

**Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»  
(НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ)**

12 мая 2021 г.

**Заседание Диссертационного совета Д 201.004.01**

**Протокол № 2021-7**

**Стенограмма заседания диссертационного совета Д 201.004.01**

**Защита диссертации Яновича Андрея Антоновича  
«Экспериментальные исследования по управлению пучками  
заряженных частиц и генерации направленных потоков излучения с  
помощью новых кристаллических устройств на ускорителях»  
на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и  
ускорительная техника**

**Председатель:** председатель диссертационного совета Д 201.004.01  
доктор физико-математических наук, профессор, Тюрин Николай  
Евгеньевич.

**Секретарь:** временно исполняющий обязанности учёного секретаря  
диссертационного совета Д 201.004.01 доктор физико-математических наук,  
Мочалов Василий Вадимович.

Всего членов диссертационного совета: 22 человека.

Присутствует: 18 человек.

На заседании присутствуют следующие члены диссертационного  
совета Д 201.004.01:

1. Тюрин Н.Е., доктор ф.-м.-н., 01.04.02 - председатель;
2. Зайцев А.М., доктор ф.-м.н., 01.04.23 - заместитель председателя;
3. Мочалов В.В., доктор ф.-м.н., 01.04.23 - временно исполняющий обязанности учёного секретаря диссертационного совета;
4. Арбузов Б.А., доктор ф.-м.н., 01.04.02;
5. Денисов С.П., доктор ф.-м.н., 01.04.23;
6. Зайцев Ю.М., доктор ф.-м.н., 01.04.23;
7. Иванов С.В., доктор ф.-м.н., 01.04.20;
8. Качанов В.А., доктор ф.-м.н., 01.04.23;
9. Козуб С.С., доктор ф.-м.н., 01.04.20;
10. Образцов В.Ф., доктор ф.-м.н., 01.04.23;
11. Петров В.А., доктор ф.-м.н., 01.04.02;
12. Петрухин А.А., доктор ф.-м.н., 01.04.23;
13. Разумов А.В., доктор ф.-м.н., 01.04.02;
14. Саврин В.И., доктор ф.-м.н. 01.04.02;
15. Сенько В.А. , доктор ф.-м.н., 01.04.20;
16. Ткаченко Л.М. доктор ф.-м.н., 01.04.20;
17. Трошин С.М., доктор ф.-м. н., 01.04.02;
18. Фещенко Ф.В., доктор ф.-м.н., 01.04.20.

Диссертационный совет Д 201.004.01 утверждён приказом по Федеральной службе по надзору в сфере образования и науки № 105/нк от 11 апреля 2012 года в составе 22 человек. На заседании присутствуют 18 членов совета, из них 5 докторов наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, кворум имеется. На заседании присутствуют также научный руководитель кандидат физико-математических наук Маишеев Владимир Александрович, официальные оппоненты: Кубанкин Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, Тищенко Алексей Александрович, кандидат физико-математических наук.

**Н.Е. Тюрин:** Повестка дня заседания диссертационного совета: защита диссертации Яновича Андрея Антоновича «Экспериментальные исследования по управлению пучками заряженных частиц и генерации направленных потоков излучения с помощью новых кристаллических устройств на ускорителях» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Василий Вадимович, Вам слово.

**В.В. Мочалов:** Все документы, соответствующие требованиям ВАК для защиты кандидатской диссертации, имеются в деле. Заключение НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, где выполнялась диссертационная работа, было утверждено 25 февраля 2021 г. Имеется отзыв ведущей организации. Оба оппонента присутствуют в зале. Янович Андрей Антонович работает в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ с 1992 г. после окончания физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Диссертация принята к защите диссертационным советом Д 201.004.01 09 марта 2021 года. Можно приступать к защите.

**Н.Е. Тюрин:** Андрей Антонович, Вам слово.

**А.А. Янович:** Уважаемые коллеги, представляю вашему вниманию диссертацию «Экспериментальные исследования по управлению пучками заряженных частиц и генерации направленных потоков излучения с помощью новых кристаллических устройств на ускорителях».

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения.

- В первой главе рассмотрена фокусировка пучка заряженных частиц фокусирующими кристаллическими элементами первого и второго типа в экспериментах на канале 4а ускорителя У-70 НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ и в рамках коллаборации UA-9 ускорителя SPS CERN.
- Во второй главе рассмотрено объемное отражение релятивистских частиц в различных многополосных кристаллических структурах. Рассмотрена возможность коллимации пучка в области ТэВ-ных энергий с помощью кратных отражений частиц в изогнутых кристаллах.
- В третьей главе рассмотрены генерация гамма-излучения при взаимодействии 7 ГэВ пучка электронов с мультикристаллической

структурой в области отражения и возможность применения мультикристаллических структур для защиты септум-магнитов.

Актуальность темы.

- Первые успешные эксперименты по отклонению протонных пучков, выполненные в Дубне и НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, стимулировали исследования в этой области на коллайдерах RHIC, Tevatron, SPS и LHC.
- Фокусирующие устройства первого типа могут быть использованы на ускорителях для систем формирования выведенных пучков, а также для получения пучков вторичных частиц (в режиме обратной фокусировки) в ТэВ-ной области энергии.
- Фокусирующие устройства второго типа могут быть использованы для измерения магнитных моментов короткоживущих частиц на LHC и FCC с использованием прецессии спина в изогнутом кристалле
- Защита септум-магнита от радиации важна для ускорителей в Fermilab, BNL и J-PARC. Одним из способов решения является метод «затенения» перегородки септума мультикристаллической структурой в режиме объемного отражения. Кроме того, мультикристаллические структуры имеют перспективу использования на ускорителях для коллимации пучка и в качестве источника высокоэнергетических фотонов.

Материалы, которые легли в основу диссертации, докладывались на 6 научных конференциях. Представленные в диссертации результаты опубликованы в 11 печатных работах в журналах, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных журналов.

Эксперименты по фокусировке из параллельного пучка в линейный фокус с помощью фокусирующего кристалла 1-го типа проводили на канале 4а ускорителя У-70 на 50 ГэВ пучке протонов и на ускорителе SPS в CERN на 400 ГэВ пучке протонов в совместном эксперименте UA-9. На рисунке (а) слева сверху показано современное фокусирующее кристаллическое устройство 1-го типа. Кристалл изгибается в продольном направлении держателем. Из-за анизотропного свойства кристаллической решетки возникает поперечный изгиб кристалла с радиусом несколько метров. Схема установки «Кристалл» приведена на рисунке справа сверху. Пучок протонов

50 ГэВ после коллиматора проходил телескоп счетчиков  $S_1$  &  $S_2$  &  $S_3$ . Счетчик  $S_4$  находился вне зоны основного пучка. Четыре слоя эмульсии располагались на различном расстоянии от кристалла. На рисунке (а) внизу показано изображение пучка частиц на эмульсии вблизи фокуса  $L = 1,7$  м. Стрелка под цифрой 3 - сфокусированный пучок (в виде линии). Таким образом, наглядно показано, что горизонтальный пучок размером  $\sigma_x \cong 2$  мм, сопоставимый по размеру с толщиной кристалла, отклоняется и сжимается в линию размером  $\text{FWHM} = 0,248$  мм.

Более детальное рассмотрение фокусирующего устройства первого типа было проведено в совместном эксперименте на установке UA9 в ускорителе SPS CERN. Вверху слева приведена схема установки UA9. В установке используются 5 станций кремневых микростриповых детекторов для измерения входящих и исходящих углов частиц с угловым разрешением порядка 3 мкрад и разрешением по координате 10 микрон в горизонтальной и вертикальной плоскостях. События инициируются совпадением сигналов от пары триггерных счетчиков. На рисунке (а) справа вверху на двумерной гистограмме показана зависимость горизонтального угла отклонения  $\theta_x$  от поперечной горизонтальной координаты  $x$  для пучка протонов с импульсом 400 ГэВ/с. Линия  $OO'$  соответствует центру распределения каналированных частиц, прошедших вдоль полной длины кристалла. Для качественной фокусировки важно, чтобы эта зависимость была линейной, что и наблюдается. На рисунке (б) показаны результаты реконструкции огибающей 400 ГэВ протонного пучка в зависимости от расстояния за кристаллом. В нижней части рисунка размещены профили пучка. Узкий профиль – в фокальной точке.

Таким образом получили, что для кристаллического устройства 1-го типа получена очень хорошая линейность угла отклонения в зависимости от поперечной координаты. Пучок протонов сжался в фокусе в 8,2 раза. Фокусное расстояние составило 5.503 м, эффективность сфокусированного пучка равна ~35% от полного потока частиц.

Для фокусировки слабо расходящегося пучка на короткое расстояние в линейный фокус используется фокусирующее устройство второго типа. Вверху слева (а) показана схема фокусировки пучка изогнутой плоскопараллельной пластиной кремния, в которой боковые грани повернуты

относительно кристаллографических плоскостей на небольшой угол ( $3^\circ$  градуса). В отличие от фокусирующего устройства 1 типа, фокусировка происходит сразу практически без отклонения пучка. Вначале проверили фокусирующее устройство второго типа на пучке протонов 50 ГэВ в Протвино на канале 4а ускорителя У-70. Вместо эмульсий ставили ЕВТЗ пленку. В итоге получили, что пучок протонов на расстоянии 17 см за кристаллом сжался в линию с  $\text{FWHM} = 30$  мкм.

Более детально подобное фокусирующее кристаллическое устройство второго типа было испытано на пучке  $\pi^+$  с импульсом 180 ГэВ/с на экспериментальной установке UA9 на ускорителе SPS CERN. Пластину изогнули на угол 3.5 мрад. В итоге мы получили хорошую линейность угла отклонения в зависимости от поперечной координаты, фокусное расстояние составило 15,5 см, степени сжатия пучка  $\sim 15$ , эффективность 10%.

В эксперименте по фокусировке из точечного источника в параллельный пучок был выбран аналогичный кристалл первого типа со скошенным торцом, только повернутый в держателе на  $180^\circ$  относительно нормали к плоскости изгиба. Измерения сначала были проведены в Протвино на канале 4а У-70 на пучке протонов с энергией 50 ГэВ. Для создания точечного источника расходящегося пучка протонов была установлена активная мишень в виде тонкой пластины (толщиной 150 мкм) из тяжелого сцинтиллятора CsI. Пучок протонов был распушен до необходимой величины угловой расходимости  $\sigma_x = 0,36$  мрад. Полученный таким образом расходящийся из точечного источника пучок направлялся на фокусирующую кромку кристалла, который вращался в гониометре. Эффект фокусировки и последующего отклонения расходящегося пучка фиксировался сцинтилляционным годоскопом с шагом 1,2 мм, включенным на совпадения со сцинтиллятором активной тонкой мишени и телескопом счетчиков. На рисунке (а) внизу изображен профиль пучка протонов (гистограмма расчет). Красный цвет гистограммы – для ориентированного кристалла, Синий – для разориентированного. Около  $35 \pm 5$  % частиц, падающих на фокусирующую кромку кристалла, захватывались в режим каналирования (зона маркер 1) и около  $14 \pm 3$  % частиц отклонялись затем на полный угол 1,8 мрад (зона маркер 2).

Более детальное исследование такого типа кристалла было проведено на пучке положительных пионов с импульсом 180 ГэВ/с на экспериментальной

установке UA9 на ускорителе SPS CERN. Для увеличения расходимости пучка была установлена тонкая свинцовая мишень длиной по пучку около 2 мм вблизи первой трековой станции. Установка UA9 позволяет отслеживать треки частиц, вылетающие из точечного источника, выбирая нужные события с помощью каттинга (рисунок (b) вверху справа). Среднеквадратичный размер пучка в фокальной точке ( $L_f = 12,5$  м) равен  $s_x = 0,2$  мм, а полный размер пучка в этой точке равен 3 мм. То есть, кристалл обладает свойством селективной фокусировки. Из всех треков он отклонил только порцию частиц, вылетающих из узкой полоски. Доля отклоненных частиц на полный угол составила 22%.

Эксперименты по отклонению протонного пучка с импульсом 400 ГэВ/с и пучка отрицательных пионов с импульсом 150 ГэВ с помощью отражения от мультикристаллического устройства были проведены на установке UA9 на ускорителе SPS CERN. На рисунке (d) представлено новое восьмиполосное кристаллическое устройство и схема его установки в гониометр. Все полоски изготавливались из одной кремневой кристаллической пластинки. Каждая полоска изгибалась в продольном направлении металлическим держателем и за счет анизотропного свойства кристаллической решетки, изгибалась в перпендикулярном поперечном направлении. В начале проводили сканирование пучков по горизонтальному углу  $\varphi_x$  путем вращения кристаллического устройства в гониометре, для нахождения плоскостной ориентации в кристаллическом устройстве. В итоге для плоскостной ориентации кристаллического устройства эффективность одностороннего отклонения для пучка протонов с импульсом 400 ГэВ/с составила 94%, средний угол кратного объемного отражения 68 мкрад, а для отрицательных пионов 71% и 78 мкрад соответственно. Угловая ширина для пучка протонов с импульсом 400 ГэВ/с составила 16,5 мкрад, а для отрицательных пионов 38,4 мкрад. Затем найденный угол для плоскостной ориентации фиксировали (200 мкрад) и проводили сканирование пучка по углу  $\varphi_y$  для нахождения осевой ориентации кристаллического устройства. В этом случае ось пучка и кристаллографическая ось  $\langle 110 \rangle$  находятся в одной плоскости. Происходит накопительный эффект отражения от нескольких косых плоскостей, что может увеличить отклонение траектории частицы в 3 – 5 раз (см. рисунок внизу справа). В итоге при осевой ориентации кристаллического устройства

эффективность одностороннего отклонения для протонов с импульсом 400 ГэВ/с составила 88%, а для отрицательных пионов 70%. Угловая ширина пучка: для протонов с импульсом 400 ГэВ/с  $RMS = 79$  мкрад; для отрицательных пионов с импульсом 150 ГэВ/с  $RMS = 106$  мкрад.

Таким образом, восьмиполосный дефлектор с ориентацией вблизи кристаллографической оси позволил значительно увеличить угловую ширину пучка по сравнению с рассеянием в аморфном положении, что очень важно для коллимации пучка в ускорителях. Это особенно важно для пучков отрицательно заряженных частиц из-за их низкой эффективности каналирования.

Рассмотренное ранее многополосное кристаллическое устройства подходит для мульти ГэВ-ных энергий пучков частиц. Для пучков ТэВ-ных энергий нужна цепочка последовательно расположенных кристаллов с очень близкими параметрами изгиба каждой из них. Например, для LHC необходимы кристаллы, разориентированные не более чем на 2-3 мкрад друг от друга, изогнутые на несколько десятков мкрад с радиусом изгиба около 100 метров. Для решения этой задачи была предложена новая схема изгиба, не прибегая к внешнему изгибающему устройству. На монолитную плоскую пластину кремния с помощью фрезы треугольного профиля наносились механические канавки с равномерным шагом и одинаковой глубиной. Изгиб полосок происходит за счет внутренних механических напряжений, вызванных этими канавками (эффект Тваймана), а толстая плоская подложка обеспечивает высокую точность взаимной ориентации изогнутых полосок. Глубина треугольных канавок и расстояние между канавками определяют радиус изгиба кристалла и выбираются исходя из энергии протонного пучка. Один из оптимальных вариантов нового пятиполосного кристаллического устройства для ТэВ-ных энергий протестирован на пучке 400 ГэВ протонов на установке UA9 ускорителя SPS CERN.

В итоге эффективность одностороннего отклонения для плоскостной ориентации составила 90%, а для осевой ориентации 85%. Угловая ширина пучка в осевой ориентации кристаллического дефлектора составила 50 мкрад, что почти в 3 раза больше (17 мкрад), чем для случая кратного отражения в плоскостной ориентации.



Далее рассмотрена возможность коллимации пучка в ЛНС с помощью отражений частиц в изогнутых кристаллах. Как известно на ЛНС проводятся исследования по улучшению системы коллимации пучка. Одним из способов улучшения коллимации пучка является использование для первичного коллиматора короткого изогнутого кристалла в режиме каналирования. Частицы из гало пучка, проходя через кристалл, отклоняются за счет каналирования и забрасываются во вторичный коллиматор. Такая система коллимации пучка очень чувствительна к угловому положению кристалла, к совершенству его кристаллической структуры.

В качестве первичного коллиматора для ТэВ-ных энергий может быть использовано пятиполосное кристаллическое устройство в режиме кратного отражения, рассмотренное нами ранее. Стоит отметить преимущество использования такого типа кристаллического устройства. Широкий рабочий диапазон по углам в пределах всего угла изгиба кристалла, около 30 мкрад для ЛНС. Нет необходимости подстраивать кристалл по углу для каждого цикла накопления. При этом уменьшаются требования к совершенству кристалла, так как отражение происходит в центре кристалла на малой длине порядка доли миллиметра.

В рамках верификации программы рассчитаны данные для условий эксперимента, проведенного при энергии позитронов и электронов 180 ГэВ в CERN. Расчеты при такой энергии и толщины кристалла около 1 мм требуют учета кратного излучения. На рисунке вверху представлены экспериментальные данные в сравнении с расчетами, выполненными в рамках различных моделей. Как видно из рисунка, результаты расчетов по всем моделям согласуются с экспериментальными данными. Наша модель 5 – локальное использование теории КТИ с помощью метода Монте-Карло. Также по модели 5 проведены расчеты потерь энергии на излучение для электронов с энергией 7 ГэВ для двух толщин монокристалла равных 2,5 мм и 15 мм и многополосного кристалла длиной  $6 \times 2,5 = 15$  мм. Расчеты приведены для неориентированного кристалла и для плоскостной ориентации кристалла.

Эксперимент по генерации гамма-излучения при взаимодействии пучка электронов с энергией 7 ГэВ с мульткристаллической структурой был проведен в Протвино на канале 4а ускорителя У-70. На рисунке слева вверху показана новая мульткристаллическая структура. Шесть полосок по 2,5 мм

каждая, установленных вдоль пучка, усиливают эффект излучения. Схема установки «Кристалл» на канале 4а ускорителя У-70 приведена на рисунке сверху в центре. Телескоп сцинтилляционных счетчиков –  $S_1 \& S_2 \& S_3$ ,  $S_i$  – кристаллическая сборка в гониометре,  $M$  – отклоняющий вертикальный магнит,  $C_1$ ,  $C_2$  – калориметры для определения энергии генерируемых фотонов,  $C_w$  – вольфрамовый конвертор,  $G$  – годоскоп для определения поперечных координат электронов. Вертикально-отклоняющий магнит  $M$  пространственно разделял излученные фотоны и провзаимодействовавшие электроны. Энергия фотонов измерялась черенковским калориметром из свинцового стекла  $C_2$ , калориметр  $C_1$ , изготовленный из тяжелого сцинтиллятора, так называемый предливневый детектор, использовался для режекции фона и быстрой настройки плоскостной и осевой ориентации кристаллической мишени. Для увеличения эффективности регистрации фотонов в некоторых измерениях перед калориметром  $C_1$  был установлен 5 мм вольфрамовый конвертор  $C_w$ . На рисунке внизу справа представлены потери энергии на излучение, нормированные на 1 электрон для неориентированного, плоскостного и осевого случаев ориентации мультикристаллической структуры.

В итоге продемонстрирован рост потерь энергии на излучение для плоскостного случая в 1,3 раза, для осевого случая в 2,5 раза по сравнению с неориентированным случаем.

Для защиты септум-магнитов предлагается мультикристаллическое устройство, аналогичное тому, которое использовалось для генерации излучения в режиме кратного отражения. Эксперимент был проведен на пучке протонов с энергией 50 ГэВ на канале 4-а ускорителя У70. Схема установки приведена на рисунке слева сверху. Телескоп из сцинтилляционных счетчиков  $S_1 \& S_2 \& S_3$  выделял долю частиц пучка, попадающих в кристаллический радиатор. Специальный сканирующий сцинтилляционный счетчик  $S_M$  был включен в схему совпадения с телескопом счетчиков и использовался для измерения горизонтального профиля пучка, прошедшего через кристаллический радиатор. Распределения горизонтальных координат протонного пучка с энергией 50 ГэВ были получены в двух ориентациях мультикристаллического устройства: разориентированного положения и в максимуме плоскостного объемного отражения. Разница между центрами

распределений составила 1,1 мм. Эта величина смещения соответствует углу отклонения пучка, равному  $1,1 / 7000 = 0,16$  мрад, что находится в удовлетворительном согласии с максимальным теоретическим значением этого угла, равным 0,228 мрад.

Для оценки «затенения» септума SM24 были сделаны расчеты методом Монте-Карло, в которых использовали модель взаимодействия частиц с многополосковым кристаллом. Движение частиц от кристалла до септума описывалось матрицей перехода с учетом геометрии эксперимента и структурных функций ускорителя. По нашим оценкам расчетный коэффициент «затенения» септума мульткристаллом составил 60%. На рисунке (внизу справа) показан расчетный профиль пучка выводимого перед септумом. Провал на гистограмме соответствует позиции перегородки септума.

Научная новизна результатов диссертационной работы:

- Впервые был детально изучен фокусирующий эффект новой оптики, основанный на двух типах изогнутых кристаллов. Экспериментально подтверждено, что используя обращенное направление движения частиц в фокусирующих кристаллах (фокусировка из точки в параллель), можно формировать направленные потоки вторичных частиц, генерируемых на нитевидных мишенях, без применения магнитной оптики.
- Впервые экспериментально проверена фокусировка пучка частиц высокой энергии кристаллическим устройством на расстоянии порядка 15 см.
- Впервые на вторичном пучке электронов с энергией 7 ГэВ на канале 4а У-70 проведено детальное исследование генерации высокоэнергетических фотонов на мульткристаллической структуре в режиме отражения.
- Продемонстрирована возможность использования кратного объемного отражения протонного пучка мульткристаллическим устройством для защиты септум-магнитов в ускорителях.

Научные положения, выносимые на защиту:

- Результаты исследования новой фокусирующей оптики пучков на основе двух типов кристаллических устройств.
- Результаты исследования отклоняющей системы, состоящей из многополосного кристаллического устройства в режиме кратного объемного отражения, для протонного пучка с энергией 400 ГэВ и пучка отрицательных пионов с энергией 150 ГэВ.
- Результаты испытания на выведенном пучке многополоскового устройства, разработанного в ИФВЭ для коллимации пучка в ЛНС и FCC.
- Модель расчета потерь энергии релятивистских электронов и позитронов на излучение в изогнутом монокристалле и мульткристалле.
- Результаты исследования генерации излучения высокоэнергетических фотонов, возникающего при прохождении пучка электронов с энергией 7 ГэВ через мульткристаллическую структуру в режиме кратного объемного отражения.

Спасибо за внимание.

**Н.Е. Тюрин:** Вопросы, пожалуйста.

**А.М. Зайцев:** На одном из слайдов приведена эффективность фокусирующего кристалла 35% на протонах 50 ГэВ в канале 4а ускорителя У-70. А почему эффективность не 100%, ведь вывод пучка осуществляется кристаллическим дефлектором.

**А.А. Янович:** Мы не измеряли эффективность фокусировки слабо расходящего пучка кристаллом в Протвино на канале 4а ускорителя У-70. Более детальные измерения мы проводили в CERN на ускорителе SPS установки UA-9. Для фокусировки на короткое расстояние (кристалл 2-го типа) в CERN мы, например, получили эффективность фокусировки 10% (для отклоненных частиц, прошедших вдоль полной длины кристалла). Эффективность фокусировки в данном случае определяется, во многом, начальной расходимостью пионного пучка на входе в кристалл. Кроме того, процессы деканализирования в изогнутом кристалле также уменьшают измеренную эффективность. Стоит заметить, что максимальная эффективность захвата пучка с равномерным угловым распределением в

пределах критического угла каналирования равна примерно 75% для плоскости (110) и 60% для (111). В нашем случае плоскость (111).

**Н.Е. Тюрин:** Нет больше вопросов? Слово предоставляется научному руководителю Маишееву Владимиру Александровичу.

**В.А. Маишеев:** После предложения Э.Н.Цыганова использовать отклонение заряженных частиц с помощью изогнутого кристалла, был осуществлен вывод протонных пучков с помощью изогнутых кристаллов в ряде ускорителей. Оказалось, что в изогнутых кристаллах есть и другие интересные эффекты, такие как объемное отражение и излучение в области отражения. Диссертация Андрея Антоновича посвящена изучению этих новых явлений с целью их использования в ускорительной практике и в частности, для формирования и коллимации пучков протонов, электронов и позитронов. В диссертации Андрея Антоновича представлен обширный уникальный экспериментальный материал по результатам исследования фокусирующих изогнутых кристаллов. Измерения были выполнены в ускорителе НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ и в CERN. На слайде Андрей Антонович показывал, как фокусируется пучок положительных пионов с энергией 180 ГэВ на расстоянии 15 см с коэффициентом сжатия порядка 15 раз. Уже упомянутое отражение пучков заряженных частиц обоих знаков обладает высокой эффективностью (близкой к 100 %), но малым углом отражения. Поэтому понятна целесообразность использования последовательных кристаллических структур для достижения необходимых углов поворота пучков. Именно изучению этой проблемы посвящена одна из глав диссертации. Экспериментальные исследования мультикристаллических структур в пучках отрицательных пионов с энергией 150 ГэВ и протонов с энергией 400 ГэВ показали примерно линейное возрастание угла отражения с увеличением числа кристаллов при достаточно высокой эффективности их поворота.

Другой эксперимент с ориентированной мультикристаллической структурой был выполнен на электронном пучке с энергией 7 ГэВ на ускорителе НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ и продемонстрировал заметное увеличение интенсивности тормозных фотонов по сравнению с аморфным веществом эквивалентной толщины. Согласно этим измерениям, поток фотонов был пропорционален числу кристаллов. Эти результаты с

мультистрипами являются новыми и могут быть использованы для коллимации пучков на ускорителях как адронных, так и электрон-позитронных ускорителях.

Автор принимал активное участие в подготовке и проведению исследований на канале 4а ускорителя У-70 НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ и в экспериментах на пучках частиц в CERN. Он внес заметный вклад на всех этапах работы.

Диссертация А.А. Яновича выполнена на высоком научном уровне и удовлетворяет всем требованиям, которые предъявляются ВАК к кандидатским диссертациям и ее автор, несомненно, заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

**Н.Е. Тюрин:** Спасибо, Владимир Александрович. Теперь мы переходим к оглашению письменных отзывов: ведущей организации и заключение НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ.

**В.В. Мочалов:** Зачитывает заключение организации, в которой была выполнена работа - НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, в стенограмме отмечены только основные моменты. (Заключение есть в диссертационном деле). Заключение утверждено 25 февраля 2021 г.

Диссертация выполнена Яновичем Андреем Антоновичем, научным сотрудником Отделения экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ. Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Майшеев Владимир Александрович. Янович А.А. в 1992 г. окончил физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, сдал все кандидатские экзамены: один на «отлично», два на «хорошо».

На заседании присутствовало 43 человека, среди которых 11 докторов и 15 кандидатов физико-математических наук. Результаты открытого голосования: «за» - 43 человека. «против» - 0 чел., «воздержались» - 0 чел., протокол № 1/21 от 27 января 2021 г.

Теоретическая и экспериментальная части работы представлены в диссертации в надлежащем объеме. Тематика работы полностью соответствует специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и

ускорительная техника. Диссертационная работа рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв ведущей организации – Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова». Отзыв составлен старшим научным сотрудником ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ, к.ф.-м.н. Юровым Д.С. Результаты диссертации рассмотрены и одобрены на семинаре ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ, состоявшемся 8 апреля 2021 г. В стенограмме приведены основные аспекты (отзыв ведущей организации есть в диссертационном деле). Отзыв утвержден проректором МГУ им. Ломоносова профессором А.А.Федяниным.

Ведущая организация сделала следующие основные замечания, не снижающих значимость полученных результатов:

1. В диссертационной работе уделено недостаточное внимание вопросу радиационной стойкости исследуемых кристаллических устройств и температурным нагрузкам на них во время эксплуатации. Не указаны предельные интенсивности падающего на кристаллы пучка и примерные сроки жизни данных устройств для большей части возможных применений.
2. Для магнитооптических систем, основанных на классических магнитных элементах, существуют вполне определенные соотношения, позволяющие проектировать сложные системы транспортировки пучка. Результаты выполненных автором исследований фокусирующих устройств на основе изогнутых кристаллов следовало бы обобщить в виде правил или критериев выбора параметров кристалла (толщина, радиус изгиба, угол скоса) с тем, чтобы можно было проектировать системы с определенными фокусирующими свойствами для заданной энергии пучка.
3. В тексте диссертации встречаются синтаксические ошибки.

Заключение. Диссертационная работа соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а сам Андрей Антонович Янович, безусловно, заслуживает присуждения ему

ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

**Н.Е. Тюрин:** Спасибо. Вам слово для ответа.

**А.А. Янович:** По первому замечанию хочу отметить, что вопросы радиационной стойкости и температурным нагрузкам на кристаллические устройства были рассмотрены в диссертации Чеснокова Юрия Андреевича. Теперь достаточно достоверно известно, что кристаллы выдерживают  $2 \cdot 10^{20}$  протон/см<sup>2</sup>. Также в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, например, на 14 канале, кристалл простоял в кольце примерно 10 лет. Кристалл может выдерживать потоки частиц порядка  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. При этом температура кристалла увеличится и будет равна около 100°C. В национальной лаборатории им. Ферми измерили длину деканалирования при комнатной температуре и при -145 °C для 200 ГэВ частиц при угле поворота 35 мрад. Длина деканалирования была меньше на 50% при комнатной температуре.

По второму замечанию я частично согласен, что результаты выполненных исследований фокусирующих устройств на основе изогнутых кристаллов следовало бы обобщить в виде правил или критериев выбора параметров кристалла. Стоит отметить, что испытанные кристаллические устройства разработаны и изготовлены в ОП НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, и их описание можно найти в наших работах. Но пока рано делать обобщение для всех рассмотренных кристаллических устройств, так как исследования по их совершенству продолжаются и сейчас.

С третьим замечанием я полностью согласен.

**Н.Е. Тюрин:** Спасибо. Слово предоставляется официальному оппоненту из Белгородского университета, доктору физ.-мат. наук Кубанкину Александру Сергеевичу.

**А.С. Кубанкин:** Добрый день, уважаемые коллеги. Диссертационная работа выполнена на высоком уровне, можно считать ее классической, когда есть постановка новой задачи, ее проработка, теоретические выкладки и в дальнейшем все заканчивается экспериментальными исследованиями. Также важно отметить, что многие работы прошли апробацию в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ на ускорителе У-70.



Общим замечанием к работе является отсутствие желаемого более подробного описания уникальных приборов и устройств, использованных в экспериментах. Например, в работе упоминается гониометр высокого разрешения, но технические характеристики не приводятся. Подобные особенности являются техническими и не меняют общего высокого уровня выполненной научной работы.

Подводя итог необходимо отметить, что качество и значимость выполненных работ соответствует современному мировому уровню, при этом, объём проведенных исследований существенно превышает типичные нормы, предъявляемые к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. Результаты работы являются новыми и вносят существенный вклад в развитие физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники.

Считаю, что диссертационная работа является законченным научным исследованием, актуальна, обладает достаточной научной новизной, представляет научный и практический интерес, полностью соответствует требованиям ВАК РФ. Автор диссертации А.А. Янович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 - Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. (Полный отзыв имеется в диссертационном деле).

**Н.Е. Тюрин:** Спасибо, Александр Сергеевич. Андрей Антонович. Вам предоставляется слово для ответа.

**А.А. Янович:** Я полностью согласен с замечанием Александра Сергеевича, что в диссертационной работе отсутствует более подробное описание приборов и устройств, использованных в экспериментах. Подробное описание есть в опубликованных статьях. Для гониометра высокого разрешения я указал его основной параметр, точность около 2 мкрад.

**Н.Е. Тюрин:** Хорошо, спасибо. Теперь официальный оппонент из НИЯУ МИФИ, кандидат физ.-мат. наук Тищенко Алексей Александрович.

**А.А. Тищенко:** Добрый день, уважаемые коллеги. Я ознакомился с работой Андрея Антоновича. Его работа действительно интересна потому, что это продолжение экспериментальных исследований, которые представляются мне очень красивыми. 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. Идея очень простая и главное было показано, что она может быть реализована. Были созданы и испытаны несколько образцов многополосного кристаллического устройства, рассчитанных конкретно под технические требования системы локализации ЛНС. Также, был рассмотрен важный прикладной аспект – защита (септум) магнитов. Показано, что использование объемного отражения пучка протонов в мульткристаллическом устройстве вполне реалистично для решения данной задачи. Работа производит хорошее впечатление. 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.
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?

На мой взгляд, отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки, приведенных Яновичем А.А. исследований. 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.

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. (Полный отзыв имеется в диссертационном деле).

**Н.Е. Тюрин:** Спасибо, Алексей Александрович. Так, пожалуйста, Вам слово для ответа.

**А.А. Янович:** По первому пункту я полностью согласен. Действительно, в диссертации много стилистических и грамматических ошибок. По второму пункту для объяснения приведу слайд. На рисунке приведены угловые аксептансы главных плоскостных каналов в монокристалле кремния вдоль  $\langle 001 \rangle$  кристаллографической оси. Частицы с углами входа в кристалл меньше чем угол  $\alpha_c$  (т.е. внутри красного круга) движутся под влиянием аксиального поля оси. Частицы, попавшие в кристалл внутри синей фигуры, движутся под влиянием электрического поля плоскости (001). В эту область попадают частицы с углами (по у плоскости) много больше, чем  $\alpha_c$ , где  $\alpha_c$  - критический угол аксиального каналирования. Из таких соображений и использовался критический угол аксиального каналирования.

**Н.Е. Тюрин:** Переходим к общей дискуссии. Есть ли желающие выступить? Нет? Спасибо. Тогда Вам слово для заключения.

**А.А. Янович:** Мне хочется выразить благодарности моему научному руководителю Маишееву Владимиру Александровичу, я считаю, что без его активного участия диссертация не была бы на таком высоком уровне. Также большой вклад в диссертацию внес Чесноков Юрий Андреевич, который руководил всей работой, связанной с диссертацией и в целом создал творческий коллектив, в который вошли люди, работающие в разных отделах нашего института. Отдельная благодарность Бритвичу Геннадию Ивановичу за экспертную поддержку. Большое спасибо Дуруму Артуру Андреевичу, Костину Михаилу Юрьевичу за большой вклад в проведении экспериментов на канале 4а ускорителя У-70. Также выражаю благодарность Качанову

Василию Александровичу, Узуняну Андрею Вартановичу, которые внесли замечания в текст диссертации.

**Н.Е. Тюрин:** Спасибо. Теперь мы должны выбрать счётную комиссию. Предложения такие: В.А. Качанов, В.Ф. Образцов, Л.М. Ткаченко.

(Комиссия избрана)

Объявляется перерыв на голосование. После перерыва.

**Тюрин Н.Е.:** Давайте послушаем итоги голосования.

**Председатель счётной комиссии Образцов В.Ф.:** Протокол заседания счетной комиссии. Состав комиссии: Качанов В.А., Образцов В.Ф., Ткаченко Л.М. На заседании присутствовало 18 членов совета, из них докторов наук по профилю диссертации - 5, роздано бюллетеней - 18, осталось не розданных бюллетеней - 4, оказалось в урне бюллетеней - 18. Результаты: «за» - 17, «против» - 0, недействительных - 1.

Диссертационный совет утверждает результаты голосования.

**Н.Е. Тюрин:** Теперь мы должны принять открытым голосованием Заключение диссертационного совета о научном значении диссертации. Оно подготовлено, члены совета ознакомились. Есть замечания у членов совета? Нет замечаний? Тогда открытым голосованием проголосуем за это заключение.

Проходит открытое голосование.

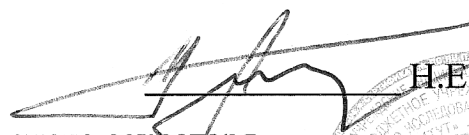

**Н.Е. Тюрин:** Андрей Антонович, поздравляю Вас с успешной защитой и новых Вам достижений. Спасибо.

Заседание диссертационного совета завершено.

Председатель диссертационного совета,  
доктор физ.-мат. наук, профессор

Временно исполняющий обязанности ученого секретаря  
диссертационного совета доктор физ.-мат. наук

12 мая 2021 г.

  
Н.Е. Тюрин  
  
В.В. Мочалов  
