

ОТЗЫВ

Официального оппонента, доктора физико-математических наук Сыресина Евгения Михайловича на диссертацию Решетникова Сергея Федоровича “Развитие системы вывода циркулирующего пучка из ускорителя У-70 с помощью изогнутых кристаллов”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Актуальность темы исследований

В ускорительном комплексе ИФВЭ используется несколько методов вывода пучков из синхротрона У-70, а именно: быстрый однооборотный вывод, медленный стохастический вывод, вывод с использованием внутренних мишеней и вывод и использованием изогнутых кристаллов. 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.

Устройства с использованием изогнутых кристаллов для систем вывода эффективно используются во многих экспериментах ИФВЭ на целом ряде физических установок во время сеансов на У-70. Этот режим вывода обладает многими преимуществами и является комплементарным к перечисленным выше методам вывода пучков протонов и ионов высоких энергий.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

На ускорителе У-70 более 30 лет проводятся исследования по применению метода изогнутых кристаллов для вывода пучков протонов и ионов для исследований в области физики высоких энергий. Целью данной диссертационной работы является развитие метода вывода пучков протонов из ускорителя У-70 с помощью изогнутых монокристаллов, дальнейшее усовершенствование экспериментальной и технической базы данного метода вывода пучков, исследовании характеристик после медленного вывода пучков протонов изогнутыми кристаллами, исследовании вывода пучков ионов углерода высокой энергии из ускорителя У-70 кристаллическими дефлекторами, а также в разработке новых предложений по применению кристаллических дефлекторов на У-70 для вывода пучков в различные установки, работающие в области физики высоких энергий.

При этом автор диссертации продемонстрировал значительные возможности методы вывода на основе кристаллических устройств, прежде всего связанные с низким эмиттансом пучков, высокой пространственной стабильностью, большим динамическим диапазоном интенсивностей и легкой перестройкой системы вывода. Результаты расчетов хорошо совпадают с экспериментальными результатами, научные положения, выводы и рекомендации хорошо обоснованы.

Научная новизна исследований, полученных результатов, выводов и рекомендаций

Научная новизна связана с возможностью вывода из синхротрона пучка протонов варьируемой интенсивности в широком динамическом диапазоне с помощью изогнутых кристаллов. Впервые в мире реализован режим вывода пучка изогнутым кристаллом с использованием явления объемного захвата в каналирование. Впервые реализован и экспериментально исследован метод вывода пучков ионов углерода из синхротрона У-70 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. Разработан и внедрен метод получения пучка заряженных адронов с низкими импульсами в широком диапазоне его значений 1,4–13 ГэВ/с в канале вторичных частиц У-70 при использовании кристаллического дефлектора для вывода первичных протонов на внешнюю алюминиевую мишень. Данный диапазон импульсов пучка получен в ИФВЭ впервые.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов

Полученные в диссертации результаты имеют важное практическое значение для реализации исследований на экспериментальных установках комплекса У-70. Пучки при выводе кристаллами используются для исследований по физике высоких энергий, реализации протонной радиографии, а также формировании «карандашного» пучка ионов углерода с малым эмиттансом для ионной терапии. Бурное развитие ускорительной техники позволяет использовать пучки тяжелых заряженных частиц во многих областях науки и техники: для исследований в области физики высоких энергий и ядерной физики, в радиобиологии и радиохимии, для протонной и ионной терапии, а также в других отраслях.

На защиту автором выносятся следующие положения.

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 эффективности вывода $5 \cdot 10^{-5}$. В результате исследования тепловой и радиационной стойкости кристаллов и стабильности вывода при длительном взаимодействии с циркулирующим пучком впервые установлено, что кристаллы кремния выдерживают потоки протонов до $2 \cdot 10^{20}$ частиц/см² без деградации каналирующих свойств, нагреваясь до сотен градусов.
2. 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.
3. 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).
4. 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.
5. 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.

Общая характеристика работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения с общим объемом работы 129 страниц, 74 рисунками и 2 таблицами. В списке литературы 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, изложен личный вклад автора в работу, приведен перечень его публикаций и изложено краткое содержание диссертации.

В первой главе приведено краткое математическое описание процессов каналирования и деканалирования в прямом и изогнутом кристаллах, описаны методы изгиба кристаллических устройств и обсуждаются принципы работы и параметры изогнутых кристаллов для эффективного вывода ускоренных частиц.

Вторая глава посвящена разработке и созданию станции кристаллических дефлекторов (СКД) на ускорителе У-70, а также ее автоматизированной системы управления.

Третья глава посвящена результатам вывода пучков протонов изогнутыми кристаллами на синхротроне У-70. В начале главы обсуждаются экспериментальные результаты на ускорителе У-70 по измерению эффективности вывода пучков протонов кристаллами в зависимости от их углов изгиба. Затем приведено сравнение полученных данных с результатами компьютерного моделирования. В середине главы подробно рассмотрены кристаллические устройства, используемые для вывода заряженных частиц из ускорителя У-70. На сегодня в ускорителе У-70 функционирует 12 станций кристаллических дефлекторов, оснащенных различными кристаллическими элементами. В финальной части главы обсуждается вывод с помощью изогнутых кристаллов пучков заряженных частиц с изменяемой интенсивностью. Эта задача решается при применении кристаллических дефлекторов, имеющих возможность плавной регулировки наведения пучка на кристалл и его угловой ориентации. На У-70 подтверждена работоспособность как длинных, так и коротких кристаллических дефлекторов в режиме модуляции интенсивности выводимого пучка в широком динамическом диапазоне.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена экспериментальным исследованиям вывода ионов углерода с использованием изогнутых кристаллов из У-70. На У-70 был успешно ускорен пучок ионов углерода до 25 ГэВ/нуклон с интенсивностью до $5 \cdot 10^9$ нуклонов за цикл. Этот пучок, выведенный кристаллическим дефлектором для установки ФОДС, был первым выведенным ионным пучком, полученным экспериментальной установкой на У-70. Эффективность вывода составила примерно 60%. Позднее в начале 2016 года, когда на У-70 был успешно сформирован пучок ядер углерода с энергией 20 ГэВ/нуклон и пиковой интенсивностью до $7 \cdot 10^9$ ионов за цикл, был реализован вывод этого пучка кристаллическим дефлектором.

В пятой главе диссертации рассматриваются результаты применений кристаллических дефлекторов на ускорительном комплексе У-70 для формирования вторичных частиц и решения других нестандартных задач. В начале главы обсуждаются результаты получения пучков заряженных адронов в диапазоне низких значениях импульсов 1,4–13 ГэВ/с в канале вторичных частиц на У-70.

Экспериментальная установка СПАСЧАРМ предназначена для исследования спиновых эффектов при рождении множества элементарных частиц и резонансов в адрон-

адронных столкновениях на У-70. Основной пучок, на котором работает СПАСЧАРМ, включает в себя отрицательно заряженные адроны 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. Эти пучки необходимы для методических исследований детекторов частиц. Для генерации таких пучков предложен метод, основанный на дополнительной мишени, установленной в головной части канала на пути интенсивного протонного пучка.

В сеансе 2026 г. этот режим использовался для исследований детектора черенковского излучения FARICH на установке СПАСЧАРМ. Система черенковских счетчиков обеспечивала идентификацию π -мезонов, а трековый спектрометр позволял точно измерять импульс частиц. В результате этих исследований подтверждено важное практическое значение разработанного метода получения заряженных адронов «низких» импульсов для экспериментальных установок комплекса У-70, впервые удалось получить пучок положительно заряженных адронов. В заключении 5 главы обсуждаются экспериментальные исследования, направленные на защиту септума У-70 с помощью отражения частиц в мультикристаллических структурах.

Замечания и недостатки

1. На ускорительном комплексе у70 используются несколько систем вывода:
быстрый однооборотный,
медленный стохастический
вывод с использованием внутренних мишеней
вывод с использованием изогнутых кристаллов
Они упоминаются в диссертации, но несомненно был очень полезен отдельный параграф, где бы были рассмотрены предназначения, сравнения, преимущества и недостатки каждого из этих выводов для протонов и различных типов ионов, их энергий и интенсивностей.
2. Отмечается на стр 74 среди преимуществ вывода изогнутым кристаллом большой динамический диапазон, высокая пространственная стабильность, малый эмиттанс без пояснений, когда эмиттанс выведенного пучка изогнутым кристаллом мал по сравнению с эмиттансом циркулирующего пучка в У-70, а когда они могут быть сопоставимы.
3. На Рис.3.8 имеется хорошее совпадение между расчетными данными и результатами измерений при малых и больших углах поворота кристалла. Однако, при промежуточных углах поворота изогнутого кристалла около 80 мрад экспериментальные результаты и расчеты отличаются в 1.5 -2 раза и эта разница заметно превышает ошибку измерений, с чем это связано.
4. Повреждение кристаллов протонными пучками происходит при интенсивности $2 \cdot 10^{20}$ протонов/см², отмечается что повреждения кристаллами пучками ионов углерода существенно больше, но в диссертации не приводятся никаких критических значений суммарного флюенса ионов для повреждения кристаллов.
5. Модуляция тока выведенного пучка с помощью изогнутых кристаллов достаточно высока (около 50%) например (Рис.4.2), но нет комментариев о природе ее возникновения, ограничениях на такую временную структуру, например, для терапии ионами углерода модуляция тока пучка должны быть меньше 10%.
6. На Рис.4.10 единицы измерений оси ординат должны быть в мкрад, а не в мрад.

Выводы и заключение

Диссертация Решетникова Сергея Федоровича “Развитие системы вывода циркулирующего пучка из ускорителя У-70 с помощью изогнутых кристаллов”, является научно-квалификационной работой, в которой выполнены экспериментальные исследования по выводу протонных и ионных пучков высокой энергии из ускорителя У70. Работа выполнена на высоком экспериментальном уровне, замечания и недостатки, указанные выше, не являются определяющими и не умаляют достоинств диссертации. Работа, выполненная диссертантом, актуальна и полезна для развития ускорительной техники, в частности для синхротронов, работающих в области физики высоких энергий. Приведенные методики вывода пучков изогнутыми кристаллами представляют большой интерес для экспериментаторов, занимающихся ускорительной техникой. Диссертация Решетникова С.Ф. полностью соответствует требованиям п.9 “Положения о присуждении ученых степеней”, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук (по специальности 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника), профессор, главный инженер ускорительного комплекса NICA,

Лаборатория физики высоких энергий имени В.И. Векслера и А.М. Балдина,

Международная межправительственная организация Объединенный Институт Ядерных Исследований (ОИЯИ)

Адрес: 141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д.6

Тел.: +7 (926) 177-06-81, e-mail: esyrsin@jinr.ru

Сырсин Евгений Михайлович

22 октября 2026 г.

Подпись Сырсина Е.М. удостоверяю

Главный ученый секретарь ОИЯИ,
кандидат физико-математических наук

Неделько Сергей Николаевич

