

О Т З Ы В официального оппонента А.И.Болоздыни,

доктора физ.-мат. наук, заведующего лабораторией экспериментальной ядерной физики и профессора кафедры экспериментальной ядерной физики Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”
на диссертационную работу Кашука Анатолия Петровича

“Мюонный детектор LHCb-спектрометра. Разработка, исследование, оптимизация параметров и режима работы камер с падовой структурой различной гранулярности“,
представленную на соискание учёной степени доктора технических наук
по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Актуальность темы диссертации подтверждается тем, что эксперимент LHCb, для которого создан мюонный детектор, является одним из четырёх основных экспериментов на Большом адронном коллайдере (БАК, англ. LHC). Целью этих экспериментов является определение границ применимости современной теории физики микромира – Стандартной модели (СМ) и поиска новых явлений за её пределами. Научная программа эксперимента LHCb сфокусирована на исследование асимметрии материи и антиматерии во взаимодействиях *b*-кварков.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения общим объёмом 372 страниц (323 страницы без приложений). Приложения с кратким изложением известных физических основ и математического аппарата подобраны таким образом, чтобы упростить обоснование целого ряда решений, принятых при создании камер, составляющих мюонный детектор.

Мюонный детектор является одним из ключевых элементов LHCb-спектрометра, т. к. практически все модели за пределами СМ предсказывают существование явлений, которые могут быть обнаружены в каналах распада с мюонами в конечном состоянии.

Целью диссертационной работы является разработка и создание быстродействующих высокоэффективных газовых дрейфовых камер с падовой электродной структурой различной гранулярности для мюонного детектора LHCb-спектрометра, содержащего всего 1380 камер общей площадью 435 м^2 , установленных на пяти мюонных станциях.

Несмотря на то, что проволочные дрейфовые камеры применяются в экспериментах в области физики высоких энергий уже более 50 лет, эксперимент LHCb предъявил новые жёсткие требования к этой детекторной технологии в части экстремальных нагрузок, радиационной стойкости, надёжности и быстродействия. Кроме того, к временному разрешению мюонных камер предъявляются высокие требования, т.к. недостаточное временное разрешение камер может привести к ошибочной идентификации мюона и присвоить событию другой номер банча LHC (частота банчей 40 МГц) и, таким образом, перевести событие из разряда полезного в разряд фоновых.

Концепция объединения сигналов с двух слоёв проводным «ИЛИ», вынесенная на защиту, является ключевой. Такой подход привёл позволяет в два раза улучшить временное разрешение камеры и, как следствие, повысить эффективность регистрации мюонов на коротком временном интервале следования банчей LHC ($\Delta t = 25 \text{ нс}$). Это – безусловно, оригинальное, не встречавшееся ранее техническое решение. При этом зазоры выбраны достаточно узкими, чтобы электроны первичной ионизации гарантированно покидали зазор до следующего банча. Более того, предложенное решение позволило в 2 раза уменьшить число каналов электроники, если сравнивать с применявшимся ранее логическим

объединением двух слоёв, что является существенным экономическим фактором с учётом стоимости мюонной системы порядка 11 млн. шв. франков. Новая концепция успешно применена в 1104 четырехслойных камерах мюонного детектора LHCb-спектрометра, где пара слоёв объединена проводным «ИЛИ», далее объединённых логическим «ИЛИ». Без сомнения, такая структура обладает высокой надёжностью.

Новым является также принцип образования эффективного пада логической операцией «И» («проволочный стрип и катодный пад на совпадение»), который также вынесен автором на защиту. Это техническое решение позволило получить пад с размерами меньше 1 см в горизонтальной плоскости LHCb-спектрометра, что необходимо для вычисления с заданной точностью поперечного импульса мюона для триггера. Внедрение этого принципа в камерах внутренних регионов мюонного детектора привело к дополнительному, причём, существенному уменьшению числа каналов электроники по сравнению с чисто падовой организацией съёма информации.

Таким образом, впервые созданы концептуально новые высокоэффективные быстродействующие двух- и четырёхслойные проволочные камеры с падовой структурой различной гранулярности: M1R2, M2R1, M2R2, M3R1, M3R2, M4R1, M5R1 (M – номер мюонной станции, R – номер региона относительно оси пучка, R1- ближе к пучку), предназначенные для семи внутренних регионов мюонного детектора LHCb-спектрометра, наиболее загруженные, содержащие более 30 тысяч каналов электроники – безусловно, важнейший практический результат рецензируемой работы. Новизна проведённых исследований заключается в перечисленной ниже совокупности уникальной рабочих характеристик созданных мюонных камер.

Высокое временное разрешение, обеспечивающее близкую к 100% эффективность регистрации мюонов пятью мюонными станциями на временном интервале $\Delta t < 25$ нс (новая характеристика), позволяет надёжно фиксировать принадлежность регистрируемых мюонов к данному банчу коллайдера LHC и минимизировать ошибку регистрации не мюонов.

При этом одновременно определяются две координаты (X,Y) трека по номерам сработавших падов независимо от числа треков в событии при преимущественном срабатывании одного пада в кластере, что характеризуется специальной нормой – шириной пространственного кластера 1.2. Это свойство камер важно для упрощения алгоритма поиска трека при организации мюонного триггера экспериментальной установки;

Созданные камеры обладают высоким быстродействием в том смысле, что, благодаря гарантированному уходу электронов первичной ионизации из рабочего зазора за время $t < 25$ нс, камеры готовы к регистрации события из следующего банча. Показано, что пространственный заряд положительных ионов не оказывает существенного влияния на эффективность камер вплоть до загрузки 500 кГц/см^2 , ожидаемой в камерах M1R1 (в остальных камерах – меньшей).

Достижению указанных параметров предшествовал огромный комплекс работ по исследованию на пучках прототипов и опытных образцов двух- и четырёхслойных камер различной конструкции с проволочными и печатными падами, с симметричным и асимметричным рабочими зазорами, которые создавались для 20 регионов мюонного детектора LHCb-спектрометра (5 станций M1-M5 и 4 региона R1-R4, подробно в диссертации рассматриваются наиболее загруженные камеры семи внутренних регионов).

Следует отметить, что новый тип микро-структурного газового детектора *Triple-GEM* был впервые предложен автором диссертации с коллегами ещё до того, как он был использован в эксперименте COMPASS. С приоритетом в 3 года было показано, что в

спектрометрах, в которых возникают сильно ионизирующие частицы, способные инициировать пробой в газе, детектор GEM должен содержать не менее трёх каскадов. Этот вывод был сделан на основе важного наблюдения, сделанного в 1998 году: введением альфа-частиц в газовую смесь детектора было показано, что в микроструктурном детекторе *Double-GEM* пробои в отверстиях – активных элементах детектора – происходят при газовом усилении 1000 в то время, как в *Triple-GEM* пробои не наблюдаются вплоть до усиления порядка 40000. Детекторы *Triple-GEM* были успешно применены в камерах M1R1 мюонного детектора LHCb-спектрометра, обеспечивая уменьшение в 2.5 раза индукционного зазора (до 1 мм), что важно для минимизации размера регистрируемого ионизационного кластера.

Следует отметить также вынесенную на защиту методику ускоренного вывода новых камер в режим рабочих напряжений с применением инверсной полярности питания и интенсивного облучения. Насколько мне известно, такая методика не встречалась ранее. Применение интенсивного облучения позволило также контролировать качество поверхности катодов. Так, в ряде новых камер автором была обнаружена автоэлектронная эмиссия с катода, которая осталась незамеченной в лабораторных тестах. В случае проявления этого эффекта в эксперименте могли происходить стохастические отключения напряжения питания на камерах из-за больших скачков тока. Это явление обнаружено автором при тренировке новых камер с облучением их интенсивным потоком гамма-квантов (40 кГц/см^2) от источника ^{137}Cs (GIF- Gamma Irradiation Facility, CERN). И было показано, что эмиссии предшествует “эффект накопления” положительных ионов на тонкой пленке, образованной растеканием эпоксидной смолы из-за несовершенства технологии склейки камер. Показано, что возникнув однажды, такая эмиссия может продолжаться сутками. По предложению автора этот дефект был устранён разрушением эмиттеров без ущерба для характеристик камер, которые после этого успешно работают в эксперименте LHCb. Тем самым было продемонстрировано, насколько важно обеспечивать контроль качества поверхности катодов в проволочных камерах, а не только качество поверхности анодных проволочек, как это общепринято.

В диссертационной работе также уделено большое внимание разработке радиационно-стойкой фронт-энд электронике с высокой степенью интеграции с конструкцией камер, которая обеспечивает минимальный шум при пиковом времени усилителей 8–10 нс на падах с электрической ёмкостью до 250 пФ и одновременно достаточно малое (~50 нс) мёртвое время на канал регистрации. Последнее обстоятельство важно для сохранения достаточно высокой эффективности регистрации частиц. Кроме того, в каждый канал регистрации введены цифро-аналоговый преобразователь для установки индивидуального порога дискриминации и счётчик-интенсиметр, а также разработан новый метод реконструкции шумовых распределений. Метод базируется на сканировании порогом дискриминации шумовых сигналов на выходе усилителя и измерении интенсивности шумового счета на выходе дискриминатора в каждом канале системы (при этом все остальные каналы блокируются высокими порогами). Таким образом определяются шумовые распределения на входе предусилителя и на выходе дискриминатора. Найденные параметры используются при установке рабочих порогов в каждом канале мюонного детектора, число которых во всей системе составляет 122112.

На основе разработанного метода реконструкции шумовых распределений автором диссертации предложен новый метод диагностики мюонной системы, основанный на мониторинге эквивалентного шумового заряда в каждом канале установки в течение

времени жизни детектора. В таком эксперименте как LHCb, который будет продолжаться не менее 15-20 лет, важно непрерывно следить за возникновением таких нежелательных явлений, как механическая усталость конструкции камер и радиационное старение детектора. Микроразряды в газе, которые могут сопровождать указанные явления, обязательно проявятся в изменении характера шумовых распределений.

Нововведением является также вынесенный на защиту метод оптимизации режима работы камер мюонного детектора, основанный на минимизации газового усиления, которому в соответствие ставится максимальный порог регистрации по первичным электронам, при условии эффективной регистрации мюонов высоких энергий во временном промежутке $\Delta t = 25$ нс. В свою очередь, минимизация газового усиления гарантирует наименьшие кросс токи (всех типов), минимальную длительность импульсов в канале (мёртвое время), минимальную ширину пространственного кластера, минимальные пространственный заряд в окрестности регистрации проволочкой частицы и минимальное накопление заряда камерой в течение всего эксперимента, что увеличивает радиационную стойкость детектора. Предложенная автором методика расчёта оптимального газового усиления и рабочего напряжения на камерах, удовлетворяющая приведённым выше условиям, представляет практический интерес также для других экспериментов. На основании этих измерений автором предложена абсолютная калибровка рабочих порогов по первичным электронам.

Особенно ценным является то обстоятельство, что вынесенные на защиту результаты получены в условиях реального эксперимента LHCb на встречных протонных пучках с рекордно высокими энергиями 3.5 и 4 ТэВ и светимостью $4 \cdot 10^{32} \text{ c}^{-1} \text{ см}^{-2}$, превышающей проектную в несколько раз. Эксперимент LHCb уже в первом трёхгодичном цикле стал признанным мировым лидером в области физики *B*- и *D*-мезонов. Это является следствием высокого качества всех систем сложной экспериментальной установки, какой является LHCb-спектрометр, включая мюонный детектор, и это было отмечено во многих публикациях и в докладах на международных конференциях, общей численностью более 200. За 3 года (с 2010 по 2013 год) в эксперименте LHCb накоплена статистика 3 фб^{-1} , что позволило открыть новые частицы и каналы распадов, и при этом огромный объем уникальных данных ещё продолжает обрабатываться. В целом в эксперименте LHCb поставлена задача накопить статистику объёмом до 50 фб^{-1} .

Представленные в диссертационной работе А.П.Кашука результаты и положения могут быть квалифицированы как существенный вклад в развитие методики многопроволочных пропорциональных камер. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в реферируемых журналах, о ведущей роли автора в этой области свидетельствуют также многочисленные сообщения ЦЕРН и ПИЯФ. По теме диссертации в России зарегистрировано два патента на полезную модель.

Следует отметить, что в тексте диссертации встречаются опечатки и грамматические ошибки. Так, в левой части формулы (14) на стр. 261 опущен множитель $1/2\pi$. В автореферате диссертации указано, что на защиту вынесено 12 положений (стр.6-10), а в тексте самой диссертации в несколько иной редакции указано 14 положений (стр. 356-364). Однако в целом указанные замечания не затрагивают основу положений и выводов, вынесенных на защиту. Диссертация оформлена в соответствии с существующими требованиями. Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации. Автор корректно ссылается в диссертационной работе на результаты, полученные другими исследователями.

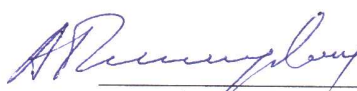
Тема диссертации полностью соответствует требованиям ВАК и специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики, а её автор – Кашук Анатолий Петрович заслуживает присуждения ему искомой степени доктора технических наук.

Официальный оппонент: Болоздыня Александр Иванович, доктор физико-математических наук 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики
115409, Москва, Каширское шоссе, 31,

Тел. +7 495 788 5699 *9015

Электронный адрес: AIBolozdynya@mephi.ru

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», заведующий межкафедральной лабораторией экспериментальной ядерной физики, профессор кафедры экспериментальной ядерной физики и космофизики.

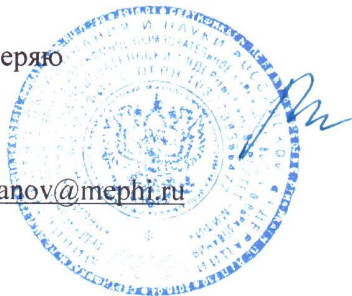

_____ А.И. Болоздыня _____
(подпись) (инициалы, фамилия)

Подпись А.И. Болоздыни заверяю

Учёный секретарь

Электронный адрес: VGTsuganov@mephi.ru

15 марта 2017 г.



_____ В.Г. Цыганов,
кандидат технических наук