ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Решетникова Сергея Федоровича
на тему «Развитие системы вывода циркулирующего пучка из ускорителя У-70 с помощью изогнутых кристаллов»
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.18 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Актуальность темы исследования.

Использование кристаллических устройств для управления параметрами пучков заряженных частиц высоких энергий является одним из наиболее динамично развивающихся и практически значимых направлений в современной ускорительной физике. Метод вывода, деления и коллимации пучков с помощью эффектов каналирования, объемного отражения и затенения в изогнутых монокристаллах позволяет существенно расширить экспериментальные возможности существующих ускорительных комплексов. На ускорителе У-70 ИФВЭ данные исследования ведутся уже более тридцати лет, и за это время, в том числе благодаря соискателю, они перешли из разряда пионерских экспериментов в разряд незаменимых штатных устройств.

Развитие систем вывода протонов и ионов с помощью изогнутых кристаллов является чрезвычайно важным направлением. При этом, несмотря на то, что в настоящее время в большинстве случаев кристаллические устройства дополняют традиционные методы медленного и быстрого вывода, появляется все больше вполне самостоятельных кристаллических выводов и систем коллимации пучков. С учетом того, что современные эксперименты физики высоких энергий предъявляют чрезвычайно высокие требования к стабильности, эмиттансу и динамическому диапазону интенсивности пучков, тема диссертационного исследования С.Ф. Решетникова, направленная на развитие станций кристаллических дефлекторов и реализацию инновационных режимов их работы, является своевременной и актуальной. Исследования, представленные в рассматриваемой работе, в некоторых аспектах не только находятся на одном уровне с зарубежными результатами, но и нередко опережают их.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов.

Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, обладают высокой степенью обоснованности и достоверности. Соискатель опирается на проверенные годами теоретические основы физики каналирования и устоявшиеся принципы физики пучков заряженных частиц. Достоверность результатов диссертационной работы подтверждена многочисленными экспериментальными измерениями с повторяющимся исходом, а также тем фактом, что разработанные системы отклонения пучков в настоящее время стабильно функционируют на кольце У-70. Основные результаты работы неоднократно обсуждались на хороших международных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, среди которых такие высокорейтинговые издания как Письма в ЖЭТФ и International Journal of Modern Physics A. По теме диссертационной работы у соискателя имеются также и другие, неучтенные при подаче документов к защите, статьи в таких известных журналах как PRAB, PRST-AB, NIMB.

Объем и структура работы.

Диссертационное исследование организовано следующим образом: введение, пять глав и заключение. Полный объем работы составляет 129 страниц, включая 74 рисунка и 2 таблицы. Библиографический список включает 97 наименований. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Основное содержание работы

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 публикаций и выступлений на научных конференциях, отражающих основные результаты исследования, изложено краткое содержание диссертации и достаточно краткое, но емкое описание современного состояния рассматриваемой в данной диссертации области.

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

Вторая глава посвящена унифицированной станции кристаллических дефлекторов (СКД) на ускорителе У-70, а также автоматизированной системе управления этой станцией. Представлено их подробное техническое описание, а также результаты работы в сеансах на У-70. Автором решены задачи прецизионного позиционирования кристаллов в условиях сверхвысокого вакуума, сильных магнитных полей и жестких радиационных условий. Продемонстрирована высокая точность установки кристалла по углу.

В **третьей главе** подробно рассмотрены кристаллические устройства, используемые для направленного вывода заряженных частиц из ускорителя У-70, их типы, рабочие параметры, особенности применения и достигнутые результаты. В первом разделе третьей главы описано экспериментальное исследование по определению зависимости эффективности вывода пучка протонов 50 ГэВ от угла изгиба кристаллов (измерения проведены для кристаллов, изогнутых на 36, 64, 100 и 135 мрад). Сравниваются полученные данные и результаты компьютерного моделирования. Во втором разделе рассматриваются различные типы кристаллов: длинные и короткие, а также способы деления пучка для вывода частиц в отдельные каналы.

В третьем разделе третьей главы рассматривается возможность вывода пучка заряженных частиц варьируемой интенсивности, а в четвертом обобщаются результаты длительного использования изогнутых кристаллов, подтверждающие надежный и предсказуемый результат работы монокристаллов в течение тысяч часов без критической деградации эффективности. Установлен радиационный предел длительности работы для кристаллов на циркулирующем пучке.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена рассмотрению результатов экспериментальных исследований по выводу шестизарядных ионов углерода из ускорителя У-70 в различные каналы транспортировки частиц № 22, № 8 и № 4А и далее на действующие экспериментальные установки ФОДС, ИСТРА-КРИСТАЛЛ, ВЕС, СПИН для нужд релятивистской ядерной физики. Были сформированы пучки ядер углерода со сравнимыми характеристиками по энергии и пиковой интенсивности за цикл. Экспериментально определены сравнительные характеристики вывода протонов и ионов углерода изогнутыми кристаллами, показано, что эффективность вывода ионов углерода несколько ниже, чем у протонов, за счет более интенсивного сечения неупругого ядерного взаимодействия ионов с веществом кристалла.

В **пятой главе** диссертации рассматриваются результаты применений кристаллических дефлекторов на ускорительном комплексе У-70 для решения нестандартных для данного ускорителя задач:

Разработан, реализован и внедрен способ получения пучка заряженных адронов в канале вторичных частиц № 14 на внешней алюминиевой мишени для нужд эксперимента СПАСЧАРМ.

Впервые для ускорительного комплекса У-70 разработан и реализован режим медленного вывода пучка протонов в канал транспортировки частиц с использованием явления объемного захвата в каналирование. Показано, что данный режим существенно улучшает временную структуру выведенного пучка и повышает стабильность вывода, поскольку параметры вывода при объемном захвате в каналирование существенно меньше зависят от

угла падения частиц пучка на кристалл, устраняя необходимость постоянной подстройки угла.

Изучена возможность радиационной защиты перегородки септум-магнита с помощью мультикристаллического устройства, работающего в режиме объемного отражения. Коэффициент затенения при тестировании на канале частиц составил 65%.

В **заключении** представлены основные результаты и выводы диссертационной работы, полностью подтверждающие выполнение поставленных целей. Главным же результатом данной работы являются стабильно функционирующие системы вывода пучка на ускорителе У-70, разработанные соискателем.

Теоретическая и практическая значимость результатов.

Значимость полученных автором результатов для практики несомненна и заключается в наглядном вкладе его работ в развитие ускорителя У-70 и в некоторых случаях возможность проведения тех экспериментов, которые без кристаллических дефлекторов невозможно было бы организовать. С точки зрения теории вклад тоже весьма понятен: результаты работы являются весьма богатым материалом для верификации теоретических и компьютерных моделей каналирования заряженных частиц в прямых и изогнутых кристаллах.

Замечания, вопросы и пожелания по работе

Несмотря на высокий уровень выполнения и внутреннюю завершенность работы, обеспеченные колоссальным опытом ее автора, к автору диссертационного исследования имеется несколько вопросов и замечаний, носящих характер дискуссии:

1. В диссертационной работе не хватает методичного сравнения и сопоставления полученных результатов с актуальными мировыми достижениями. Например, в работе утверждается, что достигнутый на канале № 4А коэффициент затенения септума мультикристаллом в 65% заметно превосходит ранние зарубежные результаты (40% в публикациях CERN 2019 года). Однако диссертантом не учтены более свежие публикации по данной тематике, в которых осуществлен переход к концепции нелокального многокристаллического затенения. В проведенных на SPS экспериментах по медленному выводу было достигнуто снижение локальных потерь на септуме до 51% с проектным выходом на уровень 75% при внедрении кристаллов увеличенной толщины.
2. В Главе 3 (3.1) и на рисунке 2 автореферата присутствует очевидное противоречие в представлении экспериментальных результатов. Диссертант указывает, что в рамках данной серии исследований им были измерены физические характеристики четырех кристаллов с углами изгиба 36, 64, 100 и 135 мрад. Тем не менее, на приводимом графике зависимости эффективности от угла изгиба отчетливо нанесено шесть экспериментальных точек. Соискателю необходимо пояснить происхождение дополнительных точек на графике. Хотелось бы также услышать аргументацию автора относительно выбора именно этих угловых значений.
3. В Положении № 2, выносимом на защиту, в тексте работы и в Заключении утверждается, что кристаллы кремния выдерживают высокие интегральные потоки частиц 2×10^{20} на квадратный сантиметр без существенной деградации каналирующих свойств, при этом еще и нагреваясь до сотен градусов. В то же время в Главе 3 автор указывает, что после прохождения данного предела эффективность коротких кристаллов падает примерно в 2 раза, и они подлежат замене. Возникает противоречие в трактовке выражения «без существенной деградации» при сравнении его с фразой о падении эффективности в 2 раза. Также очень бы хотелось видеть исследование причин деградации, например, изучения приобретенных кристаллом дефектов методом сканирующей микроскопии или хотя бы теоретические оценки. Хотелось бы понимать дело лишь только в радиационной нагрузке, температурной деформации или еще в чем-то.
4. Формулировки положений № 3 и № 4, выносимых на защиту, в текущем виде скорее описывают практическую значимость работы и прикладную область применения пучков, нежели формулируют новые физические закономерности. Заявления соискателя о том, что

созданные им режимы вывода пучков позволили изучить характеристики жидкоаргоновых детекторов БАК (Положение № 3) и позволили увеличить число потребителей пучка в сеансах (Положение № 4), размывают личный научный вклад автора и уводят дискуссию в сторону экономики эксплуатации ускорительного комплекса или физики сторонних экспериментов.

5. В качестве пожелания: автору следовало бы развернуто представить расчетно-алгоритмическую базу. Описывая в работе хорошее согласие экспериментальных результатов с расчетными кривыми, автор в Главе 1 ограничивается лишь выдержкой из упрощенной теории каналирования частиц. Диссертационное исследование существенно выиграло бы, если бы в нем были подробнее раскрыты математические алгоритмы и коды моделирования стохастических процессов релятивистского пучка при его многократном прохождении. В частности, в первом разделе Главы 5 соискатель указывает на выполнение пучковых расчетов на основе полуэмпирического выражения и конкретной статьи, однако сам вид математической формулы и закладываемые физические допущения в тексте работы полностью опущены, что затрудняет объективную оценку примененной методики.
6. При описании вывода пучка в режиме объемного захвата в каналирование диссертантом стоило уточнить, что процесс прохождения реалистичных пучков релятивистских частиц через изогнутый кристалл всегда носит комплексный характер. Внутри кристалла невозможно в чистом виде сепарировать механизм объемного захвата от объемного отражения плоскостями, стандартного каналирования и процессов деканалирования и реканалирования. Стоило бы отметить, что при расположении кристалла так, как описано в разделе 5.2 отклонение происходит *преимущественно* за счет объемного захвата. Хотелось бы также услышать мнение автора: не должен ли кристалл в геометрии преимущественного объемного захвата деградировать быстрее в зоне входа пучка, по сравнению со стандартным торцевым каналированием? Ведь на начальном траекторном участке влета под углом пучок движется поперек плоскостей в режиме стохастического квазиканалирования, пробивая атомные ряды напрямую, что должно резко увеличивать локальное сечение кулоновских и ядерных смещений атомов кремния.
7. В Главе 2 при подробном описании автоматизированного комплекса управления СКД упоминается использование микропроцессорного модуля M128-DRV-4. Однако технические характеристики, архитектура и радиационная стойкость данной микросхемы в тексте работы практически не раскрыты. Каковы аппаратные ограничения данного модуля при работе в условиях повышенного фона ионизирующего излучения в ускорительном зале? Кроме того, хотелось бы уточнить, как осуществляется калибровка СКД по углу и радиусу — производится ли она исключительно внешним образом перед монтажом станции, или внутри вакуумного объема предусмотрены прецизионные оптические (лазерные) каналы обратной связи?
8. Отдельный интерес вызывает стабильность изгибания кристаллов методом нанесения микроканавок (штриховки) на их поверхность — насколько долговечна такая структура в условиях интенсивного циклического радиационного нагрева?
9. В тексте диссертационной работы и в автореферате, пусть и в небольшом количестве, но присутствуют орфографические и стилистические ошибки, также некоторые рисунки недостаточно описаны, некоторые изображения представлены в относительно плохом качестве: например, использование кристаллов для вывода пучков названо «комплиментарным» к другим методам, тогда как в данном контексте корректным является написание «комплементарный»; в подписи к рисунку 4 в автореферате не объяснен зеленый луч; на фотографиях с пучками не всегда понятно, где пучок.

Указанные замечания ни в коей мере не снижают высокую научную и практическую ценность, а также общее впечатление от диссертационного исследования С.Ф. Решетникова. Все замечания, кроме последнего, носят дискуссионный характер.

Заключение о соответствии диссертации критериям ВАК

Диссертационная работа Решетникова Сергея Федоровича «Развитие системы вывода циркулирующего пучка из ускорителя У-70 с помощью изогнутых кристаллов» является самостоятельным, актуальным, и законченным научно-квалификационным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. В ней решена важная научная и практическая задача ускорительной техники по созданию точных и прогнозируемых автоматизированных кристаллических систем вывода и разделения пучков тяжелых заряженных частиц.

Работа полностью удовлетворяет всем требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (в редакции, действующей на момент защиты), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Ее автор, Решетников Сергей Федорович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника за разработку и успешное внедрение на отечественном ускорителе У-70 унифицированной системы кристаллического вывода пучков в экспериментальные каналы.

Официальный оппонент: Савченко Александр Алексеевич
Кандидат физико-математических наук 01.04.07 – Физика конденсированного состояния
Должность: доцент
Место работы: кафедра физики конденсированных сред (№67) института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31
Рабочий e-mail, рабочий телефон: aasavchenko1@mephi.ru, +7 495 788 5699, доб. 7676

23 октября 2026 г. _____ А.А. Савченко

Подпись удостоверяю
специалист
отдела регистрации
и приказов НИЯУ МИФИ