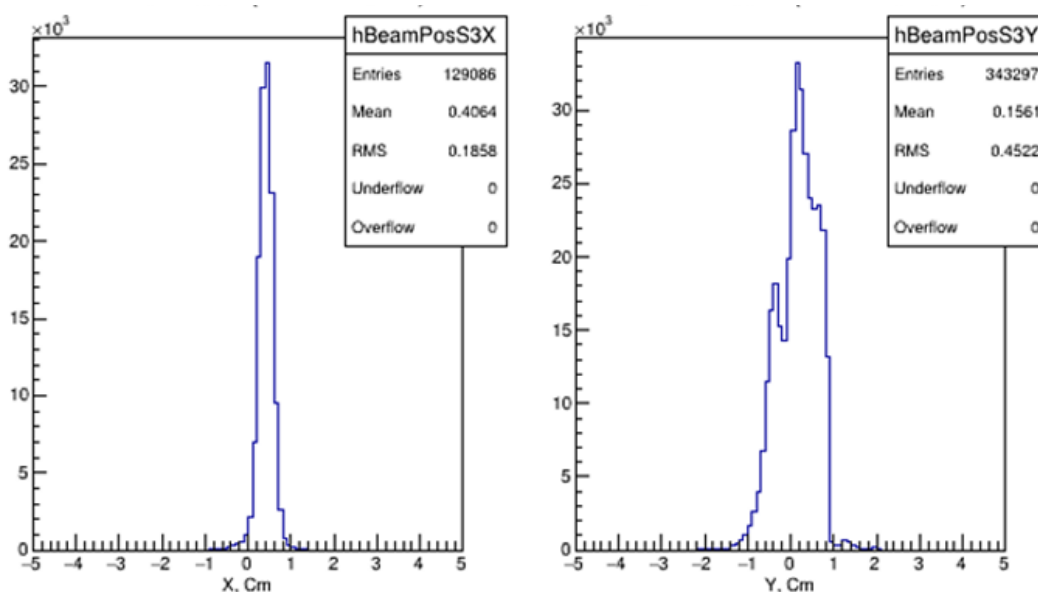


Рис. 18 – Профиль пучка протонов, выведенного кристаллом с использованием явления объемного захвата на установку «СПАСЧАРМ»

Несмотря на то, что вероятность объемного захвата несколько ниже, он обладает рядом преимуществ перед торцевым:

- Улучшается временная структура пучка.
- Повышается стабильность вывода пучка, поскольку его параметры не зависят от угла падения частиц на кристалл.

- Устраняется необходимость подстройки угла кристалла при изменении условий его наведения. После однократной настройки угла кристалла, в дальнейшем для управления выводом достаточно только линейных перемещений, что исключает необходимость постоянной корректировки угла, как при торцевом захвате.

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

Для защиты септум-магнита У-70 с токовой перегородкой 2 мм нами разработано устройство «бутерброд» (см. рис. 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. Это устройство должно отклонять значительную долю пучка в аперттуру септума с первого оборота за счет объемного отражения [17,18,19,20], увеличивая эффективность вывода. Меньшая доля пучка, порядка 10% [21], 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.

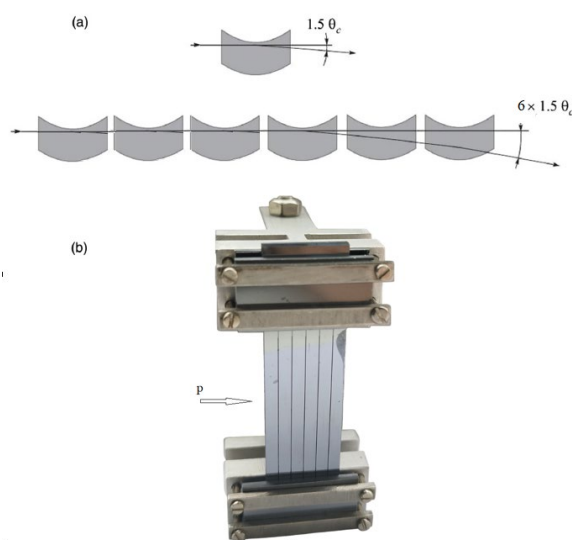


Рис. 19 а – принцип работы устройства, б – его внешний вид.

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 σ_x, σ_y 0.1 мрад и направлен на установку ИСТРА-КРИСТАЛЛ. Рисунок 20 демонстрирует возможность затенения септума кристаллическим

устройством. Как видно из рисунка, в случае ориентированного кристалла на профиле образуется большой провал, вызванный отклонением частиц за счет объемного отражения.

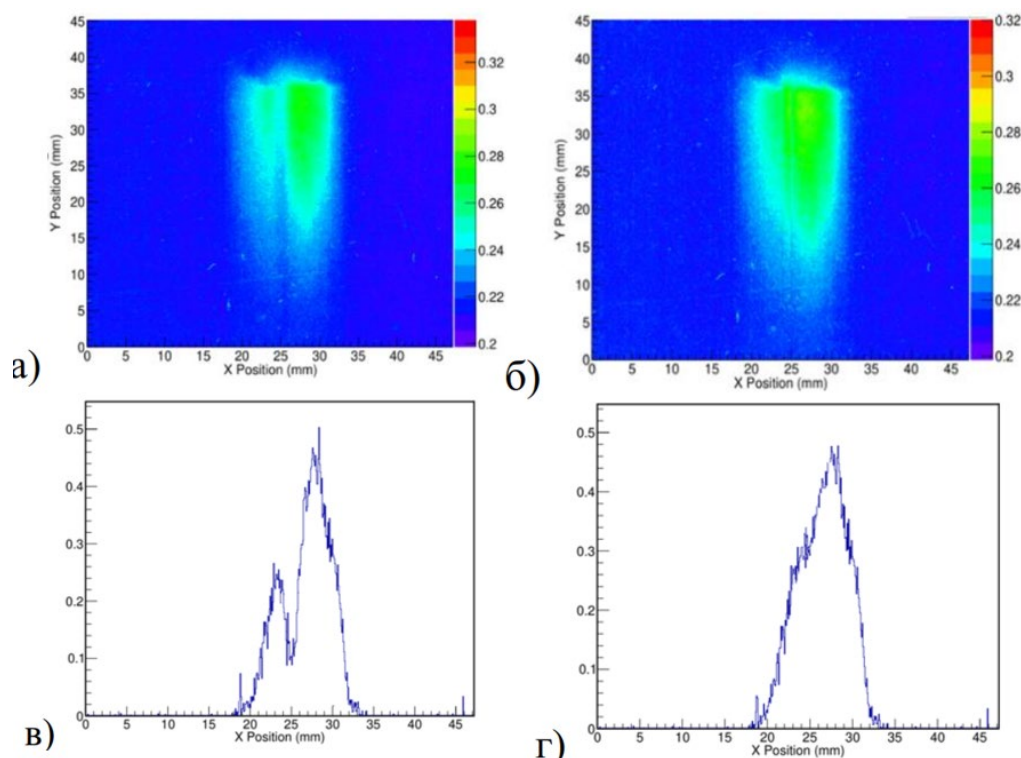


Рис. 20 – Измеренный профиль пучка через 7 метров после кристалла: а, б – 2D профиль пучка за ориентированным и разориентированным кристаллом на расстоянии 7 м (ориентированный (слева) и неориентированный кристалл (справа)). в, г – соответствующие одномерные проекции профиля по горизонтальной координате.

Коэффициент затенения при тестировании на канале частиц составил 65% (это заметно лучше, чем ранние результаты ЦЕРН – 40% [22]). 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.

В **Заключении** представлены основные результаты и основные выводы диссертационной работы.

Основные результаты:

1. 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.
2. 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 $5 \cdot 10^{-5}$.
 3. 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.
 4. Разработаны методы, позволяющие варьировать интенсивность выведенного пучка в широких пределах. На ускорительном комплексе У-70 при выводе с использованием изогнутых кристаллов получены пучки варьированной интенсивности. Для коротких кристаллов (5 мм) 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.
 5. 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).
 6. Реализовано развитие метода деления пучка между каналами № 8 и 22 слабозмущающим 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.
 7. 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.
8. 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%.
 9. 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.
 10. 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.
 11. 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 расчетам позволит увеличить эффективность медленного вывода на несколько процентов.

Основные выводы диссертационной работы:

1. 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.

2. 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.
3. 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.
4. Установлено, что короткие кристаллы кремния в пучках с интенсивностью порядка 10^{12} частиц/цикл могут работать 60 дней, а протяженные кристаллы кремния около года.
5. В ходе экспериментов показано, что изогнутые кристаллы могут направлять ионные пучки к разным установкам комплекса У-70, при этом несколько установок могут работать одновременно.
6. 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] 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.
- [2] Biryukov V. M., Chesnokov Y. A., Kotov V. I. Crystal channeling and its application at high energy accelerators. – Springer Science & Business Media, 2013.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] Abramov V. V. et al. Conceptual Design of the SPASCHARM Experiment //Physics of Particles and Nuclei. – 2023. – Т. 54. – №. 1. – С. 69-184.
- [8] 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.
- [9] Абрамов В.В. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1992. Т. 35. № 6. С. 75. 2.
- [10] Абрамов В.В. Спиновая физика при взаимодействии адронов высоких энергий // Препринт ИФВЭ. 2004–13, Протвино 2004.
- [11] Bityukov 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.
- [12] Антонов Н. Н. и др. Установка СПИН на У-70. Описание аппаратуры // Приборы и техника эксперимента, 2022, № 5, с. 43-57.
- [13] 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.
- [14] Maishev 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. – Т. 1077. – С. 170487.
- [15] Абрамов В. В. и др. Экспериментальная установка СПАСЧАРМ для исследования спиновых эффектов в адронных взаимодействиях на ускорительном комплексе У-70 //Pribory i tehnika eksperimenta. – 2024. – №. 6. – С. 4-21.
- [16] Рязанцев А. В. и др. Сцинтилляционный волоконный годоскоп эксперимента СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70 //Приборы и техника эксперимента. – 2023 – № 4, С. 48–54.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Maishev V. A. Volume reflection of ultrarelativistic particles in single crystals //Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams. – 2007. – Т. 10. – №. 8. – С. 084701.
- [20] 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.
- [21] Vasil’eva A. G. et al. Volume Capture into Channeling in a Weakly Bent Crystal //JETP Letters. – 2025. – Т. 122. – №. 1. – С. 8-11.
- [22] 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. – Т. 22. – №. 9. – С. 093502.

Автореферат отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

Решетников Сергей Федорович

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

Автореф. дис. на соискание учёной степени кандид. физ.-мат. наук

Подписано в печать 09.09.2026 Заказ №53

Цифровая печать. Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1 Тираж 60 экз.

Типография "Полиграф" ИП Исаков Александр Евгеньевич

249030, Калужская обл., г. Обнинск, пр-кт Ленина, дом 26