

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор ФГБУ ГНЦ ИФВЭ

академик РАН С.В. Иванов

2017 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации – ФГБУ ГНЦ ИФВЭ на диссертацию **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.

Диссертация А. П. Кашука посвящена созданию мюонного детектора установки LHCb на Большом Адронном Коллайдере (БАК) Европейского Центра Ядерных Исследований (ЦЕРН). Мюоны играют особую роль в поиске редких процессов на адронных коллайдерах, работающих в условиях больших загрузок и большого фона. Не случайно один из ведущих детекторов на БАК носит название CMS - «Компактный Мюонный Спектрометр», а второй универсальный детектор- ATLAS фактически включает в себя независимый мюонный спектрометр на базе тороидального магнита. В LHCb мюонный спектрометр играет двоякую роль: обеспечивает идентификацию мюонов и обеспечивает один из трех базовых триггеров нулевого уровня- мюонный триггер. Особенность и преимущество установки LHCb перед универсальными детекторами — низкий порог по поперечному импульсу мюона в этом триггере (~1.5 ГэВ). Это достигается путем расположения камер мюонного спектрометра вплотную к вакуумной камере ускорителя.

Естественно, камеры работают в условиях больших фоновых загрузок. Одна из основных задач соискателя как раз и состояла в проектировании, производстве и запуске таких камер. Многопроволочные пропорциональные камеры были изобретены Ж. Шарпаком в конце 60-ых годов, но различные жесткие требования к камерам LHCb привели к тому, что пришлось разрабатывать существенно новый прибор. Перечисленные обстоятельства определяют актуальность и новизну представленного исследования. Высокий научный уровень диссертации определяется тем, что исследование проводилось в ПИЯФ — одном из лидеров в этой области физики детекторов и в рамках сотрудничества LHCb, в котором собраны ведущие европейские специалисты по этой тематике.

Остановимся кратко на содержании работы и на наиболее важных и интересных, с нашей точки зрения, результатах диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

Во введении приводится общее описание БАК, LHCb, обоснована актуальность и важность описанных в диссертации исследований.

Замечание: На стр.14 электрон-позитронные коллайдеры с $\sqrt{s} \sim 10$ Гэв/c² ошибочно называются «мезонными фабриками», а надо «B-фабрики». «Мезонные фабрики»- это линейные протонные ускорители большой интенсивности, с энергией выше порога образования π -мезонов.

В первой главе обсуждаются задачи, структура мюонного детектора LHCb и принципы построения высокоэффективных быстродействующих мюонных камер.

В результате очень подробного профессионального анализа выработана концепция пропорциональных камер для мюонной системы. Ее особенностью является использование большого числа (1380) камер относительно малого размера с узкими зазорами (5мм), которые объединены проводным «или» для увеличения эффективности. Съем информации производится с падков разной конструкции и размеров. Показано, что эта концепция удовлетворяет всем требованиям LHCb.

*Замечания: На стр. 23 мюон называется «слабовзаимодействующей заряженной частицей». Так как 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 ультрарелятивистские 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 узкозазорных камер (2*1.5 мт) традиционно применялась смесь 20% C₄H₁₀ + 80% CF₄. Чем она плоха для LHCb ? (пожароопасность, стоимость и т.д.)*

Вторая глава посвящена исследованию на пучках прототипов и опытных образцов камер для мюонного детектора LHCb.

В этой главе приведены результаты исследования на пучках PS и SPS нескольких поколений камер с различной геометрией. Приводятся данные по временному и пространственному разрешению, показано, как на прототипах отрабатывались методы уменьшения кросстоков. Определены условия при которых камеры могут быть применены в LHCb. Наконец, было показано, что детектор типа Triple-GEM может быть применен в LHCb в отличии от Double-GEM. Отдельный важный вопрос- это исследование радиационной стойкости камер, например, в LHCb возникли очень серьезные проблемы со старением straw-трубок Outer-tracker. В мюонном проекте эти эффекты тщательно изучались и были приняты важные решения об уменьшении процента CF₄ в газовой смеси и увеличения шага намотки до 2 мм.

В третьей главе представлены вопросы массового производства камер и методы контроля качества производства.

Здесь роль автора заключалась в разработке технологического оборудования, создании стендов для проверки камер. Главный результат- разработка метода ускоренной тренировки камер. Он заключался в добавлении к традиционному методу использования отрицательной короны облучения

камеры интенсивным источником ^{137}Cs . В итоге среднее время тренировки сокращено с 49 часов до 5 часов.

Четвертая глава посвящена разработке электроники, обеспечивающей высокое временное разрешение и эффективность регистрации. Эта глава с очевидностью демонстрирует, что автор является не только физиком-экспериментатором, но и радиоинженером высокой квалификации. Глава может быть использована, как хорошо написанное учебное пособие для студентов-наглядная демонстрация практической ценности диссертации. Автор принимал активное участие в разработке новой интегральной схемы CARIOCA- 8 канального предусилителя с уникальными характеристиками. Автор является признанным экспертом по CARIOCA и в последние годы помогал внедрить ее в другие эксперименты: NA62 в ЦЕРН и в детекторах для ионного коллайдера NICA — еще одно подтверждение практической ценности диссертации. Диссертантом были разработаны 16-канальные платы радиационно стойкой детекторной электроники на основе CARIOCA и усовершенствованной микросхемы ASDQ предыдущего поколения. Автор принимал активное участие в разработке цифровой микросхемы DIALOG, в частности, предложил ввести в каждый канал счетчик импульсов, что позволило реализовать новый метод реконструкции шумовых распределений. *Замечание: Можно было сказать несколько слов про реализацию мюонного триггера нулевого уровня (L0).*

Пятая глава посвящена предустановочным тестам мюонных камер и оптимизацией режима работы детектора в шахте. Здесь подробно описан стенд измерений на космических лучах и на GIF- установке в ЦЕРН с интенсивным гамма-источником с возможностью менять интенсивность. Подробно описана методика измерений шумовых, счетных характеристик и поиска эффектов пространственного заряда. По этой методике выполнен очень большой объем работ, необходимый для проверки камер и выбора режима работы камер и электроники. Затем процедура измерения шумовых характеристик повторялась в шахте на полностью собранной установке. Фактически в этой главе на практике успешно применялись методы контроля и настройки камер, разработанные автором.

Шестая глава суммирует характеристики мюонного детектора фактически измеренные в ходе первого периода работы БАК. Показано, что важнейшие характеристики детектора: временное разрешение, эффективность -соответствуют проектным.

Замечание: Можно было 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 ширине 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.

В **заключении** подробно перечислены основные научные результаты и положения, выдвигаемые автором диссертации для защиты.

Диссертация содержит большой экспериментальный материал и является результатом многолетней работы автора. Основные выводы и разработанные концепции подтверждаются многолетней успешной эксплуатацией мюонного спектрометра. Одним из ярких проявлений использования системы является обнаружение сотрудничеством ЛНСб супер-редкого распада $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$.

Полученные результаты выглядят весьма убедительными и характеризуют диссертанта как зрелого физика высокой квалификации в области методики и техники эксперимента. Большой, часто решающий личный вклад диссертанта в представленные результаты подтверждается представленными отзывами руководителей мюонного проекта и руководством сотрудничества ЛНСб.

Отмеченные недостатки не влияют на качество результатов, полученных в диссертации.

Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертации. По теме диссертации опубликовано 53 статьи в журналах, в сборниках трудов международных конференций и в виде сообщений ПИЯФ и CERN, из них 14 в ведущих реферируемых журналах NIM, ПТЭ, JINST и др. Материалы работы многократно докладывались автором на международных научных конференциях. По теме диссертации защищено два патента на полезную модель.

Диссертация была заслушена на институтском семинаре ИФВЭ 15.12.2016 и получила положительную оценку.

Представленная диссертационная работа А. П. Кашука является законченным научным исследованием и полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики, а её автор, А. П. Кашук, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Отзыв составил
Доктор физико-математических наук

В.Ф. Образцов