

## О Т З Ы В

официального оппонента 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 ученой степени доктора технических наук  
по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Безусловно, актуальность темы диссертации связана с актуальностью создания экспериментальной установки LHCb на Большом адронном коллайдере (БАК/LHC) – новом ускорителе на встречных протонных пучках с рекордными энергией и светимостью, который построен в Европейском центре ядерных исследований (Женева, Швейцария) для проверки границ применимости современной теории физики микромира – Стандартной модели и поиска проявлений Новой физики (НФ) за пределами СМ.

Эксперимент LHCb является одним из четырех главных экспериментов на БАК. В отличие от экспериментальных установок общего назначения ATLAS и CMS, напрямую нацеленных на открытие НФ, эксперимент LHCb, как указано в логотипе LHCb (*b*-кварк, *beauty*), является специализированным экспериментом, оптимизированным для для выполнения прецизионных измерений и поиска проявлений НФ так называемым “косвенным методом” в секторе *B*-мезонов, содержащих два кварка, один из которых тяжелый *b*-кварк. В основе косвенного метода лежит сравнение измерений и расчетов, выполненных по СМ.

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

Целью диссертационной работы является разработка и создание быстродействующих высокоэффективных камер с падовой структурой различной гранулярности для мюонного детектора эксперимента LHCb, содержащего рекордное число камер – 1380 шт. с общей площадью 435 кв.м. пяти мюонных станций M1-M5.

### Оценка новизны и достоверности научных положений, вынесенных на защиту.

Специфика БАК и эксперимента LHCb выдвинули новые требования к составляющим его детекторам, в частности, к мюонному детектору. В диссертации представлены новые методические решения и принципы построения быстродействующих высокоэффективных мюонных камер, исследованы на пучках прототипы, опытные образцы и камеры окончательной конструкции, включая электронику, сформулированы и решены вопросы оптимизации параметров и режима работы камер мюонного детектора в эксперименте LHCb в период 2010–2012 г.г. (LHC Run I), впервые выполнены измерения характеристик камер на сталкивающихся протонных пучках БАК при рекордно высоких энергиях 3.5 и 4 ТэВ на пучок и высокой светимости.

На защиту вынесено 12 положений, при этом в восьми из них автором диссертации внесен определяющий вклад в методику, а в четырех – автор принимал активное участие, о чем свидетельствуют положительные отзывы со стороны международной коллаборации.

Одной из ключевых находок можно считать предложенную автором и впервые реализованную в мюонном детекторе LHCb-спектрометра новую концепцию построения быстродействующих высокоэффективных камер, основанную на удвоении числа кластеров первичной ионизации в рабочем зазоре, что достигнуто проводным объединением сигналов с двух слоев мюонных камер. По сравнению с известной концепцией логического объединения

слоев (TDR, 1998 г.) это привело к существенному улучшению временного разрешения проволочных камер. Кроме того, новая концепция позволила уменьшить в 2 раза число каналов электроники с 236000 до 122112, таким образом, существенно снизить стоимость мюонного детектора. Новая концепция внедрена в 1104 четырехслойных камерах мюонного детектора.

Безусловно самым важным практическим результатом работы является создание высокоэффективных быстродействующих двух- и четырехслойных проволочных камер с падовой структурой различной гранулярности: M1R2, M2R1, M2R2, M3R1, M3R2, M4R1, M5R1, предназначенных для семи внутренних регионов мюонного детектора LHCb-спектрометра, наиболее загруженных, содержащих более 30 тысяч каналов регистрации информации. Эти камеры характеризуются высоким временным разрешением ( $\sigma \sim 3нс$ ), гарантирующим близкую к 100% эффективность регистрации мюонов на временном интервале 25 нс – банча сукорителя. 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. Камеры обладают высоким быстродействием в том смысле, что благодаря гарантированному уходу электронов первичной ионизации из рабочего зазора за время  $t < 25 нс$  готовы к регистрации события из следующего банча. Показано, что пространственный заряд положительных ионов не оказывает существенного влияния на эффективность камер до загрузок 500  $кГц/см^2$ . Задачами мюонного детектора является идентификация мюона, как частицы, и мюонный триггер. Для мюонного триггера достаточно грубого измерения поперечного импульса мюона (пары мюонов). Высокое пространственное разрешение, необходимое для определения импульса мюонов, определяется не мюонной системой, а трековой.

Предложен и реализован новый принцип построения камер с падовой структурой, вынесенный на защиту, позволивший образовывать “эффективный пад” логической операцией И “стрип-пад” в камерах комбинированного (смешанного) типа с узкими проволочными стрипами (например, 3 проволочки в стрипе – 0.6 см) и широкими катодными падами (например, 3 см). Это позволило получить пад с гранулярностью меньше 1 см в горизонтальной плоскости спектрометра, необходимой для вычисления поперечного импульса мюонов для триггера. Внедрение этого принципа в камерах внутренних регионов привело к дополнительному существенному уменьшению числа каналов в мюонной системе по сравнению с чисто падовой организацией съема информации. На этом принципе выполнены камеры четырех внутренних регионов мюонного детектора M2R1, M2R2, M3R1, M3R2, которые содержат 16128 каналов регистрации информации.

Выполнен огромный комплекс работ по исследованию на пучках прототипов и опытных образцов двух- и четырехслойных камер различной конструкции с проволочными и печатными падами, с симметричным и асимметричным рабочими зазорами, которые создавались для 20 регионов мюонного детектора LHCb-спектрометра (подробно в диссертации рассматриваются камеры внутренних регионов). Эти работы, занявшие несколько лет, позволили найти технические решения и определить условия, при которых камеры могут быть применены в эксперименте LHCb. В индукционных камерах с катодными падами автором обнаружены паразитные резонансы, найдены и устранены причины их возникновения. Показано, что асимметричные камеры с катодными падами, которые рассматривались в ранних проектах эксперимента LHCb, как базовые (TDR, 1998 г.), уступают симметричным камерам по времени собирания электронов из зазора и заменены симметричными, теряют свое преимущество по ширине пространственного кластера при наличии крестоков.

Интересно, что новый тип микро-структурного газового детектора – *Triple-GEM* был предложен и интенсивно изучался в рамках эксперимента LHCb еще до того, как он был впервые применен в эксперименте COMPASS. С приоритетом в 3 года по сравнению с работами авторов COMPASS'a показано, что в спектрометрах высоких энергий, где возникают сильно-ионизирующие частицы, способные вызывать пробой в газе, должен применяться детектор с числом каскадов не менее трех. Этот вывод сделан на основе важного наблюдения: введением альфа-частиц в газовую смесь детектора впервые автором диссертации с коллегами показано еще в 1998 г., что в микроструктурном детекторе *Double-GEM* пробой в отверстиях – активном элементе детектора происходит при газовом усилении 1000 в то время, как в *Triple-GEM* нет пробоев до усиления  $4 \cdot 10^4$ . Добавлением третьего каскада решена фундаментальная проблема разрядов в трековых микроструктурных детекторах GEM. Детектор *Triple-GEM* успешно применен в камерах M1R1 в ближайшем к пучку регионе мюонного детектора LHCb-

спектрометра благодаря меньшему чем в проволочных камерах индукционному зазору 1 мм, что важно для регистрации координат с минимальной шириной пространственного кластера. Нужно сказать, что именно *Triple-GEM* применен в эксперименте TOTEM на LHC, а в настоящее время планируется к применению в CMS.

Очень интересным для практики тренировки новых камер, вышедших с производства, является метод ускоренного вывода камер в область рабочих и максимальных напряжений. Автор впервые предложил при подаче на проволочки отрицательного (инверсного) напряжения одновременно применить облучение камеры интенсивным потоком гамма-квантов ( $40 \text{ кГц/см}^2$ ) с энергией 660 кэВ от источника  $^{137}\text{Cs}$ , что ускорило процедуру тренировки с 48.5 ч до 5 ч, а также существенно улучшило качество поверхности проволочек. После такой “обработки” камеры без проблем выходили на рабочее напряжение с темпом нарастания напряжения 500 В в секунду.

Методика, основанная на использовании облучения камер интенсивным потоком гамма-квантов ( $40 \text{ кГц/см}^2$ ) с энергией 660 кэВ от источника  $^{137}\text{Cs}$ , впервые позволила организовать контроль качества поверхности катодов в проволочных камерах. Метод позволил обнаружить в ряде камер автоэлектронную эмиссию с катода, которая характеризуется токами в тысячу и более раз превышающими темновой ток и которая осталась бы незамеченной в лабораторных тестах. Это позволило своевременно установить причину эмиссии – несовершенство дозировки эпоксидной смолы при приклеивании спэйсеров, в результате чего эпоксидная смола растекалась тонкой пленкой по металлической поверхности катода. Эмиссия предшествует “эффект накопления” положительных ионов на пленке. Появление эмиссии вызывало бы стохастическое отключение напряжения на камере в эксперименте. По предложению автора эмиссия подавлена разрушением эмиттеров без ущерба для характеристик камер, камеры успешно работают в эксперименте LHCb.

Диссертационная работа написана на стыке разработки камер и синтеза необходимой фронт-энд электроники. В процессе разработки камер создана радиационно-стойкая фронт-энд электроника высокой степени интеграции, допускающая минимальный шум при коротком пиковом времени  $T_p=8-10 \text{ нс}$  и падах с относительно большой емкостью – до 250 пФ, обеспечивающая одновременно достаточно малое мертвое время канала регистрации  $\sim 50 \text{ нс}$ . Следует подчеркнуть, что впервые в каждый канал регистрации введен 10-разрядный цифро-аналоговый преобразователь для установки индивидуального порога дискриминации сигналов и 24-разрядный двоичный счетчик импульсов – “пересчетка”. Эти “нововведения” предложены автором диссертации одновременно с новым методом реконструкции шумовых распределений. Этот метод базируется на сканировании порогом дискриминатора шумовой дорожки на выходе усилителя, что позволяет определить параметры двух важных шумовых распределений: на входе предусилителя и на выходе дискриминатора. Найденные параметры используются при установке рабочих порогов в каждом канале мюонного детектора (122112 каналов). Кроме того, по характеру полученных распределений можно выполнять диагностику и мониторинг электромагнитных условий в окрестности мюонных камер в шахте. В диссертационной работе впервые предложено характеризовать усилитель-фильтр дополнительно “частотой Райса” – характеристика, названная по имени автора формулы для среднего числа пересечений нулевого уровня случайным процессом в секунду. Показано, как эта частота может быть измерена и определена, если известна полоса частот. Частота Райса указывает на положение нулевого порога в канале, что исключительно важно для установки рабочих порогов в любых детекторах.

На основе разработанного метода реконструкции шумовых распределений автором диссертации предложен новый метод диагностики мюонной системы, основанный на мониторинге эквивалентного шумового заряда (сигмы шума) в каждом канале установки в течение времени жизни детектора. Этот метод впервые внедрен в мюонном детекторе LHCb-спектрометра с целью обнаружения на ранней стадии развития таких нежелательных явлений и эффектов, как радиационное старение и механическая усталость конструкции камер. В таком эксперименте как LHCb, который будет работать не менее 15-20 лет, это свойство, заложенное в систему изначально, исключительно важно, микроразряды в газе, которые могут сопровождать указанные явления, прежде всего скажутся на изменении характера шумовых распределений.

Важным нововведением является вынесенный на защиту метод оптимизации режима работы камер мюонного детектора, основанный на минимизации газового усиления, что достигается установкой минимального шумового порога электроники, которому в соответствие выбирается максимальный порог регистрации в первичных электронах, но при котором еще выполняется норма эффективности регистрации мюонов высоких энергий на временном

интервале  $\Delta t=25$  нс. Минимизация газового усиления в свою очередь гарантирует наименьшие кросстоки, минимальную длительность импульсов в канале (мертвое время), минимальную ширину пространственного кластера, минимальные пространственный заряд в окрестности регистрации проволоочкой частицы и накопление заряда камерой в течение всего эксперимента, что увеличивает радиационную стойкость детектора. Предложенная автором методика расчета оптимального газового усиления и рабочего напряжения на камерах, удовлетворяющая приведенным выше условиям, представляет практический интерес также для других экспериментов.

Безусловно весьма ценными являются результаты измерений основных характеристик камер: эффективности на временном интервале 25 нс и ширины пространственного кластера, полученные в условиях реального эксперимента LHCb на сталкивающихся протонных пучках с рекордно высокими энергиями 3.5 и 4 ТэВ на пучок при светимости  $4 \cdot 10^{32} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ , превышающей проектную в 2 раза, и светимости, превышающей проектную в 5 раз.

Известно, что эксперимент LHCb уже в первом трехгодичном цикле (Run 1) стал мировым лидером в области физики B- и D-мезонов. В этом заслуга всех систем сложной экспериментальной установки, какой является LHCb-спектрометр, заслуга в том числе мюонного детектора. За 3 года работы с 2010 г. по 2013 г. накоплена статистика 3 фб<sup>-1</sup>, открыты новые частицы и новые распады, накоплен огромный объем уникальных данных, обработка которых продолжается. Эксперимент LHCb только начался и будет работать многие годы, объявлена цель – накопление статистики 50 фб<sup>-1</sup>.


В силу сказанного представленные в диссертационной работе А.П.Кашука результаты могут быть квалифицированы как существенный вклад в развитие методики многопроволочных пропорциональных камер. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в реферируемых журналах, а о ведущей роли автора в вопросах, вынесенных на защиту, высоко отзываются руководители эксперимента и мюонного детектора (6 положительных отзывов), об этом свидетельствуют также многочисленные сообщения ЦЕРН и ПИЯФ с меньшим числом авторов. По работе имеются патенты, в частности, концепция удвоения первичной ионизации в зазоре путем проводного объединения двух слоев защищена патентом на полезную модель применительно к газовому электронному умножителю, что говорит об универсальности метода.

К недостаткам диссертационной работы можно отнести ее перегрузку приложениями, но без них обоснование многих технических решений было бы неполным. В автореферате указано, что на защиту вынесено 12 положений, а в диссертации – 14 (стр.22, 364) в несколько иной редакции. По тексту диссертации встречаются грамматические ошибки и опечатки. Однако указанные замечания не затрагивают основных положений и выводов, вынесенных на защиту, достаточно и 12 положений. Целый ряд положений диссертации можно рекомендовать к применению в других экспериментах. Диссертация оформлена в соответствии с существующими требованиями. Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации. Автор корректно ссылается в диссертационной работе на результаты, полученные другими исследователями, в том числе коллегами.

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

Доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник  
Лаборатории физики высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований,

Подпись Голутвина Игоря Анатольевича  
заверяю  
ученый секретарь Лаборатории физики высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований

  
(И.А. Голутвин)

29.01.2017



  
(Д.В. Пешехонов)