«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор
Московского государственного
университета имени М. В. Ломоносова
профессор
член-корреспондент РАН А.А. Федянин



«28» октября 2026 г.

О Т З Ы В

ведущей организации - Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» на диссертацию Решетникова Сергея Федоровича на тему «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

В Институте физики высоких энергий в течение многих лет ведутся экспериментальные и теоретические исследования, направленные на решение задачи поворота пучков протонов и ионов углерода высокой энергии с помощью эффекта каналирования в изогнутых кристаллах. Поскольку эквивалентное отклоняющее поле кристалла на один-два порядка выше поля классических магнитов, теплых и сверхпроводящих, использование изогнутых кристаллов позволило создать компактные устройства управления пучком, применяющиеся в физических экспериментах на ускорителе У-70. Увеличение числа экспериментальных каналов, расширение их функционала потребовало создания унифицированных станций кристаллических дефлекторов, чему посвящена данная диссертационная работа, именно это определяет ее **актуальность**.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Во введении описаны актуальность диссертационной работы, ее цели, научная новизна и практическая значимость результатов, приведены научные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов, приведены сведения о личном участии автора, апробации,

публикациях, структуре и объеме диссертации. Дано описание содержания диссертации и истории исследований эффекта каналирования заряженных частиц в кристаллах, в том числе в применении к выводу пучков тяжелых заряженных частиц из ускорителей.

Первая глава посвящена описанию метода вывода заряженных частиц с помощью кристаллов. Приведены соотношения для оценки эффективности захвата в режим каналирования, критического радиуса изгиба кристалла, длины деканалирования, эффективности отклонения, в том числе при многократном прохождении пучка через кристалл, описаны кристаллические устройства для отклонения пучков заряженных частиц.

Во второй главе изложены результаты разработки автором унифицированной станции кристаллических дефлекторов, включая ее механическую часть и систему управления, обеспечивающие прецизионное выставление кристалла в рабочее положение, показано размещение шести станций вдоль орбиты ускорителя У-70, приведены примеры измерения профиля выведенного пучка.

В третьей главе представлены характеристики систем вывода пучка на основе кристаллических дефлекторов, полученные в течении длительного срока их применения. Описаны методика и приведены результаты измерения эффективности вывода пучка в зависимости от угла изгиба кристалла, убывающей на четыре порядка величины при увеличении угла от 1 мрад до 135 мрад. Дан обзор методов вывода пучка с помощью изогнутых кристаллов, реализованных на У-70: использование длинных кристаллов с выводом из вакуумной камеры ускорителя, коротких кристаллов с многократным прохождением через них циркулирующих в кольце протонов, делением пучка и вариацией его интенсивности. Также, на основании анализа данных за длительный срок эксплуатации даны оценки радиационной стойкости кристаллов при работе в условиях разогрева до высоких температур.

В четвертой главе описаны результаты экспериментов по выводу ионов углерода из У-70 кристаллическими дефлекторами, приведено сравнение с выводом протонного пучка.

Заключительная пятая глава посвящена применению кристаллических дефлекторов для решения нестандартных задач, таких как получение вторичных адронных пучков, вывод протонного пучка с использованием объемного захвата в каналирование, защита перегородки септум-магнита от перегрева.

В заключении суммированы основные результаты и сделаны выводы диссертационной работы.

Содержание диссертационной работы соответствует поставленным целям и в полной мере освещает полученные автором результаты.

Несмотря на то, что исследование метода изогнутых кристаллов для вывода пучков тяжелых заряженных частиц из ускорителей ведется в течении нескольких десятилетий, автором внесен существенный вклад в его развитие, при этом ряд результатов получен впервые. К результатам, определяющим **научную новизну,** относятся методы: вывода пучка протонов варьируемой интенсивности из кольцевого ускорителя с помощью изогнутых кристаллов; вывода пучка с использованием явления объемного захвата в каналирование; вывода пучков ионов углерода из кольцевого ускорителя в каналы вторичных частиц. Автором впервые измерена зависимость эффективности вывода пучка протонов кристаллом от угла его изгиба при торцевом захвате в широком диапазоне углов. Разработан и внедрен метод получения пучка заряженных адронов с импульсами в диапазоне 1,4–13 ГэВ/*c* в канале вторичных частиц. **Практическая ценность** диссертационной работы заключается в том, что ее результаты используются при проведении физических экспериментов на ускорителе У-70, повысив оперативность, надежность управления выводом пучков частиц высоких энергий с помощью изогнутых кристаллов и, тем самым, повысив коэффициент использования ускорительного времени. Помимо этого, результаты работы могут быть использовании при проведении экспериментов прикладного характера на существующих и проектируемых ускорительных комплексах.

Значимость полученных автором диссертационной работы результатов заключается в том, что метод вывода пучка тяжелых заряженных частиц из ускорителей с помощью изогнутых кристаллов перешел из стадии исследований и отдельных применений в стадию систематического использования.

Обоснованность и достоверность выводов и заключений вытекает из опубликованных в статьях и представленных в диссертационной работе результатов исследований. По теме диссертации опубликовано восемь статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК. Материалы, представленные в статьях и в автореферате, отражают содержание диссертационной работы. Диссертация написана грамотным языком, стиль изложения соответствует сути представленного материала.

Основное **замечание** по диссертации касается представления важного физического результата работы – зависимости эффективности вывода пучка протонов от угла изгиба кристалла – раздел 3.1, рисунок 3.8. Эксперимент и обработка его результатов описаны недостаточно подробно. Нет обоснования погрешностей измерений, в статье 2008 г., на которую дана ссылка, также отсутствуют детали.

Есть менее существенные замечания, например, из оглавления выпало название первой главы. Для формул (1.15, 1.24) следовало бы явным образом указать условие, что радиус изгиба больше критического. Фотография на рисунке 1.5 не информативна, невозможно понять: где «кристалл – полоска (слева)» и где «О-кристалл (справа)». Единица измерения эквивалентной

дозы обозначается «Зв», а не «Звт». Рисунок 2.11 – не ясно в каких единицах измеряется величина шага.

Сделанные замечания не влияют на высокую оценку диссертационной работы. Диссертация С.В. Решетников на тему «Развитие системы вывода циркулирующего пучка из ускорителя У-70 с помощью изогнутых кристаллов» соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями от 21 апреля 2016 год № 335, а сам Решетников Сергей Федорович, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Отзыв составил
главный научный сотрудник
Отдела электромагнитных процессов и
взаимодействия атомных ядер НИИЯФ МГУ
доктор физ.-мат. наук, профессор

Шведунов В.И.

Результаты диссертации рассмотрены и одобрены на заседании семинара Отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер НИИЯФ МГУ 10 сентября 2026 г.

И.о. руководителя Отдела электромагнитных процессов и
взаимодействия атомных ядер НИИЯФ МГУ
доктор физ.-мат. наук, профессор

Шведунов В.И.

Директор НИИЯФ МГУ
профессор, член-корреспондент РАН

Боос Э.Э.

Сведения о ведущей организации:

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

119991, Москва, Ленинские горы, д. 1

Тел.: +7 (495) 939-10-00, e-mail: info@rector.msu.ru