

ОТЗЫВ

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

Стандартная модель (СМ), объединяющая три фундаментальных взаимодействия – сильное, слабое и электромагнитное, не включает четвертое – гравитационное, а поэтому не может считаться окончательной теорией. Такие теории за пределами СМ называют «Новая физика» (НФ). Большой адронный коллайдер (БАК), построенный недавно в Европейском Центре ядерных исследований (ЦЕРН), служит этой цели – поиску проявлений НФ. Бозон Хиггса, открытие которого стало важнейшим достижением БАК 2012 года, был предсказан в рамках СМ и венчает СМ. Получить первые намеки на более глубокую теорию – суперсимметрию (теорию суперструн), объединяющую все виды взаимодействий – главное направление БАК после открытия бозона Хиггса.

Эксперимент LHCb входит в число четырех основных экспериментов на БАК. Его научная программа изначально была нацелена на изучение эффектов нарушения *CP*-симметрии в различных распадах *B*-мезонов, содержащих тяжелый *b*-кварк, с целью поиска ответов на фундаментальный вопрос: под воздействием каких механизмов исчезла антиматерия во Вселенной после Большого взрыва, на что СМ не отвечает. Есть и другая цель – поиск проявлений НФ в секторе *B*-мезонов в редких распадах и процессах нарушения различных симметрий так называемым “косвенным методом”. В основе косвенного метода лежит сравнение расчетов, выполненных по СМ, и измерений. Величина этих отклонений иногда не превышает нескольких процентов.

Эксперимент LHCb оптимизирован для выполнения прецизионных измерений в секторе *B*-мезонов, и “прецизионность” налагает повышенные требования к характеристикам детекторов. Мюонный детектор является одним из ключевых элементов LHCb-спектрометра, т. к. большинство распадов *B*-мезонов сопровождается мюонами в конечном состоянии. Практически все модели НФ предсказывают существование новых частиц или явлений, которые могут быть обнаружены в каналах распада с мюонами в конечном состоянии.

В связи с вышесказанным, рецензируемая диссертационная работа А.П.Кашука является весьма **актуальной и важной**, т.к. опосредованно через мюонный детектор эксперимента LHCb сопряжена с развитием теории физики микромира.

Задачами мюонного детектора являются:

1) идентификация мюона как частицы, регистрируемой в конечном состоянии среди продуктов распада, что требуется для определения инвариантных масс частиц, рождающихся в *pp*-столкновениях;

2) избирательный запуск спектрометра - мюонный триггер при обнаружении события с большим поперечным переданным импульсом одного мюона μ^+ , μ^- или пары $\mu^+\mu^-$ (димюона).

Целью диссертационной работы является разработка и создание быстродействующих высокоэффективных камер с падовой структурой различной гранулярности для мюонного детектора эксперимента LHCb, содержащего 1380 камер, предназначенных для решения указанных задач.

В результате разработаны новые концепция 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 рекордно высоких энергий 3.5 и 4 ТэВ на пучок при рекордно 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 самое активное участие, о чем свидетельствуют положительные отзывы со стороны коллаборации. Положения, выносимые автором на защиту, достаточно надежно обоснованы и не вызывает каких-либо сомнений. Достижением диссертационной работы является то, что ряд положений и выводов диссертации могут быть применены также в других экспериментах в области физики высоких энергий.

Важным 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. Эти камеры характеризуются высоким временным разрешением (~ 3 нс – средне-квадр. значение). 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 нагрузок 500 кГц/см².

Одной из ключевых находок можно считать предложенную автором и впервые реализованную в мюонном детекторе новую концепцию построения быстродействующих высокоэффективных камер, основанную на удвоении числа кластеров первичной ионизации в рабочем зазоре, что достигнуто проводным объединением сигналов с двух слоев. Это привело к существенному улучшению временного разрешения; кроме того, позволило уменьшить в 2 раза число каналов электроники с 236000 до 122112 по сравнению с известной концепцией логического объединения слоев, принятой первоначально коллаборацией, а также существенно снизить стоимость мюонного детектора. Новая концепция внедрена в 1104 камерах мюонных станций M2–M5.

Интересен 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). При этом не нарушается установленная норма 1.2 на ширину пространственного кластера, в то время, как в индукционных камерах минимальные размеры катодных падов составляют 3 см, что продиктовано принятым расстоянием анод–катод 2.5 мм. Внедрение этого принципа в камерах внутренних регионов привело к дополнительному 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 комплекс работ на пучках по исследованию прототипов и опытных образцов двух- и четырехслойных камер различной конструкции с проволочными и печатными падами, с симметричным и асимметричным рабочими зазорами, которые создавались для различных регионов мюонного детектора LHCb-спектрометра. Эти работы позволили найти технические решения и определить условия, при которых камеры могут быть применены в эксперименте LHCb. Показано, что асимметричные камеры с катодными падами, которые рассматривались в ранних проектах эксперимента LHCb как базовые для мюонного детектора, уступают симметричным камерам по времени собирания электронов из зазора и теряют преимущество в ширине пространственного кластера уже при уровне емкостных кросстоков 6%. В индукционных камерах с катодными падами автором обнаружены паразитные резонансы, найдены и устранены причины их возникновения.

Интересно, что новый тип микро-структурного детектора – *Triple-GEM* был предложен и интенсивно изучался в рамках эксперимента LHCb. Введением альфа-частиц в газовую смесь детектора автором диссертации с коллегами впервые показано, что в микроструктурном детекторе *Double-GEM* пробои в отверстиях – активном элементе детектора – происходят при газовом усилении 1000, в то время, как в *Triple-GEM* нет пробоев до усиления $4 \cdot 10^4$. С приоритетом в 3 года по сравнению с работами других авторов показано, что *Triple-GEM* может, а *Double-GEM* не может применяться в спектрометрах высоких энергий, где могут возникать сильно-ионизирующие частицы. Детектор *Triple-GEM* успешно применен в камерах M1R1 мюонного детектора LHCb-спектрометра, т. к. благодаря меньшему индукционному зазору 1 мм получена меньшая по сравнению с проволочными камерами ширина пространственного кластера при размерах падов в отклоняющей плоскости спектрометра 1 см.

Впервые предложен и реализован метод ускоренного вывода новых (непосредственно после производства) камер в область рабочих и максимальных напряжений, основанный на использовании коронного разряда с отрицательным напряжением на проволочках, при одновременном облучении камеры интенсивным потоком гамма-квантов (40 кГц/см^2) с энергией 660 кэВ от источника ^{137}Cs , что исключительно важно при производстве большого количества камер, т.к. ускорило процедуру тренировки на порядок – с 48.5 ч до 5 ч, а также улучшило качество поверхности проволочек.

Впервые показана важность контроля качества поверхности катодов в проволочных камерах, основанного на использовании облучения камер интенсивным потоком гамма-квантов (40 кГц/см^2) с энергией 660 кэВ от источника ^{137}Cs . Метод позволил обнаружить в ряде камер эмиссию с катода, которая характеризуется токами в тысячу и более раз превышающими темновой ток, которая осталась бы не обнаруженной в лабораторных тестах. Эмиссия подавлена разрушением эмиттеров без ущерба для характеристик камер; камеры успешно работают в эксперименте LHCb.

Впервые создана радиационно-стойкая детекторная электроника высокой степени интеграции, допускающая минимальный шум при коротком пиковом времени $T_p=8-10 \text{ нс}$ и подключении падов с большой емкостью до $C_{\text{dem}}=250 \text{ нФ}$, обеспечивающая достаточно малое мертвое время канала регистрации.

Интерес представляет вынесенный на защиту новый метод реконструкции шумовых распределений, впервые внедренный в мюонной системе эксперимента LHCb. По результатам сканирования порогом дискриминатора шумовой дорожки на выходе усилителя определяются параметры двух важных шумовых распределений: на входе предусилителя и на выходе дискриминатора, которые используются для выбора и установки рабочих порогов в каналах

мюонного детектора (122112 каналов) и позволяют по характеру распределений выполнять диагностику и мониторинг электромагнитных условий в окрестности мюонных камер в шахте. С этой целью впервые каждый канал созданной детекторной электроники содержит отдельный (индивидуальный) порог дискриминатора с 10-разрядным цифро-аналоговым преобразователем, и в каждый канал включен 24-разрядный счетчик импульсов.

В диссертационной работе предложено характеризовать усилитель-фильтр дополнительно “частотой Райса” – характеристикой, названной по имени автора формулы для среднего числа пересечений нулевого уровня случайным процессом в секунду. При доминировании последовательного шума в канале (частный, но частый случай) эта частота становится детерминированной характеристикой, не зависящей от шумовых параметров, и легко вычисляется. Подчеркивается ее фундаментальная роль, не меньшая, чем полоса частот. Знание частоты Райса исключительно важно для установки рабочих порогов в любых детекторах, т.к. она указывает на положение нулевого порога в канале. Показано, что в связи с большим разбросом “нуля” применение в ядерной электронике дискриминаторов с общим (объединенным) порогом для многих каналов, строго говоря ошибочно. Разработанная для мюонного детектора 8-канальная микросхема CARIOCA является единственной, имеющей отдельные пороги дискриминации.

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 во времени 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 описанный метод оптимизации режима работы камер мюонного детектора, основанный на минимизации газового усиления. Это достигается установкой минимального шумового порога электроники, в соответствии которому выбирается максимальный порог регистрации в первичных электронах, при котором, однако, еще выполняется норма эффективности регистрации мюонов высоких энергий на временном интервале $\Delta t = 25$ нс.

Минимизация газового усиления, в свою очередь, гарантирует:

- Минимальные кросстоки (все виды кросстоков);
- Минимальную длительность импульса в канале (мертвое время);
- Минимальную ширину пространственного кластера;
- Минимальный пространственный заряд в окрестности регистрации провололочкой частицы;
- Минимальное накопление заряда камерой в течение эксперимента.

Интересной является предложенная автором методика расчета оптимального газового усиления и рабочего напряжения на камерах, которое удовлетворяет приведенным выше условиям.

Безусловно интересными являются результаты измерений основных характеристик камер мюонного детектора, полученные в условиях реального эксперимента LHCb на сталкивающихся протонных пучках с рекордными энергиями 3.5 и 4 ТэВ на пучок при светимости $4 \cdot 10^{32} \text{ c}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, превышающей проектную в 2 раза, и светимости, превышающей проектную в 5 раз.

Благодаря высокой эффективности работы всех подсистем LHCb-спектрометра, включая мюонный детектор, в сеансах эксперимента LHCb 2010–2012 г.г. (LHC Run 1) впервые получены важные научные результаты, которые вывели эксперимент LHCb на уровень мирового лидера в области физики B- и D-мезонов. За 3 года работы с 2010 накоплена статистика 3 fb^{-1} , открыты новые частицы и новые распады, накоплен большой объем уникальных данных, обработка которых

продолжается. Эксперимент $LHCb$ только начался и будет работать многие годы. Объявлена цель – накопление статистики 50 fb^{-1} .

В силу сказанного представленные в диссертационной работе А.П.Кащука результаты могут быть квалифицированы как существенный вклад в развитие методики пропорциональных камер. Основное содержание работы опубликовано в реферируемых журналах, а ведущая роль автора легко устанавливается по многочисленным сообщениям ЦЕРН и ПИЯФ. По работе имеются патенты на полезную модель, в частности, по концепции удвоения первичной ионизации в зазоре путем проводного объединения двух слоев. К недостаткам диссертационной работы можно отнести ее перегрузку приложениями. Имеются ошибки, например, в левой части формулы (14) Приложения 4.9 отсутствует деление на 2π . Есть и нестыковка: в автореферате сказано, что на защиту выносятся 12 положений, а в тексте диссертации – 14. Сделанные замечания не затрагивают основных 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 и другими исследователями, в том числе ближайшими коллегами, и на свои собственные работы с участием коллег.

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

Доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН,
630090, г.Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева 11.
S.E.Baru@inp.nsk.su, тел. (8) 913 934 3271


09.02.17

Подпись Бару Семена Ефимовича заверяю
Ученый секретарь ИЯФ СО РАН,
к.ф.-м.н. Я.В.Ракшун

