

Проректор по научной работе
Санкт-Петербургского
государственного университета
С.В. Микушев

" 15 " 07 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Санкт-Петербургского государственного университета на диссертацию Финогеева Дмитрия Андреевича «Разработка бестриггерной потоковой системы сбора данных переднего адронного калориметра эксперимента CBM», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Первые в мире пучки релятивистских ядер, по-лученные в 1970 году на синхрофазотроне в ОИЯИ (г. Дубна), открыли совершенно новое направление фундаментальных исследований — *релятивистскую ядерную физику*. Новые этапы в освоении фундаментальных свойств сильно взаимодействующей ядерной материи последовали, шаг за шагом, вслед за развитием детекторных систем и более мощных ускорителей: BEVALAC (1974), SPS (1976), RHIC (2000) и Большого адронного коллайдера LHC, (2008). За последние два десятилетия -- с 2000 года в Беркли (США), на коллайдере релятивистских тяжелых ионов RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) , и с 2009 года -- на Большом адронном коллайдере (LHC) в ЦЕРН, были получены новые и уникальные данные в экспериментах по столкновениям релятивистских тяжелых ионов. Регистрация в столкновениях релятивистских ионов и всестороннее изучение свойств нового состояния материи – так называемой кварк-глюонной плазмы (QGP), из которой, как предполагается по современным представлениям, состояла ранняя Вселенная в первые микросекунды после Большого взрыва, является одной из интереснейших задач современной физики. Не менее интересно и развернутое исследование

предполагаемого перехода от фазы адронного газа к состоянию кварк-глюонной плазмы, который, как ожидают, может проходить при высоких температурах и/или высоких значениях барионной плотности. Существование критической точки КХД фазового перехода первого рода предсказывается в вычислениях на решетках при конечном значении химического потенциала, главным остается вопрос, связанный с экспериментальными исследованиями фазового перехода первого рода и положением критической точки для ядерной материи на фазовой диаграмме.

Эти исследования интенсивно ведутся в настоящее время на фиксированных мишенях в эксперименте NA61/SHINE на SPS в ЦЕРН, в экспериментах программы Beam Energy Scan (BES-I и BES-II) на RHIC, а также запланированы на строящемся коллайдере тяжелых ионов NICA (Nuclotron-based Ion Collider facility) в ОИЯИ (Дубна, РФ) и на ускорителе FAIR (The future Facility of Antiproton and Ion Research) в Дармштадте, Германия. Основной общей целью эксперимента CBM (Compressed Baryonic Matter) на FAIR, является детальное исследование фазовой диаграммы сильновзаимодействующей материи в области умеренных температур и высокой барионной плотности.

Программа CBM исследования включает изучение таких вопросов КХД как конфайнмент, восстановление киральной симметрии и уравнение состояния материи при высоких барионных плотностях. При этом, соответствующие экспериментальные прецизионные исследования редких процессов с выходом таких частиц как мультистранные гипероны, очарованные частицы и лептонные пары, предъявляют чрезвычайно высокие требования к аппаратуре, которая должна работать на пучках высокой интенсивности (до $10^9/s$) и при частотах событий на уровне ~ 10 МГц. Для создания эксперимента CBM на FAIR требуются очень быстрые и радиационно-стойкие детекторы, необходима разработка новых концепций считывания и анализа данных, а также и применение высокопроизводительных вычислительных кластеров для онлайн-анализа данных. В настоящее время идет интенсивная работа над созданием и испытаниями детекторов-прототипов для CBM, электроники и систем потокового считывания информации и алгоритмов реконструкции событий. Таким образом, тема данной работы "Разработка бестриггерной

поточковой системы сбора данных переднего адронного калориметра эксперимента CBM^a является чрезвычайно актуальной и значимой.

Основной целью диссертационной работы является разработка и тестирование поточковой системы сбора данных с переднего адронного калориметра эксперимента CBM, ее интеграция в общую систему сбора данных CBM. Для достижения этой цели в данной работе были поставлены и выполнены следующие задачи:

1) разработка бестриггерной поточковой системы сбора данных для переднего адронного калориметра PSD эксперимента CBM, которая должна функционировать в условиях высокого радиационного фона и при высокой нагрузке детектора до 1 МГц на канал. При этом наличие высокого радиационного фона не позволяет размещение детектирующей и вычислительной электроники вблизи калориметра.

2) обеспечение бестриггерного режима сбора данных эксперимента CBM, обработка и передача всех сигналов детектора PSD при нагрузке до 1 МГц в вычислительный кластер эксперимента CBM для реконструкции и отбора событий.

3) интегрирование разработанной поточковой системы сбора данных с переднего адронного калориметра эксперимента CBM в общую систему сбора данных CBM, и тестирование в условиях приближенных к эксплуатационным.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые проведена прямая оцифровка малых сигналов без использования активной электроники на стороне детектора, что является новым подходом для проектирования систем сбора данных с детекторов в ядерной физике, позволяющим реализовать максимально возможный динамический диапазон детектора. Научная значимость разработки системы сбора данных детектора PSD определяется тем, что в результате обеспечивается решение экспериментальных задач переднего адронного калориметра в эксперименте CBM на ускорителе FAIR.

Практическая значимость определяется тем, что выполнена интеграция модуля передатчика GBT в ПЛИС платы ADC для синхронизации тактовых сигналов, временной синхронизации и передач данных с детектора

PSD в систему сбора данных эксперимента CBM. Разработанная система сбора данных для калориметра PSD позволяет реализовать бестриггерный сбор данных по протоколу GBT, сортировку и анализ событий на наличие наложений вычислительными методами ПЛИС во время измерений. Также практическое значение имеет возможность адаптации разработанной логической структуры ПЛИС платы ADC к различным протоколам передачи данных и схемам временной синхронизации, что расширяет применимость разработанной системы сбора данных в различных экспериментах.

Автором диссертации опубликовано 6 научных статей в изданиях, входящих в список ВАК, результаты исследований докладывались на 4-х научных конференциях. Публикации полностью отражают содержание диссертации.

Диссертация написана на 143 страницах, содержит 3 таблицы, 56 рисунков, список цитируемой литературы включает 73 наименования. Структура диссертации: введение, 4 главы, заключение, список литературы и приложение с листингами исходного разработанного кода.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, библиографии и приложения.

Во введении дается обоснование актуальности разработки системы сбора данных переднего адронного калориметра для эксперимента CBM, сформулированы задачи и цели разработки системы, показаны новизна работы и ее практическая значимость.

В первой главе приводится описание эксперимента CBM на ускорительном комплексе FAIR. Дается подробное описание системы сбора данных эксперимента CBM и ее ключевых элементов: FLES (First LevelEvent Selector) – распределенного вычислительного кластера для реконструкции и отбора событий, TFC (Time and Fast Control) – системы временной синхронизации, CRI (Common Readout Interface) – электронной платы для сбора детекторных данных. Плата CRI является ключевым элементом в системе сбора данных эксперимента CBM. Для функционирования детектора PSD необходима разработка части логической структуры ПЛИС платы CRI, которая была выполнена в рамках данной диссертационной работы. В первой

главе представлены основные компоненты логической структуры ПЛИС платы CRI. Также приводится описание установки mCBM, которая позволяет испытывать прототипы детекторных систем и систему сбора и анализа эксперимента CBM в условиях максимально приближенных к эксплуатационным на эксперименте CBM.

Во второй главе приводится краткое описание переднего адронного калориметра с поперечной и продольной сегментацией для измерения центральности и плоскости реакции в ядро-ядерных столкновениях в эксперименте CBM. Обсуждаются особенности конструкции калориметра и его модулей, организация светосбора с секций модулей. Приводятся результаты измерений энергетического разрешения и линейности отклика калориметра в диапазоне энергий адронов 2 – 10 ГэВ в сеансах на тестовых пучках в CERN, в которых принимал активное участие автор диссертации. Приводятся результаты измерения энергетического разрешения модуля калориметра, фотодетекторы которого были предварительно облучены потоками нейтронов близкими к ожидаемым потокам нейтронов в реальном физическом эксперименте на CBM. Показано, что экспериментально измеренный отклик калориметра и модуля с облученными фотодетекторами соответствует требованиям эксперимента. Во второй части данной главы обсуждаются требования к структуре считывающей и аналоговой электроники калориметра, ее расположение в эксперименте CBM с учетом радиационных условий эксперимента. Приводятся результаты тестирования нескольких вариантов платы ADC считывающей электроники для оцифровки сигналов с фотодетекторов калориметра. Показано, что самой подходящей электроникой для оцифровки сигналов фотодетекторов калориметра PSD, удовлетворяющей требованиям CBM, является плата ADC разработанная в университете Uppsala (г. Уппсала, Швеция) для электромагнитного калориметра эксперимента PANDA. Представлены результаты тестов этой платы на космических мюонах и на тестовых пучках mCBM, которые показали, что при оцифровке сигналов с фотодетекторов калориметра PSD данной платой ADC, можно получить хорошее разделение шумового пьедестала от сигналов порядка 1 MIP. Также, было показано, что для увеличения динамического диапазона необходимо разработать специальную «интерфейсную плату» для корректировки нулевого уровня амплитудно-цифрового преобразователя. Приведены результаты по

измерению ослабления аналогового сигнала и искажению его формы при передаче по кабелю длиной 60 м от платы с фотодетекторами, установленными в модулях калориметра, до считывающей электроники, установленной в радиационно-безопасном помещении.

В третьей главе приводится описание разработанных автором диссертации логической структуры ПЛИС платы ADC и части логической структуры ПЛИС платы CRI для передачи данных с детектора PSD в общую систему сбора данных CBM и их временной синхронизации со считываемыми событиями с других детекторных систем эксперимента CBM. Приведена схема синхронизации платы ADC с системой сбора данных CBM которая включает разработанную схему переключения тактовых сигналов платы ADC с внутреннего генератора на сигналы, переданные по передатчику GBT. Дается подробное описание способа интеграции платы ADC в систему сбора данных эксперимента CBM. Приводится схема регистрации событий в бестриггерном режиме, передачи данных и управления системой сбора данных детектора, которая выполняется через плату CRI по протоколу GBT.

В четвертой главе приводится описание созданного в ИЯИ РАН стенда для разработки логической структуры ПЛИС платы ADC и для создания прототипа части логической структура ПЛИС "Detector Specific Part" платы CRI для PSD. Разработанный стенд позволяет собирать данные платой ADC по протоколу GBT на персональный компьютер и управлять электроникой системы сбора данных. Дается описание интеграции прототипа детектора PSD – mPSD в общую систему сбора данных установки mCBM для проведения тестов на пучках при нагрузках, близких к нагрузкам, ожидаемых на CBM. Приводятся результаты испытания прототипа детектора PSD на установке mCBM, а именно, наличие временной корреляции между детектором mPSD и другими детекторными системами mCBM, а также, соответствие измеренных амплитудных спектров при регистрации фрагментов ядер и энергетический профиль модуля с данными, полученными в результате симуляции. Приведенные экспериментальные результаты показывают корректную работу системы сбора данных калориметра PSD в условиях максимально приближенных к эксплуатационным.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы по разработке системы сбора данных детектора PSD для эксперимента

СВМ и ее тестирование на собранном стенде в ИЯИ РАН и на установке mСВМ.

Достоверность и обоснованность результатов диссертации

Разработанная система сбора данных для детектора PSD была испытана на стенде при регистрации фотонов от лазера с ультракоротким импульсом. Испытания показали, что разработанная система сбора данных имеет необходимый динамический диапазон 500 и хорошее разделение сигнал/шум для минимального сигнала амплитудой 1 МИП. Интеграция разработанной системы сбора данных калориметра PSD в систему сбора данных установки mСВМ и испытание ее на пучках показали корректную и стабильную работу. В качестве критерия корректной работы системы рассматривались данные набранные синхронно со всеми детекторами эксперимента mСВМ. Данные оценивались по наличию временной корреляции со всеми детекторами эксперимента, а также, по совпадению измеренных данных с данными, полученными из симуляции.

Соответствие содержания диссертации автореферату и указанной специальности.

Автореферат соответствует и достаточно полно отражает содержание диссертации. Область работы полностью соответствует требованиям паспорта специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики (п. 2 Разработка новых принципов и методов измерений физических величин, основанных на современных достижениях в различных областях физики и позволяющих существенно увеличить точность, чувствительность и быстродействие измерений. Разработка и создание научной аппаратуры и приборов для экспериментальных исследований в различных областях физики, п. 5 разработка и создание экспериментальных установок для проведения экспериментальных исследований в различных областях физики, п.7 разработка и создание средств автоматизации физического эксперимента).

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы опубликованы в 6-и статьях в журналах рекомендованных ВАК. Результаты работы докладывались соискателем на 4-х международных конференциях.

Замечания по диссертационной работе

1) Изучение влияния облучения фотодетекторов в ходе эксплуатации калориметра на его основные характеристики – важная задача при проектировании системы сбора данных.

а. В данной работе, на радиационное повреждение испытывался фотодетектор модели S12572-3010, отличной от той, которую планируется использовать при эксплуатации калориметра S14160-3010P. Проводились ли сравнения деградации для этих двух моделей фотодетекторов?

б. В данной работе сказано, что при измерениях на облученном фотодетекторе выполнялась компенсация деградации увеличением темнового тока и дополнительным отбором событий. В связи с этим возникают вопросы. Было бы желательно указать на какую величину была произведена компенсация напряжения смещения фотодетектора и как это могло повлиять на динамический диапазон детектора? Какова доля отброшенных событий при дополнительном отборе и как это повлияло на эффективность детектора? К сожалению, работа не дает подробного описание алгоритма компенсации для облученных фотодетекторов.

2) На рис. 3.1 представлена схема синхронизации тактовых сигналов платы ADC, а на рис. 3.2 представлена схема тактовых сигналов логической структуры ПЛИС платы ADC. Эти два рисунка важны для понимания общей проблемы передачи данных и тактовых сигналов и временной синхронизации событий детектора PSD с другими детекторами эксперимента CBM. Однако, присутствующее дублирование на данных рисунках части функциональной схемотехники ADC и FPGA, сильно затрудняет восприятие общей логики проблемы применения передатчика GBT на плате ADC. Было бы желательно либо объединить эти две схемы, либо ограничиться второй и также более подробно раскрыть фразу на стр.61 "для тактирования и передатчика и приемника используется общий CPLL" (расшифровать и привести более общую схему).

3) В диссертации имеется ряд незначительных недочетов. В частности, присутствуют опечатки, научный жаргон и некоторые стилистические погрешности, что, впрочем, естественно для текста такого большого объема (например, лишний символ в названии разъемов «TRG_OUT ξ », «BC_IN ξ » ... (стр. 82). Некоторые сокращения не расшифрованы в тексте «SFP» (стр. 44); сокращение «CPLL» (стр. 61) -- Coupled Phase-Locked Loop, не расшифровано ни в тексте, ни в списке сокращений). На стр 15 "энергитическое" → "энергетическое". На стр 17 "адоптирована" → "адаптирована". На стр 42 "и доза и потоки нейтронов" → "и доза, и потоки нейтронов. Замечания к автореферату; объем превышает допустимый 1 печатный лист, предполагаемый для кандидатской диссертации

Однако отмеченные выше недостатки не затрагивают основных выводов и не умаляют научной и практической значимости диссертационной работы.

Заключение по диссертации

Диссертация Финогеева Дмитрия Андреевича «Разработка бестриггерной потоковой системы сбора данных переднего адронного калориметра эксперимента CBM» представляет собой законченную работу в области техники эксперимента ядерной физики и является значимым вкладом в развитие детекторных систем. В работе в полной мере описан подход к проектированию системы сбора данных для детекторов, применимый для широкого круга детекторных систем в ядерной физике.

Работа оформлена с использованием текстового редактора LaTeX, что обеспечивает рациональное размещение текста, картинок и таблиц, а наличие гиперссылок внутри текста делает удобным прочтение диссертации и автореферата. Личный вклад автора диссертации в описанную разработку системы сбора данных калориметра PSD является определяющим. Вынесенные на защиту результаты получены автором лично, либо при его определяющем участии.

Диссертационная работа Финогеева Д.А. отвечает всем требованиям ВАК России, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики, а ее автор, Дмитрий

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Почтовый адрес: 199034, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

Университетская наб., д. 7/9

Телефон: +7 (812) 328-20-00

E-mail: spbu@spbu.ru

Web-сайт: <https://spbu.ru/>

Список основных публикаций сотрудников организации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет.

1) Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA
MPD Collaboration • V. Abgaryan et al.

e-Print: 2202.08970 [physics.ins-det], направлено в European Physical Journal C

Unveiling the strong interaction among hadrons at the LHC

ALICE Collaboration • Shreyasi Acharya (Calcutta, VECC) et al.

e-Print: 2005.11495 [nucl-ex]

DOI: 10.1038/s41586-020-3001-6 (publication), 10.1038/s41586-020-03142-2 (erratum)

Published in: Nature 588 (2020), 232-238, Nature 590 (2021), E13 (erratum)

2) Initial States in Nucleus-Nucleus Collisions at Energies of the NICA Collider

I. Altsybeev (St. Petersburg State U.), V. Abramovsky (Novgorod State U.), E. Andronov (St. Petersburg State U.), A. Baldin (Dubna, JINR), G. Feofilov (St. Petersburg State U.) et al.

DOI: 10.1134/S1063779621040043

Published in: Phys.Part.Nucl. 52 (2021) 4, 584-590

3) Conceptual design of the Spin Physics Detector

SPD proto Collaboration • V.M. Abazov (Unlisted) et al.

e-Print: 2102.00442 [hep-ex]

4) Stopping of protons in pA collisions at SPS and NICA energies in analytical hydrodynamic model and in SMASH event generator

V. Ermakova (St. Petersburg State U.), V. Sandul (St. Petersburg State U.), G. Feofilov (St. Petersburg State U.)

DOI: 10.1088/1742-6596/1690/1/012135

Published in: J.Phys.Conf.Ser. 1690 (2020) 1, 012135

5) Fast beam-beam collisions monitor for experiments at NICA

A.A. Baldin (Dubna, JINR), G.A. Feofilov (St. Petersburg State U.), P. Har'yuzov (Dubna, JINR), F.F. Valiev (St. Petersburg State U.)

DOI: 10.1016/j.nima.2019.04.108

Published in: Nucl.Instrum.Meth.A 958 (2020), 162154

6) Monte-Carlo study of long-range correlations of average transverse momentum and multiplicity for strange particles in pp-collisions at the LHC energies

V. Sandul (St. Petersburg State U.), G. Feofilov (St. Petersburg State U.)

DOI: 10.1088/1742-6596/1390/1/012029

Published in: J.Phys.Conf.Ser. 1390 (2019) 1, 012029

7) Influence of the Effects of Color Reconnection and the Formation of Hadronic Jets on the Distribution of Charged Particles over the Transverse Momentum in pp-Collisions at the Energies of the Large Hadron Collider

V.S. Sandul (St. Petersburg State U.), V.V. Vechernin (St. Petersburg State U.), G.A. Feofilov (St. Petersburg State U.)

DOI: 10.3103/S1062873819090247

Published in: Bull.Russ.Acad.Sci.Phys. 83 (2019) 9, 1168-1172, Izv.Ross.Akad.Nauk Ser.Fiz. 83 (2019) 9, 1277-1281

8) A New Detector for Studying Cumulative Processes in Hadronic Collisions

T.V. Lazareva (St. Petersburg State U.), F.F. Valiev (St. Petersburg State U.), V.I. Zhrebchevsky (St. Petersburg State U.), D.G. Nesterov (St. Petersburg State U.), G.A. Feofilov (St. Petersburg State U.)

DOI: 10.3103/S1062873819090144

Published in: Bull.Russ.Acad.Sci.Phys. 83 (2019) 9, 1155-1160, Izv.Ross.Akad.Nauk Ser.Fiz. 83 (2019) 9, 1264-1269

9) A next-generation LHC heavy-ion experiment

D. Adamovǎ (Rez, Nucl. Phys. Inst.), G. Aglieri Rinella (CERN), M. Agnello (INFN, Turin and Turin Polytechnic), Z. Ahammed (IISER, Kolkata), D. Aleksandrov (Kurchatov Inst., Moscow) et al.

e-Print: 1902.01211 [physics.ins-det]

10) Experimental investigation of new ultra-lightweight support and cooling structures for the new Inner Tracking System of the ALICE Detector

V.I. Zhrebchevsky (St. Petersburg State U.), I.G. Altsybeev (St. Petersburg State U.), G.A. Feofilov (St. Petersburg State U.), A. Francescon (CERN), C. Gargiulo (CERN) et al.

DOI: 10.1088/1748-0221/13/08/T08003

Published in: JINST 13 (2018) 08, T08003

11) The Small Acceptance Vertex Detector of NA61/SHINE

NA61/SHINE Collaboration • M. Deveaux (Goethe U., Frankfurt (main)) et al.

DOI: 10.1051/epjconf/201817110003 , 10.1051/epjconf/201817121001

Published in: EPJ Web Conf. 171 (2018), 10003, EPJ Web Conf. 171 (2018), 21001

12) Angular correlations with charmed hadrons in the Monte-Carlo model with string repulsion

Igor Altsybeev, Grigory Feofilov

e-Print: 1711.04862 [nucl-th]

DOI: 10.18502/ken.v3i1.1755

Published in: KnE Energ.Phys. 3 (2018), 280-285

13) Correlation of strange particles production with multiplicity in a multi-pomeron exchange model

G. Feofilov (St. Petersburg State U.), V. Kovalenko (St. Petersburg State U.), A. Puchkov (St. Petersburg State U.)

e-Print: 1710.08895 [hep-ph]

14) Correlation between heavy flavour production and multiplicity in pp and p-Pb collisions at high energy in the multi-pomeron exchange model

Grigory Feofilov (St. Petersburg State U.), Vladimir Kovalenko (St. Petersburg State U.), Andrei Puchkov (St. Petersburg State U.)

e-Print: 1711.00842 [nucl-th]

DOI: 10.1051/epjconf/201817118003

Published in: EPJ Web Conf. 171 (2018), 18003