

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Яновича Андрея Антоновича «Экспериментальные исследования по управлению пучками заряженных частиц и генерации направленных потоков излучения с помощью новых кристаллических устройств на ускорителях», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 - Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

**Предметом исследования** представленной диссертационной работы является явление каналирования релятивистских заряженных частиц в кристаллах и сопровождающее его электромагнитное излучение. В работе исследованы фокусировка пучка, объемное отражение частиц пучка в мультикристаллических структурах, а также генерация жесткого излучения. В качестве релятивистских частиц могут выступать электроны, позитроны, протоны, тяжелые ионы и др. – общность результатов диссертации в этом плане весьма велика. Основная часть результатов диссертационной работы посвящена экспериментальным исследованиям, однако, при исследовании характеристик излучения, сопровождающего процесс объемного отражения, проведены также и теоретические расчеты.

**Актуальность темы** исследования определяется чрезвычайной привлекательностью идеи об управлении пучками ультрарелятивистских заряженных частиц в условиях коллайдеров с помощью мощных полей, естественным образом существующих внутри кристаллов, вместо использования гигантских магнитов, охлаждающих систем и проч. Технически, использование обычных изогнутых кристаллических пластинок на несколько порядков более простая и дешевая процедура, по сравнению с традиционными ускорительными технологиями.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения; содержит 139 страниц текста, 68 рисунков, 2 таблицы; список литературы насчитывает 114 наименований.

**Первая глава** диссертационной работы посвящена фокусировке пучков заряженных частиц. Рассмотрено два режима фокусировки: из точечного источника в параллельный пучок, и из параллельного пучка в линейный фокус, в том числе на коротком расстоянии, порядка 1 см.

**Вторая глава** посвящена явлению объемного отражения релятивистских заряженных частиц в мультикристаллических структурах.

Детально описан процесс собственно объемного отражения: приведены как качественные соображения, так и аналитические формулы.

Описаны проведенные эксперименты по отклонению протонного пучка с импульсом 400 ГэВ/с и пучка отрицательных пионов с импульсом 150 ГэВ/с

были проведены в CERN на ускорителе SPS с использованием многополосного кремниевого дефлектора в режиме отражения.

Было предложено оригинальное устройство: вместо цепочки изогнутых кристаллов – цельная кристаллическая пластинка, с периодически нанесенными на нее механическими бороздками, что при изгибе позволяет выдерживать взаимную ориентацию отклоняющих кристаллических элементов с высокой точностью. Были созданы и испытаны несколько образцов многополосного кристаллического устройства, рассчитанных конкретно под технические требования системы локализации LHC.

В качестве меры борьбы с проблемой гало пучка в больших адронных коллайдерах, рассмотрена возможность коллимации пучка с помощью отражений частиц в коротких изогнутых кристаллах.

В третьей главе описано применения мультикристаллических структур в ускорительной физике. Подробно рассмотрен ключевой для этого явления процесс: генерация жесткого электромагнитного излучения, включая как теоретический анализ, так и экспериментальные исследования для пучка электронов с энергией 7 ГэВ и новой мультикристаллической структуры. При рассмотрении излучения учтен важный момент: потери частицей энергии по мере прохождения ее в кристалле. Известны методы решения подобной задачи, например, при анализе потерь заряженных ионов на черенковское излучение (GSI), или при рассмотрении когерентного тормозного излучения (coherent bremsstrahlung) в кристаллах: проблема решается путем разбиения траектории на малые отрезки, на каждом из которых используется приближение равномерного движения. Автор же при анализе применимости математических моделей использовал здесь подход, основанный на использовании метода Монте-Карло, что позволило учитывать кратные процессы излучения фотонов.

Также, был рассмотрен важный прикладной аспект - защита (септум)магнитов. Показано, что использование объемного отражения пучка протонов в мультикристаллическом устройстве вполне реалистично для решения данной задачи.

В Заключение сформулированы основные выводы и результаты диссертации.

**Достоверность результатов** диссертации подтверждается согласием экспериментальных данных, полученных на протонных пучках в двух существенно различных диапазонах энергии: на установках У-70 (50 ГэВ) в ИФВЭ и SPS в CERN (400 ГэВ), и теоретических данных.

**Новизна** полученных А.А. Яновичем научных результатов определяется собственно новизной предложенного мультикристаллического устройства, и новизной экспериментальных данных, полученных на пучках в двух существенно различных диапазонах энергий.

Рекомендации автора к практическому внедрению полученных им результатов следует признать **обоснованными**, ввиду надежности применявшихся им методов.

В диссертации можно отметить следующие недостатки:

1. Текст диссертации местами оформлен небрежно, с нарушением последовательности в аргументации и огрехами в стилистике, а иногда и грамматике, затрудняющими понимание. Описания некоторых экспериментов оставляют много вопросов. Так, например, фраза после рисунка 1.8 «для разрешения неопределенности в нескольких исходящих треках в процессе реконструкции» не объясняет необходимости поворота стрипового детектора на 45 градусов, что совместно с мелкими буквами на упомянутом рисунке затрудняет понимание данного места. В подписи к рисунку 1.9 есть фраза «видны два вентилятора и оптические волокна, посылающие сигнал на систему сбора данных»: стилистически, выходит, что вентиляторы могут отправлять сигнал. Часто за подробным описанием автор отправляет читателя в цитируемые статьи, хотя для понимания это описание стоило бы привести подробнее в тексте диссертации, поскольку работа все же преимущественно экспериментальная. Также, заметно, что рисунки взяты непосредственно из статей в виде скриншотов, что местами привело к их плохому качеству. Имеются отсылки к несуществующим рисункам (например, 1.28b), очень часто подписи к осям графиков и текст на рисунках очень мелкие и нечитаемые, подписи к рисункам заканчиваются неожиданно – нет точки в конце предложения и интервала после подписи. На некоторых двумерных рисунках отсутствует палитра, что затрудняет понимание, где интенсивность больше, а где меньше. Все это несколько мешает при чтении работы, хотя все-же, в целом, содержание остается понятным.
2. На странице 54 идет речь об отражении от плоскостей, но используется критический угол осевого каналирования (см. текст над выражением 2.4). Такое использование непонятно, и возникает вопрос: это опечатка, или сознательная замена? Если да, чем это обусловлено, и почему не рассматривать обычный линдхардовский угол?

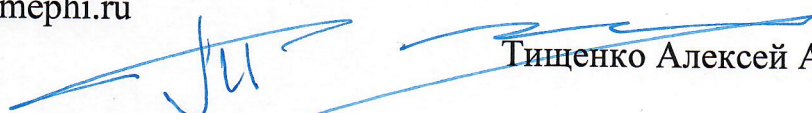
Отмеченные небольшие недостатки не снижают общей высокой оценки проведенных А.А. Яновичем исследований. Автор представил в диссертации подробную информацию о проведенных экспериментальных исследованиях по управлению пучками заряженных частиц и генерации направленных потоков излучения с помощью новых кристаллических устройств на ускорителях. Проведённые исследования вносят заметный вклад в развитие идеи об использовании каналирования в изогнутых кристаллах для управления потоками заряженных частиц высоких и сверхвысоких энергий, и

результаты являются перспективными для применения на адронных коллайдерах и других высокоэнергетических ускорителях пучков заряженных частиц, что определяет высокую значимость полученных автором диссертации результатов для науки.

Полученные в ходе исследований результаты имеют как научное, так и практическое значение. Они могут быть использованы при проведении экспериментальных исследований в CERN, LNF INFN, ИФВЭ и других крупных исследовательских центрах. Основные результаты, полученные в диссертации, опубликованы в рецензируемых научных журналах и доложены на представительных научных конференциях, известны большинству активно работающих в этом направлении физиков.

Оценивая работу в целом, можно заключить, что диссертация А.А. Яновича «Экспериментальные исследования по управлению пучками заряженных частиц и генерации направленных потоков излучения с помощью новых кристаллических устройств на ускорителях» представляет собой законченное научное исследование. Диссертация удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации, а ее автор, Янович Андрей Антонович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 - Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника за существенный вклад в экспериментальное исследование процессов объемного отражения релятивистских протонов в новых и перспективных мультикристаллических структурах.

Доцент, вед. научн. сотрудник, руководитель  
международной исследовательской лаборатории  
№ 423 «Излучение заряженных частиц»,  
заместитель заведующего кафедрой № 67  
«Физика конденсированных сред» ИНТЭЛ, НИЯУ МИФИ  
к.ф.-м.н., специальность 01.04.02 – теоретическая физика  
тел. 8 (495) 989-20-50  
tishchenko@mephi.ru

  
Тищенко Алексей Александрович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»

«23» апреля 2021 года



ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ  
ДИРЕКТОРА ПО  
ПЕРСОНАЛУ НИЯУ МИФИ  
А.А. ТИЩЕНКО

