

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук
Шрейбер Ирины Владимировны
на диссертационную работу

Эпштейна Леонида Борисовича
«Первичный триггер электромагнитного калориметра эксперимента COMET»,
представленную в диссертационный совет 24.1.162.01 на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа Эпштейна Л. Б. посвящена разработке, созданию и тестированию системы первичного триггера электромагнитного калориметра для эксперимента COMET, реализуемого в J-PARC (Япония). Физической задачей данного эксперимента является поиск когерентной безнейтринной конверсии мюона в электрон в поле ядра ($\mu^- N \rightarrow e^- N$). Для решения данной задачи необходим эффективный отбор событий с электронами энергией около 105 МэВ, в условиях высокой загрузки, обусловленной как аппаратурными, так и физическими фоновыми процессами.

С точки зрения экспериментальной постановки задачи к первичному триггеру калориметра предъявляются достаточно строгие требования по быстродействию, энергетическому разрешению и радиационной стойкости. В связи с этим разработка специализированной аппаратной архитектуры и быстрых алгоритмов отбора в режиме реального времени является актуальной и сложной научно-технической задачей. В данной работе для выполнения этих требований аппаратная архитектура, алгоритм кластеризации и временная схема триггера рассматриваются не изолированно, а как единая система.

Тема диссертации имеет непосредственную актуальность для эксперимента COMET, а также представляет интерес для современных экспериментов физики высоких энергий как задача создания быстродействующей многоканальной электроники и алгоритмов онлайн-обработки. По своему содержанию работа соответствует научной специальности 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики».

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность и достоверность научных положений и полученных результатов подтверждается глубокой проработкой архитектуры триггерной системы, использованием

современных средств автоматизированного проектирования и детальным компьютерным моделированием. Сформулированные в работе выводы опираются на результаты экспериментальных проверок на стендовом оборудовании, а также на успешные испытания модулей на радиационную стойкость (гамма-кванты и нейтроны) и пучковые тесты на выведенном пучке электронов.

Существенным достоинством работы является то, что показан не только конечный вариант системы, но и ход экспериментальной отработки. В частности, были изменены архитектура формирования триггера, тип АЦП и организация передачи данных после выявления недостаточной скорости. Это позволяет отследить связь между сформулированными техническими требованиями, реальными ограничениями и принятыми модификациями системы.

Представленные в диссертации данные в целом достаточны для обоснования основных положений и выводов. Основные результаты исследований докладывались на международных конференциях и опубликованы в профильных рецензируемых научных изданиях.

Оценка научной новизны исследования

В работе Эпштейна Л. Б. научная новизна в первую очередь носит приборно-методический характер. Наиболее существенные полученные результаты:

- Разработана и создана многоканальная аппаратура первичного триггера электромагнитного калориметра, обеспечивающая параллельную обработку входных импульсов со 128 каналов при частоте дискретизации 80 МГц и программную настройку параметров измерительного тракта и алгоритма обработки.
- На базе ПЛИС (FPGA) разработан и реализован оригинальный алгоритм кластеризации сигналов в реальном времени. Выбор размера кластера выполнен с учетом распределения энергии электромагнитного ливня, электронного шума и требований к подавлению DIO-фона. Алгоритм позволяет оперировать компактными группами кристаллов электромагнитного калориметра, минимизируя наложения (pile-up), и обеспечивает энергетическое разрешение лучше 5% в условиях высокой фоновой загрузки.
- Предложена и реализована схема формирования триггеров, позволившая соблюсти ограничения по времени выдачи сигнала. Также продемонстрирована работоспособность спроектированной системы в условиях радиационного фона эксперимента COMET.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов

Основная значимость исследования является практической в связи с приборно-методическим характером работы. Практическая ценность заключается в разработке и создании работающей системы первичного триггера, включающая электронные модули, программируемую логику, средства калибровки, диагностики и управления. Разработанные решения проверены на стендах и электронном пучке, а также изготовлены комплекты триггерной электроники для Этапа-I эксперимента COMET.

Научно-методическая ценность работы связана с обоснованием архитектуры калориметрического триггера и параметров алгоритма, работающего в строгих ограничениях по времени, разрешению и нагрузке. Полученный опыт разработки и экспериментальной отработки может быть полезен при создании быстродействующих триггеров и систем онлайн-обработки для других детекторов.

Замечания по диссертационной работе

Несмотря на высокий научно-технический уровень работы, по тексту диссертации имеется ряд замечаний. Указанные замечания носят уточняющий и рекомендательный характер и не снижают высокой оценки работы в целом.

- В технических требованиях (стр. 40) и при описании допустимой области размещения электроники (стр. 53) приводится нейтронный поток порядка 10^{12} нейтронов/см², тогда как для выбранной области В (стр. 54) – 10^6 нейтронов/см². Испытания компонентов (стр. 59) проводились до 10^{12} нейтронов/см². Разница в шесть порядков требует дополнительных пояснений радиационной нагрузки, таких как значений ожидаемого потока непосредственно в точке размещения и консервативного квалификационного уровня. Дополнительный незначительный терминологический комментарий, который не влияет на понимание сути работы: при единицах измерения нейтронов/см² речь должна идти не о потоке, а об интегральном флюенсе.
- На стр. 70–71 в тексте диссертации ключевые экспериментальные характеристики системы, эффективность и энергетическое разрешение, приведены без указания погрешностей. Хотя полученные величины обеспечивают необходимый запас по отношению к техническим требованиям «лучше 5%» (стр. 40), стандарты представления результатов в экспериментальной физике требуют представления оценки статистических и систематических неопределенностей.
- Временная задержка является одним из ключевых параметров представленной системы, однако результаты ее исследования представлены недостаточно полно. Приведена априорная расчетная оценка задержки 675 нс (стр. 73), тогда как экспериментальная проверка первоначальной версии показала значение 1.6 мкс (стр. 74), что значительно превышает требуемые технические параметры. Затем подробно описана модернизация системы для приведения ее в соответствие с

техническими требованиями, однако приводится одиночная осциллограмма после модернизации с промежуточными временными отметками ~ 560 нс и ~ 824 нс и делается общий вывод, что «задержка не превышает 900 нс» (стр. 78), без явного указания измеренного значения и его разброса. Представление результатов в виде графика распределения времени задержки позволило бы оценить среднее значение и разброс, а также сделало бы подтверждение выполнения технического требования более полным.

- В описании физической мотивации автор использует обобщенный термин «нарушение закона сохранения лептонного числа» (стр. 4, 5, 15). На стр. 15 вводится английский термин, который проясняет процесс и нарушение CLFV – charged lepton flavor violation, то есть нарушение лептонного аромата. Во избежание двусмысленности с процессами, нарушающими полное лептонное число, более строгим было бы использование термина «нарушение сохранения лептонного аромата» или «несохранение индивидуальных лептонных чисел». Дополнительно на стр. 10 в тексте диссертации допущена досадная ошибка: искомый процесс ошибочно назван конверсией «электрона в мюон».
- В тексте диссертации встречаются незначительные опечатки, отдельные терминологические, стилистические и грамматические неточности, которые не влияют на понимание сути работы и требуют только редакционную корректировку.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертация Л. Б. Эпштейна представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена конкретная и технически сложная задача создания первичного триггера электромагнитного калориметра эксперимента COMET. Полученные результаты имеют научно-методическую и практическую ценность, а созданная аппаратура доведена до уровня, необходимого для использования непосредственно в эксперименте.

Высказанные выше замечания не затрагивают основных результатов и не меняют ее общей положительной оценки. Основные положения работы подтверждены представленными результатами, поставленные во введении задачи решены. Диссертация является значимым вкладом в развитие детекторных систем для поиска физики за пределами Стандартной Модели.

Диссертационная работа Эпштейна Леонида Борисовича «Первичный триггер электромагнитного калориметра COMET» удовлетворяет требованиям, установленным пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Я, Шрейбер Ирина Владимировна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Эпштейна Леонида Борисовича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Заместитель заведующего Лабораторией анализа данных физики высоких энергий
Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»,
кандидат физико-математических наук (специальность 1.3.15 – Физика высоких энергий)

Шрейбер Ирина Владимировна

Адрес: 634050 Томская обл., г. Томск, пл. Новособорная, д. 1,

Телефон: (3822) 52-96-51, e-mail: irina.shreyber@yandex.com

«01» октября 2026 г.

Подпись Шрейбер Ирины Владимировны заверяю

Декан Физического факультета ТГУ

«01» октября 2026 г.



Филимонов С.Н.