

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

12 мая 2021 г.

Заседание Диссертационного совета

Д 201.004.01

Протокол №2021-6

Стенограмма заседания Диссертационного совета Д 201.004.01

Защита диссертации Холоденко Сергея Анатольевича
«Система сцинтилляционных годоскопов эксперимента NA62»
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.23 - физика высоких энергий

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

Секретарь: временно исполняющий обязанности ученого 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:

1. ТЮРИН Н. Е., доктор физ.-мат. наук, 01.04.02 — председатель;
2. ЗАЙЦЕВ А. М., доктор физ.-мат. наук, 01.04.23 — заместитель председателя;
3. МОЧАЛОВ В. В., доктор физ.-мат. наук, 01.04.23 — врио ученого секретаря;
4. АРБУЗОВ Б. А., доктор физ.-мат. наук, 01.04.02;
5. ДЕНИСОВ С. П., доктор физ.-мат. наук, 01.04.23;
6. ЗАЙЦЕВ Ю. М., доктор физ.-мат. наук, 01.04.23;
7. ИВАНОВ С. В., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20;
8. КАЧАНОВ В. А., доктор физ.-мат. наук, 01.04.23;
9. КОЗУБ С. С., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20;
10. ОБРАЗЦОВ В. Ф., доктор физ.-мат. наук, 01.04.23;
11. ПЕТРОВ В. А., доктор физ.-мат. наук, 01.04.02;
12. ПЕТРУХИН А. А., доктор физ.-мат. наук, 01.04.23;
13. РАЗУМОВ А. В., доктор физ.-мат. наук, 01.04.02;
14. САВРИН В. И., доктор физ.-мат. наук, 01.04.02;
15. СЕНЬКО В. А., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20;
16. ТКАЧЕНКО Л. М., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20;
17. ТРОШИН С. М., доктор физ.-мат. наук, 01.04.02;
18. ФЕЩЕНКО А. В., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20.

Диссертационный совет Д 201.004.01 утвержден 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 7 докторов наук по специальности 01.04.23 - физика высоких энергий, кворум имеется. На заседании присутствует также официальный оппонент кандидат физ.-мат. наук Алексеев Игорь Геннадьевич.

Н.Е. Тюрин объявляет повестку дня: Защита кандидатской диссертации Сергея Анатольевича Холоденко «Система сцинтилляционных годоскопов эксперимента NA62» по специальности 01.04.23 - физика высоких энергий. Оппоненты: д.ф.-м.н., профессор Ольшевский А.Г., к.ф.-м.н. Алексеев И.Г. Ведущая организация: ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск).

В.В. Мочалов представляет материалы, имеющиеся в деле: решение диссертационного совета о принятии к защите диссертации, заключение организации, где выполнялась работа (НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ). Ведущая организация — ИЯФ им. Будкера. Оппоненты: Ольшевский Александр Григорьевич и Алексеев Игорь Геннадьевич. Один оппонент лично присутствует, от второго оппонента имеется письменный отзыв. Также представлено письмо подтверждения от коллаборации NA62 о том, что работы, включенные в состав диссертации, разрешается использовать от имени коллаборации для защиты. Диссертация принята к защите на заседании диссертационного совета 09.03.2021, протокол №2021-3.

Н.Е. Тюрин предоставляет слово С.А. Холоденко.

С.А. Холоденко: Здравствуйте. Я начну с небольшого введения. NA62 — эксперимент про каоны, каонная физика. История каонной физики достаточно длинная и берет своё начало, по видимому, с первого экспериментального наблюдения в эксперименте Луи Лепринс Ренге (Louis Lepinse-Ringuet) и Мишель Л'Эритье (Michel L'Héritier), который был проведен в 1943 году. В эксперименте было наблюдение частицы с массой ($990 \pm 12\%$) масс электрона, измеренное по упругому рассеянию на веществе газа камеры. Это было за четыре года до того, как Рочестер (Rochester) и Батлер (Butler) наблюдали распад $K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$. После этого было много открытий, которые были отмечены множеством премий, в том числе и Нобелевских. Именно физика каонов поспособствовала формированию теории, которую мы сегодня называем Стандартной Моделью. Описание экспериментальных данных по осцилляциям привело к предсказанию наличия четвертого, значительно более тяжелого s -кварка. CP -нарушение — к вводу третьего поколения кварков, которое дало возможность ввести нетривиальную комплексную фазу в матрицу смешивания, позволяющую описывать наблюдаемые как прямые, так и косвенные эффекты CP -нарушения. Унитарность матрицы кваркового смешивания является математической основой подавления кварковых переходов с изменением аромата через нейтральные токи (FCNC). Тем не менее, процессы типа FCNC возможны во втором порядке через промежуточные u , c и t кварки. В физике каонов примером такого распада являются распады $K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$ (заряженная и нейтральная моды). Соответствующий унитарный треугольник представлен на слайде внизу. Что особенно интересно, параметры этого треугольника могут быть независимо определены по распадам B - и K - мезонов.

Вероятность распада в рамках Стандартной Модели для заряженной моды в амплитуде имеет мнимую часть от t -кварка, а в реальной части вклады от c - и t -кварков. В то время как для нейтральной моды в амплитуде остается лишь мнимая часть от t -кварка. Процесс описывается тремя основными диаграммами: две пингвинные и одна боксовая (box). Гроссман (Grossman) и Нир (Nir) вывели соотношение брэнчингов, позволяющее, зная относительную вероятность заряженной моды, получать ограничение на нейтральную и наоборот.

Существует множество моделей расширения Стандартной Модели, которые имеют разный вклад в распады $K \rightarrow \pi\nu\bar{\nu}$, которые можно разделить на три класса. Как показано на слайде, важно измерять не одну моду, а корреляцию двух — заряженной и нейтральной.

Таким образом, мы перешли к актуальности темы. Перспективным направлением по поиску эффектов Новой Физики являются прецизионные измерения редких, но в то же время предсказываемых с высокой точностью процессов. Таким процессом является распад $K \rightarrow \pi\nu\bar{\nu}$. На слайде представлены предсказания в рамках Стандартной Модели и экспериментальные результаты, без учета NA62. Главной целью эксперимента NA62 является измерение относительной вероятности распада $K^+ \rightarrow \pi^+\nu\bar{\nu}$ с точностью не хуже теоретического предсказания — 10%. Для исследования процессов с относительной вероятностью 10^{-10} , с учетом акцептанса установки на уровне 10%, необходимо 10^{13} распадов каонов в зоне установки и подавление фоновых процессов на уровне 10^{12} . Достичь такой статистики за ограниченное время возможно только при работе с пучком высокой интенсивности, что накладывает ряд требований на детекторы и электронику.

Цель работы: создание и обеспечение стабильной работы системы сцинтилляционных годоскопов, для исследования сверхредких распадов каонов и подавления фона. Система состоит из четырех детекторов:

- Быстрый мюонный вето-годоскоп MUV3 — подавления на уровне триггера событий с мюонами в конечном состоянии;
- Годоскоп заряженных частиц CHOD — регистрация множественности и входная информация для «on-line» идентификации RICH, а также вето по совпадению координат в годоскопах CHOD и MUV3. Требуется временное разрешение порядка 1 нс. Есть ограничение по количеству вещества;
- Вето-годоскоп MUV0 — герметизация установки от мюонов из цепочки распадов $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-$, когда один из пионов “теряется”, а отрицательный распадается $\pi^- \rightarrow \mu^-\bar{\nu}_\mu$. Отрицательный мюон рассеивается полем спектрометрического магнита и оказывается вне апертуры основных детекторов;
- Вето-годоскоп ANTI-0 — герметизация установки от частиц гало пучка.

Эксперимент NA62 является преемником экспериментов NA48 и NA31, которые берут своё начало с 1987 года, когда исследовали прямое CP -нарушение. Экспериментальная установка находится в северной зоне ЦЕРН. Выведенный протонный пучок падает на берилиевую мишень, вторичный адронный пучок по вакуумной камере поступает в зону установки. Нераспавшиеся в зоне установки частицы выводятся по вакуумной камере. Пучковые частицы идентифицируются дифференциальным черенковским счетчиком KTAG, импульс измеряется пучковым спектрометром GTK. Частицы проходят через вето-счетчики ANTI-0 и CHANTI и поступают в распадный объем с охранной системой LAV. Затем следуют: основной спектрометр, RICH, годоскоп CHOD, MUV0 вне апертуры остальных детекторов, жидко-криптонный электромагнитный калориметр LKг, два адронных калориметра MUV1 и MUV2, железный фильтр и быстрый годоскоп MUV3. Все четыре годоскопа расположены в разных частях установки. Вторичный пучок имеет импульс 75 ГэВ/с и интенсивность 750 МГц, длительность вывода 3.5 с.

Годоскоп CHOD. Основные требования — общая загрузка 10 МГц, из чего следует падовая структура, временное разрешение порядка 1 нс «on-line», это важная поправка. Чувствительная область задается размерами электромагнитного калориметра, есть ограничение по веществу и числу каналов — не более 320 (финансовые ограничения). На слайде представлены два распределения. Слева — ожидаемая загрузка детектора в МГц при работе с пучком номинальной

интенсивности, в центральной области счетчики имеют загрузку 1 МГц. Справа — акцептанс к сигнальному распаду $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ в промилле, где область, выделенная красным, может быть исключена из триггера. Это позволит значительно подавить счет при малой потере в акцептансе. В период 2013 — 2014 годы проведено множество измерений с разной геометрией, методами вычитывания, фотоприемниками. На следующих слайдах я представляю лишь основные, которые имели большое влияние на финальную конструкцию. Первое, что я упомяну, это исследования на гало 21 канала — зона установки «ОКА» (ускоритель У-70, Протвино, НИЦ «Курчатовский Институт» —ИФВЭ). Исследовали с помощью маленького запускающего счетчика, перемещая по чувствительной плоскости исследуемого образца и исследуя неоднородности в откликах по времени и амплитуде. Стоит отметить неоднородность отклика по времени, которая составляет примерно 67 ± 20 пс на сантиметр расстояния до фотоприемника.

Более детальное исследование проводили уже на космических лучах в конце 2013 года, из-за отсутствия пучка, на стенде с трековой системой. Все постепенно приобретало облик целого эксперимента: запускающие счетчики, трековая система (две станции камер с двумя координатами каждая) и исследуемый прототип между ними. В качестве времязадающего счетчика использовали черенковский счетчик на основе Плексигласа и быстрого ФЭУ XR2020Q. Два исследуемых прототипа: 267×107 мм² с оптоволоконным съемом и кремниевым фотоумножителем (SiPM) Hamamatsu и второй — вдвое меньший по площади и с прямым светосбором с диагональных срезанных углов и SiPM SensL с чувствительной площадью 6×6 мм². При использовании спектросмещающих волокон естественно использовать декартову систему координат — одну ось направляем по направлению волокон, вторую поперек. Время отклика на проходящую частицу зависит от координаты вдоль волокна как 4.0 ± 1.5 нс/м, что соответствует времени распространения света в волокне. Все остальные распределения достаточно равномерные. Вдоль волокна есть какое-то затухание, но для одного SiPM оно видно, а для второго не наблюдается. Поперек волокон видны небольшие всплески, которые соответствуют шагу между волокнами. Если ввести динамический диапазон амплитуды как отношение максимума к минимуму, то получается примерно 1.1. Временное разрешение 610 пс для худшего из SiPM, а при использовании среднего времени между двумя фотодетекторами получается 370 пс. Для прямого светосбора ситуация несколько отличается, тут логично использовать полярную систему координат. Слева представлены два распределения — амплитуда и среднее время срабатывания SiPM в зависимости от координаты проходящей частицы. Хорошо видно на распределении времени срабатывания от расстояния до SiPM, что первые четыре сантиметра значительно отличаются от остальной части. Временное разрешение при использовании одного SiPM составляет порядка 400 пс. Если использовать среднее время, получается 300 пс, но имеется сильный разброс среднего времени. Динамический диапазон оценивается в 3.5. Для корректного сравнения двух результатов введен параметр минимальной длительности триггерных ворот и показано, что волоконный съем сигнала наиболее эффективен. По результатам обсуждения на коллаборационном совещании в декабре 2013 года принято решение использовать спектросмещающие волокна, а для исключения наличия активных элементов в чувствительной зоне детектора все SiPM и предусилители должны быть на периферии. К сеансу 2014 года мы должны были сделать прототип, содержащий 10% всех счетчиков.

К пилотному сеансу 2014 года мы сделали прототип. На слайде представлен процесс монтажа, установки в экспериментальном зале. Всего 17 счетчиков, один из них запасной, а 16 используется. Основная часть сделана с использованием спектросмещающих волокон VCF-92, один с Y11 и

один с комбинацией короткого VCF-92 с переходом на прозрачные транспортные VCF-98. Стоит отметить, что в эксперименте нет модулей амплитудного анализа (ADC), потому что работа с высокой интенсивностью противоречит длинным воротам ADC. Поэтому используются только временные метки. И либо оцифровывается весь сигнал, либо, как в случае с LAV, используется двухпороговый дискриминатор, позволяющий измерять время над порогом. Таким образом, на каждый импульс имеется четыре временные метки. Для оценки числа фотоэлектронов делается зависимость эффективности регистрации от порога и фит функцией Ферми. Как параметр фита получается величина порога в мВ, который должен быть переведен в фотоэлектроны. Для этого используется зависимость скорости счета темнового шума SiPM от порога, где очень хорошо видно, как ступенчато зависит темновой шум. В результате проведенных исследований был выявлен ряд недостатков: волокна было решено заменить на Y11 type S, которые обладают повышенной гибкостью, вывод волокон с пластины должен быть в одну сторону, для предотвращения провисания нужно соответствующим образом крепить счетчики и необходимо обеспечить зеркальную полировку сцинтиллятора.

На этом слайде я представляю финальную конструкцию детектора. Счетчики организуются в ряды, ряды располагаются по обе стороны от центральной мембраны из материала, который называется G10. На слайде представлены фотографии процесса монтажа годоскопа в экспериментальном зале, фотографии установленного детектора, стоек с электроникой, где наши — две правые, и нижняя часть годоскопа без светоизоляции. В первом сеансе годоскоп успешно работал. Для оценки эффективности его работы использовался распад $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$, который набран с контрольным триггером. Слева представлены зависимости эффективности от координат проходящих частиц для выбранного счетчика. Если сделать фит функцией Ферми с двух сторон и принять точку перегиба как край счетчика, то можно восстановить размеры счетчика, которые хорошо согласуются с физическими. Справа представлена карта временного разрешения счетчиков от их положения. К сожалению, из-за особенностей критериев отбора правые счетчики не проанализированы — надо менять критерии отбора. Все счетчики удовлетворяют требованию временного разрешения менее 1 нс. Один из временных спектров показан справа. Общий счет при работе с пучком номинальной интенсивности составляет 40 миллионов за сброс для годоскопов CHOD и MUV3.

Говоря про результаты сеанса, стоит также упомянуть и основной результат. В результате анализа данных первого сеанса 2016 — 2018 гг. зарегистрировано 20 кандидатов событий с распадом $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ с ожидаемым уровнем фона 7 событий. Результат был представлен на конференции ICHEP 2020. Справа приводится таблица для данных 2018 года, где есть ожидаемое число событий сигнального распада, ожидаемый фон составляет 5.28, из которых 3.3 так называемый upstream — это гало пучка. Подавление существенного вклада от гало планируется в три действия: замена одного из коллиматоров, который был установлен в июле 2018 года (в данных 2016 и 2017 годов его нет), а также установка годоскопа ANTI-0 и станций ANTI-Counters для оффлайн анализа.

Годоскоп ANTI-0 начал обсуждаться еще раньше. В сентябре 2016 года группа коллег, которые в основном заняты в эксперименте SHiP, предложили провести серию измерений по поиску экзотических долгоживущих состояний, они их называют ALPs — axion like particles, образование которых возможно в результате взаимодействия первичного протонного пучка с веществом мишени. Для этого необходимо закрыть коллиматоры и использовать детектор NA62 с небольшим дополнением — вето стенкой на входе. Мной был проведен анализ влияния гало на выработку

триггера годоскопом CHOD, а также проведена оценка загрузки возможного детектора при его расположении на входе в распадный объем. Представлен слайд одной из моих презентаций, где все четыре вклада от распадов K^- , K^+ , π^+ и π^- представлены в плоскости входа в распадный объем. Справа — предложенная схема детектора. Размер ячейки определяется ограничением загрузки в 1 МГц. Общее количество каналов 288, что хорошо согласуется с ограничением в одну корзину электроники. Центральная часть свободна под пучковую вакуумную камеру и дополнительно герметизируется счетчиками ANTI-Counters. Было проведено достаточно детальное моделирование счетчика. Исследованы варианты различной длины световодов: 20 мм и 40 мм. Видно, что чем больше становится световод, тем становится лучше однородность, но есть физическое ограничение — мы не можем сделать световод больше, чем половина сцинтиллятора. Проведены исследования при использовании одного, двух и четырех SiPM. Конечно, чем больше SiPM, тем лучше. Ввиду нелинейности ценообразования, удвоение числа SiPM от двух до четырех приводит к незначительному, менее 10%, увеличению полной стоимости годоскопа. Приведен слайд с одной из моих презентаций на коллаборационном совещании. Ожидаемое временное разрешение составляет 150 пс, по результатам Монте-Карло. Переходим к конструкции детектора. Счетчики располагаются в этот раз не рядами, а полностью в шахматном порядке по двум сторонам алюминиевого листа. Так как ограничения по веществу нет, то используется достаточно толстый слой алюминия. На слайде представлены фотографии годоскопа, сборка которого полностью завершена в декабре 2020 года. Сейчас годоскоп установлен в экспериментальном зале. Начало сеанса — 12 июля этого года. Конструкция счетчика: сцинтилляционная пластина, два световода, SiPM вставляются в углубления и объединены попарно в параллельно-последовательное соединение. Сигнал с каждой пары поступает на предусилитель и через аналоговое «ИЛИ» вычитывается как один канал электроники. Один счетчик — один канал электроники.

Один из счетчиков был исследован на тестовом пучке в ДЕЗИ (DESY, г. Гамбург) в ноябре 2020 года. Пучок электронов входит на канал, проходит через трековую система (три станции камер) и исследуемый прототип в конце канала. В качестве времязадающего счетчика используется два счетчика на основе цилиндра из Плексигласа и МКП-ФЭУ производства «КАТОД» (г. Новосибирск), за что отдельная благодарность Александру Юрьевичу и Михаилу Юрьевичу Барняковым. Распределение разности времен регистрации сигналов с запускающих счетчиков описывается Гауссианом с дисперсией 26 пс, что, при условии их идентичности, означает, что временное разрешение каждого составляет $26/\sqrt{2}$ пс, а при использовании среднего времени регистрации дисперсия временной метки составляет 13 пс, что бесконечно точно для этой конкретной задачи. Представлено два распределения с зависимостями среднего времени регистрации сигнала и средней амплитуды от координат проходящих частиц. Видно, что по времени есть небольшая неоднородность, а по амплитуде ситуация гораздо лучше. Максимальный разброс среднего времени составляет 294 пс. Временное разрешение составляет 170 ± 2 пс, а временное разрешение, усредненное по всей площади детектора, можно оценить как 191 пс.

Было проведено множество исследований как на космических лучах, так и на выведенных пучках в паразитном режиме. Часть исследований проведена с группой SHiP Muon Veto в ЦЕРН East Area, с группой LHCb Ecal на канале H8 в ЦЕРН, на гало пучка в экспериментальном зале ECN3 (зона NA62) и на гало 21 канала (зона установки «ОКА»).

Я перехожу к заключению. Разработана, создана и успешно эксплуатируется система сцинтилляционных годоскопов эксперимента «Фабрика Каонов» NA62. «Фабрика Каонов» — официальное название эксперимента. Проведен анализ эффективности работы годоскопа по экспе-

риментальным данным первого сеанса, для этого отбирался распад $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$, набранный с контрольным триггером. Благодаря успешной работе всех подсистем, в первом сеансе зарегистрировано 20 событий распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ при уровне ожидаемого фона 7 событий. Основной вклад дают частицы гало пучка. Проведен анализ влияния частиц от распадов π и K мезонов в голове канала, по результатам которого коллаборации предложен вето-годоскоп ANTI-0, варианты возможной конструкции и оценка ожидаемой загрузки. Разработана конструкция счетчика, в которой регистрация света осуществляется группой из четырех кремниевых фотоумножителей большой площади, объединенных в параллельно-последовательное соединение. Исследования проводились как моделированием, так и на выведенном пучке в лаборатории DESY. Создан и установлен в экспериментальном зале новый вето-годоскоп ANTI-0, способный работать при высоких нагрузках с временным разрешением порядка 200 пс. У меня все, спасибо.

Н.Е. Тюрин: Спасибо. Вопросы?

А.А. Дурум: Скажите, в чем глубокий смысл двух VCF: VCF-92 + VCF-98?

С.А. Холоденко: Дело в том, что световыход и затухание в волокне VCF-92 сильно отличаются от Y11. Сигнал очень слабый, если волокно длинное. Мы пытались максимизировать количество света, получаемого с пластины, и исследовали переход VCF-92 на прозрачное волокно. В принципе, при длине волокна от 2 м это имеет смысл. Это здесь не показано, но упоминается в диссертации. При наших длинах от 135 см до 2 м это очень сложная игра — потери света на стыках спектросмещающего и прозрачного транспортного волокон очень велики, поэтому от этого мы отказались. Но задача была максимизировать световыход.

Н.Е. Тюрин: Сергей Петрович, вам слово.

С.П. Денисов: Какой сейчас статус эксперимента? Можете кратко описать? Он окончен?

С.А. Холоденко: Эксперимент успешно прошел первый сеанс. Сейчас готовится ко второму сеансу с 12 июля этого года. Планы были представлены на рабочем совещании Physics Beyond Colliders workshop весной этого года. Эксперимент будет работать до следующей остановки (LS3) как минимум. Если говорить про дальнейшие планы, есть два варианта: переход на так называемую моду NA62 \times 4, т.е. поднятие интенсивности еще в 4 раза при условии, что КОТО с нейтральной модой ($K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$) будет иметь успех. Либо, если у КОТО успехов не будет, есть вариант перехода NA62 на нейтральную моду и исследование $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$.

Н.Е. Тюрин: Спасибо большое. Слово научному руководителю Владимиру Федоровичу Образцову.

В.Ф. Образцов: Сергей Анатольевич у нас появился в лаборатории после окончания МИФИ. С большим удовлетворением мы увидели, что он практически был готовым физиком - экспериментатором, что бывает достаточно редко. Видимо, это связано с тем, что так учили на 40-ой кафедре в МИФИ у Бориса Анатольевича Долгошеина. Он сразу включился в практическую работу на установке «ОКА». Это в диссертацию не вошло, по понятным причинам. Он сделал с нуля систему измерения магнитного поля нашего большого магнита СП-40. Написал мат. обеспечение, провел сеанс практически один, мы помогали в ночных сменах. И в итоге сейчас новую карту магнитного поля мы широко используем. Это было достаточно нетривиально. Он появился в тот период, когда мы полностью легализовали свое участие в эксперименте NA62 и начал там также весьма успешно работать. Он включился еще на стадии, когда мы работали над мюонным годоскопом MUV0. А потом фактически стал главным действующим лицом нашего участия в этом эксперименте, а именно: конструирование, производство и обслуживание системы годоскопов. Естественно, есть участие и в обработке. Сергей Анатольевич, в основном, сконцентрировался

на этом направлении. Как вы видели, объем работы большой, все это работает и более того, имеет применение. Новый мюонный прибор ANTI-0 готов к сеансу. И мы надеемся, что все это поможет эксперименту достичь цели — 10% точности измерения брэнчинга суперредкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$. Еще я могу сказать, что Сергей Анатольевич пользуется большим уважением не только в нашем коллективе, но и в коллективе NA62. Там очень выдающийся состав: в частности, до недавнего времени там был Джек Стейнбергер, Нобелевский лауреат, активно участвует Итало Маннелли, которого многие знают и который был заместителем директора ЦЕРН по науке. И такого уровня еще Луиджи Ди Лелла, бывший спонсор UA2 и другие. Мы с ними достаточно плотно контактируем, и Сергей Анатольевич пользуется у них заслуженным уважением. Я считаю, что он готовый физик-экспериментатор, который безусловно достоин стать кандидатом наук по нашей специальности.

Н.Е. Тюрин: Спасибо. Теперь, пожалуйста письменные отзывы.

В.В. Мочалов: У нас есть три письменных отзыва, которые являются обязательными: заключение организации, где выполнялась работа, отзыв ведущей организации и отзыв одного отсутствующего оппонента, который я тоже зачитаю.

В.В. Мочалов зачитывает заключение организации, где выполнялась работа (НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ)

По результатам обсуждений на семинаре отделения экспериментальной физики принято следующее заключение:

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне при непосредственном участии соискателя. При активном участии автора разработаны и созданы падовые сцинтилляционные годоскопы (MUV0, MUV3, CHOD и ANTI-0), способные работать при высоких (~ 10 МГц) загрузках. Автор принимал активное участие как на этапах подготовки эксперимента к сеансу, так и во время проведения самого эксперимента на протяжении сеанса 2016-2018 гг, являясь экспертом системы сцинтилляционных годоскопов. По ходу сеанса автором проводился мониторинг эффективности работы системы годоскопов. Результаты докладывались автором на конференции в Новосибирске. Автором методом Монте-Карло был проведен анализ распадов π и K – мезонов, происходящих в голове канала, предложено создание вето-годоскопа на входе в распадный объем детектора и проведена оценка загрузки этого годоскопа. В рамках проекта был разработан счетчик с прямым светосбором через короткие световоды, что позволило получить однородные амплитудные и временные спектры. В результате при активном участии автора был создан годоскоп ANTI-0, этапы разработки и испытания докладывались на другой конференции, тоже в Новосибирске. Материалы, представленные в диссертации, опубликованы в шести рецензируемых печатных изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus. В том числе Приборы и техника эксперимента и пять работ в Journal of Instrumentation. Заключение принято на заседании семинара Отделения экспериментальной физики. На заседании присутствовали 27 человек, среди которых 10 докторов и 6 кандидатов физико-математических наук. Результаты открытого голосования: «за» — 27 чел., «против» — 0 чел., «воздержались» — 0 чел. Таким образом семинар подтвердил, что теоретическая и экспериментальная части работы представлены в диссертации в надлежащем объеме. Тематика работы полностью соответствует специальности 01.04.23 - физика высоких энергий. Диссертационная работа рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Заключение утверждено директором НИЦ «Курчатовский Институт» — ИФВЭ С.В.Ивановым.

Отзыв ведущей организации — Федерального государственного бюджетного учреждения нау-

ки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН). Отзыв подготовлен доктором физ.мат наук, главным научным сотрудником Борисом Альбертовичем Шварцем и утвержден директором Института Павлом Логачевым.

В.В. Мочалов зачитывает отзыв ведущей организации.

Диссертационная работа Холоденко Сергея Анатольевича относится к актуальной области физики элементарных частиц – поиску отклонений от предсказаний Стандартной Модели и поиску Новой Физики в редких распадах адронов. Рассматриваемая диссертационная работа посвящена разработке и созданию подсистем экспериментальной установки NA62 (ЦЕРН), на которой проводится эксперимент по прецизионному измерению вероятности сверхредкого распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$. Расчет в рамках Стандартной Модели дает для этой величины значение 8.4×10^{-11} . Для достижения целей данного эксперимента необходим набор данных, соответствующий 10^{13} распадов при уровне подавления фона 10^{12} . В диссертации описаны разработки, создание и опыт эксплуатации системы годоскопов эксперимента NA62. Представлен анализ работы годоскопа в первом сеансе, полученные в этом сеансе результаты и перспективы дальнейших исследований. Актуальность данной диссертационной работы связана с важностью определения области применения Стандартной Модели и с поиском явлений, не описанных этой моделью. Научная новизна определяется тем, что до настоящего времени не было измерений изучаемого процесса с заявленной точностью на уровне 10%. Такая точность накладывает особо жесткие требования на экспериментальную установку, в первую очередь это требование высокой эффективности регистрации событий при подавлении фона на уровне 10^{12} . В рамках работы разработаны, созданы и эксплуатируются четыре годоскопа, которые позволяют проводить исследования при большой интенсивности. Научная и практическая ценность работы заключается в том, что разработанная и созданная система годоскопов позволяет исследовать редкие и сверхредкие распады каонов в составе экспериментальной установки NA62. Результаты данной работы и разработанные методы могут быть использованы для создания подобных детекторов в экспериментах на LHC, U-70, NICA и в других лабораториях. Личный вклад автора диссертации в описанное исследование является определяющим. Вынесенные на защиту результаты получены автором лично либо при его определяющем участии. Достоверность полученных в данной работе результатов не вызывает сомнений. Она подтверждена многочисленными измерениями параметров отдельных сцинтилляционных пластин и прототипов с использованием космических частиц и тестовых пучков. В целом работа выполнена на высоком уровне, изложена ясно и хорошим языком. При этом к работе имеется несколько замечаний.

- На стр. 22, в разделе «Цель работы», написано, что «целью диссертационной работы является создание и обеспечение стабильной работы системы сцинтилляционных годоскопов для эксперимента NA62», состоящей из четырех детекторов. Далее эти детекторы перечисляются. Эти четыре годоскопа упомянуты также в разделах «Научная новизна» и «Практическая значимость». Однако под заголовком «Положения, выносимые на защиту» упомянуты только два детектора — CHOD и ANTI-0, работы с которыми подробно описаны в главах 2-4. Следовало бы дать какие-то пояснения или не упоминать MUV3 и MUV0 среди целей данной работы, так как описанных в данной работе исследований с двумя годоскопами вполне достаточно для кандидатской диссертации.
- На стр. 56 описаны сцинтилляционные пластины, изготовленные из 3-х блоков сцинтиллятора СЦ-1. Было бы полезно написать что-то о размере блоков, а также о процедуре резки и полировке граней. Об этом остается только догадываться, глядя на замечательную

фотографию Рис. 1.30.

- В разделе 2.1 среди факторов, влияющих на временное разрешение, не упомянута статистика фотоэлектронов (разброс времен появления ф.э.), влияние которого вполне вероятно, учитывая небольшое их число в импульсе и время высвечивания сцинтиллятора.
- На Рис. 2.5, 2.6 по оси абсцисс указаны амплитуды только в каналах АЦП. Для понимания характеристик дискриминатора было бы полезно указать амплитуды в мВ.
- Расположение экспериментальных точек на Рис. 3.6 (слева) производит впечатление наличия порогового эффекта. Так ли это или есть другие объяснения? Поскольку основная доля WLS волокна находится вне сцинтиллятора, можно предположить, что зависимость средней амплитуды от длины волокна должна определяться затуханием в нем. В этом случае было бы полезно привести расчетные (или хотя бы оценочные) зависимости этих величин.
- Имеется также ряд мелких неточностей и опечаток.

Перечисленные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации, представляющей собой законченное исследование. Достоверность выводов и результатов диссертации, а также их новизна и актуальность не вызывают сомнений. Основные результаты работы опубликованы в ведущих научных журналах, входящих в перечень ВАК, и представлены на российских и международных научных конференциях. Автореферат диссертации правильно и полно отражает содержание диссертации.

Диссертация Холоденко Сергея Анатольевича удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, (п. 9-14), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 - физика высоких энергий.

Н.Е. Тюрин: Спасибо. Сергей Анатольевич, вам слово для ответа.

С.А. Холоденко: Я кратко отвечу про четыре годоскопа. Дело в том, что когда я присоединился к этой группе, годоскоп MUV3 был уже в эксплуатации и мне оставалось его только эксплуатировать дальше. MUV0 является один из прототипов MUV3, я принимал участие в его установке, но посчитал недостойным включать в диссертацию, потому что годоскоп имеет достаточно примитивную конструкцию. Тем не менее, я привел его описание. Это ответ на первый вопрос.

На остальные вопросы я подготовил слайды. На этом слайде представлена замечательная картинка производства сцинтиллятора, где я указал, что он «произведен методом блочной полимеризации с последующей механической обработкой и алмазной полировкой поверхности». Возможно, стоило описать подробнее. Я соглашусь с замечанием, потому что стороннему читателю виднее.

По поводу «экспериментальных точек», видимо речь идет о рисунке 3.6 справа. Основные проблемы использования волокна VCF-92 большой длины это: малый световыход, влияние длины затухания, очень высокая хрупкость. Я бы сказал, что вероятность потери оптического фотона пропорциональна длине волокна в некой степени, которая явно больше единицы.

По поводу мелких неточностей и опечаток. Одно из замечаний возникло из-за разрыва текста на странице 59 и соответствующей фотографии на странице 61. Видимо, я неправильно расположил. С остальными замечаниями я согласен.

Н.Е. Тюрин: Спасибо. Переходим к выступлению официальных оппонентов. Я так понимаю, Ольшевский Александр Григорьевич отсутствует.

В.В. Мочалов: Отзыв Александра Григорьевича Ольшевского, доктора физико-математических наук, профессора, начальника отдела Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

В.В. Мочалов зачитывает отзыв официального оппонента А.Г. Ольшевского.

Физика каонов на протяжении многих лет внесла существенный вклад в наше понимание природы физических явлений и формирование современной теории элементарных частиц. Одним из флагманов этой программы является эксперимент «Фабрика каонов» NA62, посвященный поиску и изучению редких распадов. Диссертационная работа Холоденко посвящена актуальной задаче создания и эксплуатации важных элементов этой установки. Представленные результаты обладают научной новизной, хорошо обоснованы и прошли апробацию в рамках коллаборации NA62 и на международных конференциях. Выводы диссертационного исследования базируются на 6 публикациях в реферируемых журналах.

В качестве серьёзного достижения диссертационной работы хочется отметить не только её полноту и последовательность в решении методических задач для создания детекторных систем, но и уже реализованное практическое применение в эксперименте мирового уровня.

Благодаря успешной работе всех подсистем, в первом сеансе набора статистики эксперимента NA62 зарегистрировано 20 распадов $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ при уровне ожидаемого фона 7 событий, что пересчитывается в результат для относительной вероятности распада: $Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (11_{-3.5}^{+4.0} \text{stat} \pm 0.3 \text{syst}) \times 10^{-11}$.

С этим же результатом, однако, связано и небольшое замечание. На мой взгляд, обсуждение этого физического результата в диссертации следовало бы расширить. Понятно, что более существенную информацию можно будет получить в будущем при увеличении точности измерения, а главное, в сравнении относительных вероятностей распадов заряженного и нейтрального каонов, но возможно, что уже сейчас полученный результат для заряженного каона ограничивает пространство параметров для классов моделей новой физики, представленных в диссертации на Рисунке 9.

В целом, диссертация написана хорошим языком и содержит незначительное количество опечаток, которые, как и высказанное замечание, не снижают её общей ценности. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация С.А. Холоденко на тему «Система сцинтилляционных годоскопов эксперимента NA62» является, безусловно, полезной для специалистов, использующих системы сцинтилляционных счетчиков и фото-детектирование, в особенности, при необходимости получить хорошее временное разрешение.

Представленная диссертация полностью удовлетворяет критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Холоденко Сергей Анатольевич, безусловно заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 - физика высоких энергий.

Н.Е. Тюрин: Вам слово для ответа, Сергей Анатольевич.

С.А. Холоденко: Я подготовил слайд для ответа и привел картинку, которую, конечно, нужно было бы добавить в диссертацию. Серым цветом выделены исключенные области. Есть еще и другая интересная корреляция: относительные вероятности распадов $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ и $B^+ \rightarrow K^{*+} \nu \bar{\nu}$, в которой также есть область исключения.

Н.Е. Тюрин: Спасибо. Слово имеет Алексеев Игорь Геннадьевич.

И.Г. Алексеев: Здравствуйте. Настоящая диссертация посвящена созданию и эксплуатации сцинтилляционных годоскопов используемых в эксперименте «Фабрика Каонов» NA62. Основная

цель этого эксперимента - изучение суперредких распадов К-мезонов, в частности определение вероятности распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$. Вероятность этого распада с одной стороны может быть хорошо оценена в рамках Стандартной Модели, а с другой стороны очень чувствительна к возможной Новой Физике, выходящей за Стандартную Модель. Такое соотношение определяет очень высокий интерес и актуальность темы представленной работы. Система сцинтилляционных годоскопов является одним из существенных составляющих детектора, абсолютно необходимым для успеха эксперимента. Необходимость получения высокой статистики (мы ищем распад с вероятностью на уровне 10^{-11} , для этого надо пронаблюдать порядка 10^{13} распадов с очень высоким подавлением фона) накладывает требования на временные характеристики детекторов и на их эффективность. Эксперимент NA62 является ведущим экспериментом в этой области, и это гарантирует высокий научный уровень диссертации. Коллаборация NA62 — большая международная коллаборация, включающая 30 институтов из 14 стран, что обеспечивает очень высокий уровень внутренней экспертизы и гарантирует достоверность получаемых результатов проводимых исследований. Результаты, лежащие в основе диссертации, опубликованы в шести научных журналах и докладывались на совещаниях коллаборации, российских и международных конференциях. Все это свидетельствует о достоверности и обоснованности научных положений и выводов, изложенных в диссертации. Я не буду останавливаться на содержании диссертации. Приведу замечания.

- Первое замечание к рисунку 1.2, на котором показана схема установки. Понятно, что эта схема очень привычна для членов коллаборации. Но для человека свежечитающего к ней нужно значительно больше пояснений, чем приведено рядом с этим рисунком.
- Следующее замечание относится к приведенной на странице 86 оценке количества фотоэлектронов для ФЭУ и для SiPM. Обе оценки по разным причинам являются приблизительными, о чем в диссертации не сказано. В случае с SiPM не учитывается эффект cross-talk, в случае с ФЭУ формула 2.7 дает заниженное число фотоэлектронов, так как не учитывает вклад в флуктуации сигнала эффекта размножения на диодах, особенно первых.
- При описании первого сеанса упоминается в качестве задающего триггер годоскоп NA48 CHOD. Дальше читателю остается только догадываться, где он стоял, что он делал, как он был устроен. Об этом ничего не сказано. Это все-таки важно для понимания.
- Всегда очень интересен вопрос выживаемости кремниевых фотоумножителей в условиях интенсивного пучка. Приведены графики на рисунке 4.2, характеризующие кремниевые фотоумножители. И, по видимому, эти графики относятся к ситуации до экспозиции. Очень интересно было бы их увидеть после экспозиции. Они несомненно должны быть у автора.

Данная диссертация содержит прекрасный экспериментальный материал, полученный при существенном участии автора. Работа написана хорошо и характеризует автора как зрелого физика, успешно работающего в составе большой международной коллаборации. Качество материала, его актуальность и научная новизна не вызывают сомнений. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию. Все вынесенные на защиту результаты опубликованы в шести научных изданиях, входящих в список ВАК, представлялись автором на российских и международных конференциях. Изложенные в отзыве замечания не влияют на основные результаты и не уменьшают их достоверность и качество. Диссертационная работа Сергея Анатольевича Холоденко является законченным научным исследованием, содержащим новые результаты по физике элементарных частиц. Считаю, что настоящая диссертация полностью соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 - физика высоких энергий.

Н.Е. Тюрин: Спасибо, Игорь Геннадьевич. Пожалуйста, Сергей Анатольевич

С.А. Холоденко: Я соглашусь с замечанием по схеме установки. И с расчетом по фотоэлектронам. В качестве попытки реабилитации могу сказать, что для эксперимента, где нет ADC, важным является не абсолютное число фотоэлектронов, для расчета которого нужно интегрировать сигнал, а эквивалент числа фотоэлектронов в амплитуде сигнала. Поэтому в некоторых случаях мы не считали абсолютный световыход, а считали эквивалент в амплитуде, чтобы можно было переводить порог в фотоэлектроны. Но с замечанием я полностью согласен. Про годоскоп NA48 SNOD тоже согласен, надо было добавить. Замечание касательно возможных радиационных повреждений: приведен график со значительным ростом тока. И график темного шума с разными значениями питания. График был получен в 2018 году, когда уже был обнаружен этот эффект. До этого вариант эксплуатации с пониженным питанием даже не рассматривался. К сожалению, у меня обратная ситуация — у меня нет графика, как это было «до», у меня есть только график как это стало «после». Могу лишь представить значение тока в самом начале и как затем он возрастал.

Н.Е. Тюрин: Спасибо. Игорь Геннадьевич, вы удовлетворены ответом?

И.Г. Алексеев: Да, полностью.

Н.Е. Тюрин: Переходим к дискуссии.

А.М. Зайцев: Я давно знаю диссертанта, с первых дней в нашем институте. И должен сказать, что разделяю удивление, что мы сразу получили очень квалифицированного сотрудника. Редко такое удается наблюдать, когда приходит из института человек, который все прекрасно понимает и очень эффективно работает. И который в настоящий момент продемонстрировал очень хорошую диссертацию. Сергей Анатольевич много полезного делает для науки, для нашего института. Это не только магнитные измерения, но и участие в сеансах. Он занимается координацией работы экспериментальных установок на нашем ускорителе и зарекомендовал себя как очень квалифицированный специалист. Если говорить собственно о диссертации, я хочу обратить внимание на то, что регулярно на очень хорошем уровне используется такая единица измерения как пикосекунда. Мы привыкли работать с импульсами длительностью 30 нс, разрешением 1 нс. А здесь человек пишет 320 ± 2 пс. Это требует очень высокой культуры измерений. По совокупности параметров, Сергей Анатольевич Холоденко безусловно заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук.

Н.Е. Тюрин: Спасибо. Сергей Анатольевич, Вам заключительное слово.

С.А. Холоденко: Хотелось бы выразить благодарности. В первую очередь научному руководителю Владимиру Федоровичу Образцову за постановку интересной и важной с точки зрения эксперимента задачи, непрерывную поддержку, обсуждения и советы по ходу работы. Профессору Итало Маннелли (Italo Mannelli) за неиссякаемый энтузиазм, интересные дискуссии и проведенные совместные работы. Руководству эксперимента NA62 в лице спонсоров Кристины Лаззери (Cristina Lazzeroni) и Августо Чеккуччи (Augusto Cacciuci), вице-спонсору по техническим вопросам Риккардо Фантеки (Riccardo Fantechi), а также техническим координаторам Хансу Дэниельссону (Hans Danielsson) и Фердинанду Хану Ferdinand Hahn) за постоянный интерес к работе, советы и помощь в организации этапов сборки, транспортировки и монтажа детекторов. Валентину Петровичу Сугоняеву, Евгению Гущину и Пьер-Анжи Гудичи (Pierre-Ange Giudici) принимавших участие в проработке отдельных элементов детекторов. Фалалееву Валерию и Риккардо Фантеки (Riccardo Fantechi) за помощь в интеграции детекторов в общую систему медленного контроля установки NA62. Юрию Петровичу Гузу, Павлу Шаталову, Вита-

лию Константиновичу Семенову, Самойленко, Бритвичу и Останкову за помощь в организации экспериментальных стендов. Юрию Петровичу Гузу, Владимиру Дмитриевичу Самойленко, Луиджи Ди Лелла (Luigi di Lella), Марчелло Джорджи (Marcello Giorgi), Юрию Мусиенко, Геннадию Бритвичу, Виталию Семенову, Евгению Гудзовскому, Александру Горину, Райнеру Ванке (Rainer Wanke) и всей рабочей группе «MUV CHOD ANTI-0» за проявленный интерес, плодотворные обсуждения результатов и ценные замечания. Группам Владимира Ивановича Рыкалина, Сергея Константиновича Черниченко и Олегу Гаврищуку за помощь в производстве сцинтилляционных пластин. Кириллу Качнову, Виталию Полякову, Евгению Чернову, Михаилу Сандомирскому и Антонио Гонкалес Мартинс Де Оливера (Antonio Goncalves Martins De Oliveira) за проведение прецизионных оптико-механических и высокопрофессиональных монтажных работ. Отдельная благодарность участникам коллабораций ОКА и NA62, а также группам LHCb ECal и SHiP Muon Veto за предоставленную возможность экспозиции прототипов детекторов на выведенных пучках. Спасибо.

Н.Е. Тюрин предлагает выбрать счетную комиссию в составе: С.М. Трошин, В.А. Петров и В.В. Мочалов и приступить к голосованию.

Перерыв на голосование.

Н.Е. Тюрин предоставляет слово председателю счетной комиссии С.М. Трошину.

В.В. Мочалов по просьбе С.М. Трошина объявляет результаты голосования:

Присутствуют на заседании 18 членов совета. Из них, докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации — 8. Роздано бюллетеней — 18. Осталось нерозданных бюллетеней — 4. Оказалось в урне бюллетеней — 18. Результаты голосования: «за» — 17, «против» — 0, «недействительных» — 1.

Н.Е. Тюрин объявляет открытое голосование для утверждения результатов.

*Голосование для утверждения протокола результатов тайного голосования.
Голосование завершено. Протокол счетной комиссии утвержден.*

Н.Е. Тюрин представляет проект заключения диссертационного совета и объявляет открытое голосование по утверждению проекта заключения.

Голосование для утверждения проекта заключения.

Заключения диссертационного совета принято единогласно.

Н.Е. Тюрин: Сергей Анатольевич, я с удовольствием поздравляю Вас с замечательной защитой. Успехов Вам в дальнейшем.

С.А. Холоденко: Спасибо.

Заседание диссертационного совета завершено.

Председатель диссертационного совета

 Н.Е. Тюрин

Врио ученого секретаря диссертационного совета

 В.В. Мочалов

12 мая 2021 г.