

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 720.001.02 НА БАЗЕ  
МЕЖДУНАРОДНОЙ МЕЖПРАВИТЕЛЬСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ  
ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

Решение диссертационного совета от 13.04.2017 № 17-01

о присуждении Кашуку Анатолию Петровичу, гражданину России, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Мюонный детектор ЛНСб-спектрометра. Разработка, исследование, оптимизация параметров и режима работы камер с падовой структурой различной гранулярности» по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 18 февраля 2016 г., протокол № 16-01, диссертационным советом Д 720.001.02 на базе Международной межправительственной организации Объединенный институт ядерных исследований, почтовый адрес: 141980, ул. Жолио-Кюри, д.6, г. Дубна, Московская область, РФ, приказ от 11.04.2014 г. №105/нк.

Соискатель Кашук Анатолий Петрович 1941 года рождения. В 1964 году окончил факультет автоматики и вычислительной техники Ленинградского электротехнического института им. В.И.Ульянова (Ленина). В 1979 году защитил диссертацию «Разработка и использование в физических экспериментах систем быстрого отбора событий рассеяния элементарных частиц при высших энергиях» на соискание ученой степени кандидата технических наук в совете при Объединенном институте ядерных исследований. С 1965 г. по 1971 г. работал в должности стажера-исследователя, инженера, старшего инженера филиала Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе. С 1971 работает в Ленинградском (в настоящее время Петербургском) институте ядерной физики им. Б.П.Константинова в должности начальника службы, младшего научного сотрудника, старшего научного сотрудника - начальника группы, в настоящее время – старшего научного сотрудника этого института. Диссертация выполнена в Петербургском институте ядерной физики им. Б.П.Константинова.

Официальные оппоненты:

- **Бару Семен Ефимович**, доктор технических наук, профессор, заместитель главный научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное учреждение Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН (почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11. тел. +7 (383) 329-47-60, e-mail: [inp@inp.nsk.su](mailto:inp@inp.nsk.su))
- **Болоздыня Александр Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры экспериментальной ядерной физики и космофизики и главный

научный сотрудник лаборатории экспериментальной физики, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (почтовый адрес: 115409, г. Москва, Каширское ш., 31, тел. 8 (495) 788-56-99, e-mail: [info@mephi.ru](mailto:info@mephi.ru)).

• **Голутвин Игорь Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (почтовый адрес: 141980, ул. Жолио-Кюри, д.6, г. Дубна, Московская область, тел. +7 (49621) 6-50-59, e-mail: [post@jinr.ru](mailto:post@jinr.ru)) дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий им. А.А.Логонова» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (почтовый адрес: 142281, площадь Науки, д.1, Протвино, Московская обл., тел. (4967) 71-36-23, e-mail: [fgbu@ihep.ru](mailto:fgbu@ihep.ru)) в своем положительном заключении, составленном доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН Образцовым Владимиром Федоровичем, главным научным сотрудником, начальником лаборатории электрослабых процессов, указала: «Диссертация содержит большой результат многолетней работы автора. Основные выводы и разработанные концепции подтверждаются многолетней успешной эксплуатацией мюонного спектрометра. Полученные результаты выглядят весьма убедительными и характеризуют диссертанта как зрелого физика высокой квалификации в области методики и техники эксперимента. Представленная диссертационная работа А.П.Кашука является законченным научным исследованием и полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики, а ее автор А.П.Кашук заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук».

В отзыве содержится ряд замечаний:

Глава 1. На стр. 23 мюон называется слабовзаимодействующей частицей. Т.К. у мюона есть не только слабое, но и электромагнитное взаимодействие, это звучит странно. На стр.25 приводится почему-то нерелятивистская формула для импульса:  $p=mV$ . В LHCb мюоны ультра релятивистские и  $p=mV\gamma$ ! В конце параграфа 1.1 утверждается, что в ATLAS и CMS импульс мюона определяется, в отличие от LHCb, только мюонной системой. Это не так. Достаточно мало обсуждается вопрос выбора газовой смеси. Например, для узкозачерных камер (2\*1,5 мм) традиционно применялась смесь 20% C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>+80% CF<sub>4</sub>. Чем она плоха для LHCb?

Глава 4. Можно было сказать несколько слов про реализацию мюонного триггера нулевого уровня.

Глава 6. Можно было бы обойтись без этой главы. Вопрос пространственной и временной юстировки камер, как и измерение мертвого времени каналов в специальных сеансах, больше соответствует духу главы 5. Общие характеристики могли перейти в Заключение. Важная характеристика – распределение по шмрине кластера приводится

только на космических мюонах на очень маленькой статистике. Хотелось бы увидеть распределение на большой статистике, или хотя бы просто среднее и дисперсию распределения. В подписи к рис.6.13б говорится, что красные точки это 2011 г., а синие – 2012. Между тем, на самом рисунке (в рамке) написано, что синие точки это результат расчета по Монте-Карло.

Соискатель ответил на замечания.

На автореферат диссертации поступил отзыв от кандидата физико-математических наук Мовчана Сергея Александровича, начальника сектора №1 научно-экспериментального отдела многоцелевого детектора Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (141980, Дубна, Московская обл. Жолио-Кюри, 6, (496) 216 57 76, [movchansa@yandex.ru](mailto:movchansa@yandex.ru)). В отзыве говорится, что в представленной работе получила существенное развитие методика многопроволочных камер, широко применяемая в экспериментах в области физики высоких энергий. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а сам автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук.

Критических замечаний в отзыве не содержится.

Других отзывов на диссертацию и автореферат в совет не поступало.

В распоряжение совета поступил также ряд писем от руководителей мюонного проекта и сотрудничества ЛHCб. Это доктор Пьерлуиджи Кампана, споксмен ЛHCб, ЦЕРН; доктор Буркхард Шмидт, заместитель споксмена ЛHCб, ЦЕРН; доктор Джованни Пассалева, руководитель проекта мюонного детектора ЛHCб, Национальный институт ядерной физики, Флоренция, Италия; профессор Джованни Карбони, бывший руководитель проекта мюонного детектора ЛHCб, университет «Tor Vergata», Рим, Италия; доктор Алессандро Кардини, руководитель проекта мюонного детектора ЛHCб с 2013 года, Национальный институт ядерной физики, Кальяри, Италия; профессор Мауро Саврие, ответственный за производство мюонных камер ЛHCб, Национальный институт ядерной физики, Феррара, Италия. В этих письмах отмечается неоценимый личный вклад А.П.Кашука в разработку и создание мюонных камер, их запуск в работу и успешную эксплуатацию в течение 2010-2012 гг.

Соискатель имеет более 100 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 53 работы, из них опубликованы в рецензируемых научных изданиях 14. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. *LHCb Collaboration (... , Kashchuk A., et al.)*. The LHCb Detector at the LHC // J. of Instr. 2008. v. 3. S08005.
2. *Kachtchouk A., Lippmann C., Riegler W., Schmidt B., Schneider T., Souvorov V.* Asymmetric and double-cathode-pad wire chambers for the LHCb muon system // Nucl. Instr. and Meth. A 555 (2005). p. 48-54.
3. *Kashchuk A., Souvorov V., Schmidt B., Schneider T., et al.* First results of an aging test of a full scale MWPC prototype for the LHCb muon system // Nucl. Instr. and Meth. A515 (2003). p. 220-225.

4. Ciambrone P., Dané E., Dumps R., Dwuznik M., Felici G., Forti C., Frenkel A., Graulich J.-S., Kachtchouk A., et al. Automated wire tension measurement system for LHCb muon chambers // Nucl. Instr. and Meth. A 545 (2005). p. 156-163.

5. Кацук А.П. Применение теории Райса для реконструкции шумовых распределений в ядерной электронике // ПТЭ. 2012. т. 4. с. 26-34.

6. Anderlini L., Nobrega R., Gruber L., Kashchuk A., et al. A new method based on noise counting to monitor the frontend electronics of the LHCb muon detector // J. of Instr. 2013. v. 8. P06001.

7. Kashchuk A.P., Kuchinskii N.A., Levitskaya O.V., Movchan S.A. Equivalent Noise Charge for Different Impedance Matching Schemes of the Drift Straw-Tube and the Amplifier // Письма в журнал Физика ЭЧАЯ. 2011. с. 68-77; Physics of Particles and Nuclei Letters. 2011. v. 8. p. 40-45.

8. Kashchuk A., Gianotti P., Levitskaya O., Savrie M., et al. Measurement of the absolute gas gain and gain variations study in straw-tube detectors // J. of Instr. 2013. v. 8. T08001.

9. Anelli M., Nobrega R., Aurieremma G., ..., Kashchuk A., et al. Performance of the LHCb muon system with cosmic rays // J. of Instr. 2010. v.5. P10003.

10. Alves A., Anderlini L., Anelli M., ..., Kashchuk A., et al. Performance of the LHCb muon system // J. of Instr. 2013. v.8. P02022.

11. Aaij R., ..., Kashchuk A., et al. (LHCb Collaboration). Implications of LHCb measurements and future prospects // arXiv:1208.3355; Eur. Phys. J. C 73 (2013). p. 2373.

12. Aaij R., ..., Kashchuk A., et al. (LHCb Collaboration). First observation of  $\bar{B}_s^0 \rightarrow D_{s2}^{*+} X \mu^- \bar{\nu}$  decays // Phys. Lett. B. v. 698 (2011). p. 14-20.

13. Кацук А.П., Козлов С.М., Левицкая О.В., Соловей В.А. Газовый электронный множитель // Патент на полезную модель № 135425. Роспатент. Москва. 2013.

14. Кацук А.П., Козлов С.М., Левицкая О.В., Соловей В.А. Детектор заряженных частиц // Патент на полезную модель. № 135424. Роспатент. Москва. 2013.

Вклад соискателя в эти работы определяющий.

Результаты диссертации представлялись на следующих конференциях и семинарах:

1. 11-th Workshop on Electronics for LHC and Future Experiments. 12-16 September 2005, Heidelberg, Germany

2. 2005 IEEE Nuclear Science symposium and Medical Imaging Conference. 23-29 October 2005, Wyndham El Conquistador Resort, Puerto Rico

3. 2008 IEEE Nuclear Science Symposium: Medical Imaging Conference and 16-th Room Temperature Semiconductor Detector Workshop. 19-25 October 2008, Dresden, Germany.

4. На семинарах в ЦЕРН, ПИЯФ, ОИЯИ, на совещаниях международной коллаборации LHCb.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации** обусловлен как особенностями и направлениями их исследований, так и специальностью, по которой выполнена работа соискателя.

Профессор С.Е.Бару широко известен как крупнейший специалист в области измерительной техники, детекторов частиц, цифровых рентгенографических систем для медицины и общественной безопасности. Основные направления научной деятельности связаны с разработкой систем сбора данных для экспериментальных исследований по физике элементарных частиц. При его участии созданы быстродействующие системы сбора и обработки данных практически для всех экспериментов на встречных пучках частиц, проводимых в Институте ядерной физики СО РАН.

Профессор А.И.Болоздыня – профессор кафедры экспериментальной ядерной физики и космофизики и главный научный сотрудник лаборатории экспериментальной физики. Крупный специалист в области разработок позиционно-чувствительных детекторов для регистрации слабоионизирующих частиц и полей ядерных излучений.

Профессор И.А.Голутвин – выдающийся ученый, крупный специалист, основатель нового направления и новых методов исследования в области физики элементарных частиц, методики и техники физического эксперимента, автор более 600 научных работ и трех изобретений, его авторитет признан на мировом уровне. Под его руководством создано несколько поколений современных крупномасштабных физических установок для экспериментов на синхрофазотроне Объединенного института ядерных исследований в Дубне, ускорителе Института физики высоких энергий в Серпухове, на протонном синхротроне международного европейского центра ЦЕРН в Женеве. Эти работы оказали большое влияние на общий уровень методики физического эксперимента.

ФГБУ «Институт физики высоких энергий им. А.А.Логанова» является одним из крупнейших исследовательских центров по физике элементарных частиц. Институт широко известен разработками новых приборов и методов в экспериментальной физике. Сотрудники этого института являются активными участниками создания экспериментальных установок, успешно работающих во многих ускорительных центрах мира, в том числе установок ALICE, ATLAS, CMS, LHCb на адронном коллайдере LHC в CERN (Женева, Швейцария).

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Созданы радиационно-стойкие быстродействующие высокоэффективные двух- и четырехслойные проволочные камеры с падовой структурой различной гранулярности: M1R2, M2R1, M2R2, M3R1, M3R2, M4R1, M5R1, обладающие уникальной совокупностью характеристик и предназначенные для наиболее

загруженных внутренних областей мюонного детектора LHCb-спектрометра, содержащие ~30 тысяч каналов электроники.

2. Предложен новый принцип организации падовой структуры с гранулярностью меньше 1 см в горизонтальной (отклоняющей) плоскости LHCb-спектрометра: камеры M2R1, M2R2, M3R1, M3R2 комбинированного типа CWPC (Cathode-Wire Pad Chamber), в которых эффективный пэд образуется логической операцией И сигналов с проволочного стрипа и катодного пэда. Внедрение этого принципа в указанных камерах внутренних областей позволило достичь необходимого разрешения для быстрого вычисления поперечного импульса мюонов (мюонного триггера установки), причем с существенно меньшим числом каналов электроники по сравнению с чисто падовой организацией.

3. Предложена новая концепция построения быстродействующих высокоэффективных камер, основанная на идее удвоения среднего числа кластеров первичной ионизации в рабочем зазоре, что достигается проводным объединением сигналов с двух слоев на входе усилителей и приводит к существенному улучшению временного разрешения, при уменьшении в 2 раза числа каналов электроники по сравнению с концепцией известного логического объединения сигналов). Концепция внедрена в 1104 камерах мюонных станций M2–M5. Концепция удвоения среднего числа кластеров первичной ионизации в рабочем зазоре объединением слоев проводным ИЛИ защищена двумя патентами РФ на полезные модели применительно к газовому электронному множителю, что свидетельствует об универсальности подхода.

4. Получены уникальные результаты исследования на пучках прототипов и опытных образцов двух- и четырехслойных камер различной гранулярности с проволочными и печатными пэдами, с симметричным и асимметричным рабочими зазорами для различных областей мюонного детектора LHCb-спектрометра, а также результаты работ по изучению старения камер и элементов их конструкции в радиационных полях и дозах, ожидаемых в эксперименте LHCb. Эти исследования позволили найти технические решения и определить условия, при которых камеры могут быть применены в эксперименте LHCb, рассчитанном на длительный период ~20 лет. Экспериментально доказано, что асимметричные камеры с меньшим индукционным зазором, которые рассматривались в ранних проектах эксперимента LHCb, как базовые, не имеют преимуществ перед симметричными камерами по временному разрешению и эффективности регистрации частиц, уступают симметричным камерам по мертвому времени и теряют преимущество в ширине пространственного кластера уже при емкостных кросстоках 6%.

5. Впервые с приоритетом в 3 года по сравнению с работами других авторов показано с помощью альфа-частиц, специально введенных в газовую смесь, что в трехкаскадном микроструктурном детекторе Triple-GEM нет пробоев до усиления  $4 \cdot 10^4$ , в то время как в двухкаскадном детекторе Double-GEM пробой происходит при усилении 1000, недостаточном для эффективной регистрации минимально-

ионизирующих частиц, причем энергия пробоев резко нарастает с увеличением усиления. Полученные результаты имеют принципиальное значение, т. к. касаются вопросов надежности детекторов этого типа. Благодаря меньшему по сравнению с проволочными камерами индукционному зазору (1 мм) детектор Triple-GEM успешно применен в мюонных камерах MIR1 с размерами пэдов 1 см, необходимыми для мюонного триггера LHCb-спектрометра.

6. Предложен и впервые реализован метод ускоренной тренировки проволочных камер после сборки с целью уверенного вывода их в область рабочих и предельных напряжений, новизна которого состоит в использовании коронного разряда с отрицательным напряжением на проволочках при одновременном облучении камеры интенсивным ( $40 \text{ кГц/см}^2$ ) потоком гамма-квантов с энергией 660 кэВ от источника  $^{137}\text{Cs}$ ). Время тренировки камер сокращено с 48.5 до 5 ч, что исключительно важно при производстве большого количества камер, как в мюонном детекторе – 1380 шт. При этом существенно улучшено качество подготовки поверхности проволочек, в результате рабочее напряжение может устанавливаться со скоростью нарастания 500 В/с.

7. Предложен и реализован новый метод контроля качества поверхности катодов в проволочных камерах, основанный на использовании облучения камер интенсивным потоком гамма-квантов ( $40 \text{ кГц/см}^2$  с энергией 660 кэВ от источника  $^{137}\text{Cs}$ ); впервые показана важность такого контроля. Метод позволил обнаружить в некоторых камерах эмиссию с катода, которая характеризуется токами, в 1000 и более раз превышающими темновой ток, вызванную несовершенством технологии дозирования эпоксидного клея при приклеивании спейсеров; это нежелательное явление осталось бы незамеченным в лабораторных тестах, а в эксперименте приводило бы к спонтанным отключениям питания камер.

Предложен и реализован метод подавления эмиссии разрушением эмиттеров. Камеры с подавленной эмиссией успешно работают в эксперименте.

8. Создана радиационно-стойкая (не менее 1 Мрад) быстродействующая детекторная электроника высокой степени интеграции. Новизна разработки: низкое входное сопротивление (25-50 Ом), короткое пиковое время ( $T_p=8-10 \text{ нс}$ ), минимизирующее шум при подключении пэдов с большой емкостью (до  $C_{\text{дет}}=250 \text{ пФ}$ ), компенсация ионного хвоста в сигнале, поступающем с проволочной камеры, обеспечивающая достаточно малое мертвое время канала регистрации. Другие особенности разработки: в каждый канал впервые введен цифро-аналоговый преобразователь (8 двоичных разрядов) для отдельной установки порогов дискриминатора, а также счетчик импульсов (24 дв.р., 100 МГц), что существенно расширило функциональные возможности системы.

9. Разработан новый метод реконструкции шумовых распределений в ядерной электронике, впервые внедренный в мюонной системе эксперимента LHCb, при этом одновременно измеряются параметры двух важных шумовых распределений: на входе предусилителя (эквивалентный шумовой заряд) и на выходе дискриминатора

(определяются нулевой порог и среднеквадратичное значение шумового счета). В основе метода – дистанционное сканирование порогом дискриминатора “шумовой дорожки” на выходе усилителя с записью в качестве данных шумового счета в зависимости от порога. Для фитирования полученных данных дополнительно вводится частота Райса (термин введен впервые по имени автора формулы – O.Rice). По мнению автора, эта частота является фундаментальной характеристикой усилителя-фильтра; она обозначает шумовой счет при нулевом пороге и может быть найдена методами, разработанными в диссертации. Цель реконструкции шумовых распределений – определение и установка минимальных шумовых порогов в каждом канале мюонного детектора (122112 каналов).

10. Предложен и применен новый метод диагностики системы – дистанционный мониторинг эквивалентного шумового заряда в каждом канале мюонного детектора в течение времени жизни эксперимента ЛНСб для обнаружения на ранней стадии развития таких нежелательных явлений и эффектов, как радиационное старение и механическая усталость конструкции мюонных камер, с целью снижения рисков и своевременного реагирования. Камерам предстоит отработать более 20 лет, возможно ослабление натяжения проволочек, деформация панелей под воздействием внутренних напряжений, вызванных натяжением проволочек, образование на электродах радикалов, травление стеклотекстолита на катодах и др.

11. Предложен новый метод оптимизации режима работы камер мюонного детектора, основанный на минимизации газового усиления, что сделано установкой минимальных шумовых порогов электроники (разных для камер с различной гранулярностью) и максимально допустимого порога регистрации в первичных электронах (одинакового для всех камер), при котором выполняется заданная норма эффективности регистрации мюонов высоких энергий на временном интервале  $\Delta t=25$  нс. Минимизация газового усиления гарантирует: минимальные значения всех видов кросстоков; минимальную ширину пространственного кластера; минимальное мертвое время каналов регистрации; минимальный пространственный заряд; минимальное интегральное накопление заряда в камерах в течение эксперимента, что должно уменьшить эффекты радиационного старения и продлить время жизни детектора.

Предложен метод абсолютной калибровки порогов по характерному выполаживанию зависимости временного разрешения от напряжения: предельным считается напряжение, соответствующее порогу в 1 первичный электрон. Результаты выполненных в диссертации расчетов оптимальных усиления и напряжений хорошо согласуются с установленными в сеансах 2010-2012 гг.

12. Впервые получены уникальные результаты измерения основных характеристик камер мюонного детектора при энергиях встречных протонных пучков в с.ц.м.  $\sqrt{s}=7$  и 8 ТэВ при светимости  $4 \cdot 10^{32}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>, превышающей проектную в 2 раза, и светимости  $10^{33}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>, превышающей проектную в 5 раз. Показано, что камеры



мюонного детектора LHCb-спектрометра справляются с фоновой загрузкой при такой светимости.

Благодаря высокой эффективности и надежности работы всех подсистем LHCb-спектрометра впервые получены важные новые научные результаты в области фундаментальных исследований, которые вывели эксперимент LHCb на уровень мирового лидера в секторе физики  $B$ - и  $D$ -мезонов. В активе эксперимента LHCb уже несколько открытий и более 220 публикаций с новыми научными результатами. В качестве примера успешной работы эксперимента LHCb, где наиболее ярко проявился мюонный детектор, в диссертации представлены результаты открытия редкого распада  $B_s$  и  $B_0$  мезонов на два мюона  $\mu^+\mu^-$  – одного из наиболее чувствительных каналов для проверки Стандартной модели и поиска проявлений Новой физики.

### **Актуальность и новизна**

Эксперимент LHCb, который является одним из четырех главных экспериментов на Большом адронном коллайдере в Европейском центре ядерных исследований (CERN). Научная программа эксперимента LHCb весьма обширная и рассчитана на многие годы. Она включает прежде всего 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. Вторая цель – поиск проявлений Новой физики (НФ) за пределами Стандартной модели (СМ) в редких распадах  $B$ -мезонов и процессах нарушения различных симметрий. Эксперимент LHCb оптимизирован для выполнения прецизионных измерений в секторе  $B$ -мезонов. Именно “прецизионность” лежит в основе так называемого косвенного метода поиска проявлений НФ по результатам сравнения измерений и расчетов, выполненных по СМ. Величина этих отклонений иногда не превышает нескольких процентов, что налагает повышенные требования к характеристикам детекторов.

Мюонный детектор является одним из ключевых элементов LHCb-спектрометра, т. к. многие частицы, рождающиеся в  $pp$ -столкновениях, а также практически все модели НФ предсказывают существование новых частиц, которые могут быть обнаружены в каналах распада с мюонами в конечном состоянии.

Новизна работы состоит в том, что бóльшая часть представленных результатов получена впервые. Новизна созданных мюонных камер – в уникальной совокупности следующих характеристик:

Высокое временное разрешение, обеспечивающее близкую к 100% эффективность регистрации мюонов пятью мюонными станциями на временном интервале  $\Delta t=25$  нс. Это свойство позволяет надежно фиксировать принадлежность регистрируемых мюонов к данному банчу коллайдера LHC и минимизировать ошибку регистрации немюонов.

При этом пространственные координаты (X,Y) треков определяются по номерам сработавших падов при преимущественном срабатывании одного пада в кластере, что

характеризуется специальной нормой – средней шириной пространственного кластера 1.2. Это свойство важно при регистрации пары мюонов  $\mu^+\mu^-$  и необходимо для упрощения алгоритма поиска трека при организации мюонного триггера экспериментальной установки.

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/см<sup>2</sup>.

### **Теоретическая и практическая значимость**

В сеансах эксперимента LHCb 2010–2012 г.г. (Run 1) благодаря высокой эффективности работы всех подсистем LHCb-спектрометра, в том числе мюонного детектора, впервые получены важные для фундаментальной физики научные результаты, которые вывели эксперимент LHCb на уровень мирового лидера в области физики  $B$ - и  $D$ -мезонов; за 3 года работы накоплен большой объем уникальных данных, обработка которых продолжается. В активе эксперимента уже несколько открытий. С 2010 по 2013 год по физике опубликовано более 220 работ и сделано столько же докладов на международных конференциях с новыми научными результатами.

Ряд положений и выводов диссертации могут быть применены также в других экспериментах в области физики высоких энергий, а разработанный метод реконструкции шумовых распределений может быть использован не только в ядерной электронике, но и в области измерительной техники, где требуется выделение сигналов из шума. Разработанная при участии автора новая радиационно-стойкая 8-канальная интегральная микросхема CARIOCA с уникальными характеристиками, внедрена в эксперимент NA62 (CERN), где успешно применяется в строу-трекере, состоящем из 7680 дрейфовых трубок; ее использование предполагается в детекторах для ионного коллайдера NICA (ОИЯИ). Отдельные главы диссертации могли бы быть использованы, как хорошо написанное учебное пособие для студентов.

### **Область научных исследований диссертации**

Разработка концепций и принципов, обеспечивающих создание быстродействующих радиационно-стойких высокоэффективных камер с высоким временным разрешением и с падовой структурой различной гранулярности для мюонного детектора эксперимента LHCb.

Исследование на пучках прототипов и опытных образцов различных двух- и четырехслойных камер камер с падовой структурой, с симметричными и асимметричными зазорами с целью поиска оптимальных решений и проверки технических решений.

Разработка эффективных методов ускоренной тренировки новых камер окончательной конструкции, обеспечивающих улучшение качества подготовки поверхности электродов.

Разработка и создание детекторной электроники, обеспечивающей высокое временное разрешение камер и близкую к 100% эффективность регистрации частиц на временном интервале 25 нс и высокое быстродействие.

Разработка методик и стратегий, а также результаты тестирования камер окончательной конструкции в лаборатории на космических частицах и на интенсивном источнике гамма-излучения до их установки в шахту и в шахте на пучках.

Оптимизация режима работы камер мюонного детектора в эксперименте LHCb в период 2010–2012 гг.

### **Достоверность результатов**

Диссертация основана на результатах работ, опубликованных с конца 90-х годов по 2013 год включительно. По теме диссертации опубликовано 53 печатные работы: 14 в реферируемых журналах из списка Scopus, 4 в сборниках трудов международных конференций, 33 в виде сообщений ПИЯФ и CERN. По теме диссертации защищено два патента РФ на полезную модель, которые приравниваются к публикациям. Общий объем публикаций по теме диссертации в рецензируемых научных журналах и изданиях составляет 562 страницы (35.1 печатных листов).

Многие вопросы, изложенные в диссертации, докладывались автором и обсуждались на собраниях международной коллаборации LHCb, а также на семинарах в ПИЯФ и ОИЯИ. Две работы по теме диссертации премированы на конкурсах лучших работ ПИЯФ в 2006 г. и в 2011 г.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается успешной работой эксперимента LHCb в течение первого трехлетнего цикла 2010-2012 г.г (Run 1).

### **Личный вклад соискателя.**

Автором диссертации разработана и предложена новая концепция, которая стала базовой для мюонного детектора LHCb-спектрометра, т.к. существенно улучшила временное разрешение проволочных камер, причем с меньшим числом каналов электроники, что привело к отказу от концепции, утвержденной ранее; разработаны новые принципы организации камер с падовой структурой различной гранулярности. Автором лично исследованы 250 камер окончательной конструкции, созданных для внутренних областей мюонного детектора, содержащих 30 тысяч каналов электроники. Автором сформулированы и решены вопросы оптимизации многих параметров мюонных камер, оптимизирован режим работы камер в эксперименте LHCb. Автор принимал самое активное участие в измерениях характеристик камер-прототипов на пучках, а также камер окончательной конструкции на сталкивающихся протонных пучках рекордно высоких энергий (7 и 8 ТэВ в с.ц.м.) при рекордно высокой светимости  $4 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , превышающей проектную в 2 раза, и светимости  $10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , превышающей проектную в 5 раз.

На защиту автором вынесено 12 научных положений, в восьми из которых (п.п. 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11) автором внесен определяющий вклад, результаты по п.п. 1, 4, 8, 12 получены при его активном участии.

На заседании 13 апреля 2017 года диссертационный совет сделал вывод о том, что диссертация А.П.Кащука представляет собой законченную научно-квалификационную работу. В ней, на основании выполненных автором исследований, получены результаты и разработаны положения, совокупность которых можно квалифицировать как существенный вклад в развитие приборов и методов экспериментальной физики. На их основе создан мюонный детектор, один из важнейших элементов крупной экспериментальной установки LHCb на Большом адронном коллайдере. Проводимые на этой установке исследования имеют важное значение для фундаментальной физики. Диссертация соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней. Совет принял решение присудить Кащук Анатолию Петровичу учёную степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 26 человек, из них 6 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 31 человек, входящих в состав совета, дополнительно введенных на разовую защиту нет, проголосовал: за присуждение учёной степени 23, против нет, недействительных бюллетеней 3.

Заключение подготовили:

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник  
Матюшин Валентин Тарасович

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник  
Тяпкин Игорь Алексеевич

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник  
Арефьев Валентин Александрович

Председатель диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук  
профессор

Малахов Александр Иванович

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник



Арефьев Валентин Александрович

«24» апреля 2017 года