

# **«Разработка программно-алгоритмического комплекса для реконструкции, идентификации и отбора мюонов высоких энергий в эксперименте CMS на LHC»**

## **Коллектив соавторов:**

Н.Н. Войтишин<sup>1</sup>, А.В. Зарубин<sup>2</sup>, В.Ю. Каржавин<sup>2</sup>, А.Ю. Каменев<sup>2</sup>, В.В. Кореньков<sup>1</sup>,  
А.В. Ланёв<sup>2</sup>, В.А. Матвеев<sup>3</sup>, В.В. Пальчик<sup>1</sup>, В.В. Перельгин<sup>2</sup>, С.В. Шматов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Лаборатория информационных технологий ОИЯИ

<sup>2</sup> Лаборатория физики высоких энергий ОИЯИ

<sup>3</sup> Дирекция ОИЯИ

[Цикл статей](#) основан на результатах исследований, выполненных в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) и Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН, Женева) в рамках темы «CMS. Компактный мюонный соленоид на LHC, 02-0-1083-2009/2023».

Цикл работ объединяет результаты разработок математических методов и алгоритмов идентификации и реконструкции мюонов высоких энергий, их отбора в режиме реального времени и создания соответствующих программных комплексов для подготовки, реализации и развития программы физических исследований в канале с парой мюонов на многоцелевом детекторном комплексе «Компактный мюонный соленоид» (CMS) на LHC.

Систематическое изучение процессов рождения пар мюонов высоких энергий в эксперименте CMS было инициировано физиками ОИЯИ в 2002 году для проверки предсказаний СМ в новой области энергий и поиска сигналов новой физики по возможным отклонениям от ее предсказаний. Это направление физической программы эксперимента CMS стало одним из приоритетных для специалистов RDMS (Russia and Dubna Member States — коллаборация институтов России и ОИЯИ в CMS) из ОИЯИ.

Отличительными чертами мюонов высоких энергий (от нескольких сотен ГэВ до нескольких ТэВ), осложняющими их реконструкцию и отбор, являются высокая множественность вторичных частиц, малая кривизна трека, высокая чувствительность точности реконструкции к пространственной разбалансировке детекторных систем и т.д. Кроме того, прецизионные (с точностью до нескольких %) измерения импульса элементарных частиц затруднены из-за все более усложняющейся конфигурации экспериментальных установок, увеличения энергии и интенсивности ускоряемых пучков, что приводит к увеличению потока данных (до нескольких десятков МГц в точке взаимодействия), временному наложению событий (до нескольких десятков взаимодействий на одно событие), возрастанию множественности рожденных частиц в событии (до нескольких сотен на одно событие) и, как следствие, к «зашумлению» траекторий частиц и высокому уровню загрузок в детекторах. Ранее в ускорительных экспериментах подобные сигналы не наблюдались, что влечет за собой необходимость разработки и адаптации к подобным условиям эксперимента соответствующего математического аппарата и основанных на нем алгоритмов и методик.

## **Основные результаты, полученные в рамках представленного цикла работ:**

### **1. Разработка алгоритмов реконструкции мюонов высоких энергий**

Программно-алгоритмическая архитектура спроектирована с использованием концепции региональной реконструкции и возможностью работы в системах распределенной обработки данных. Созданные алгоритмы локальной и глобальной реконструкций основаны на итерационных методах восстановления траекторий частиц с использованием рекурсивных

фильтров и байесовского подхода оценки неопределённости вектора состояния (фильтр Калмана). С учетом особенностей мюонов высоких энергий были разработаны, внедрены и изучены на данных Монте-Карло и эксперимента [2–7, 8–13] следующие алгоритмы и методики:

- Алгоритм разделения перекрывающихся сигналов в катодно-стриповых камерах (CSC) эксперимента CMS, повышающий точность измерения азимутальной координаты мюонов в отдельно взятом слое детектора.
- Модифицированная с учетом специфики геометрии процедура реконструкции хитов в дубненских мюонных станциях ME1/1 эксперимента CMS, позволяющая восстанавливать хиты и трек-сегменты с высокой эффективностью в зоне максимальных загрузок детекторных систем эксперимента.
- Алгоритм реконструкции отдельных участков трека (трек-сегменты) в различных детекторах мюонной системы (дрейфовые камеры DT, катодно-стриповые камеры CSC, камеры с резистивными пластинами RPC) и полоскового и пиксельного детекторов системы трекера.
- Алгоритм локальной реконструкции трека, сшивающий трек-сегменты в пределах одной системы (мюонной или трекерной).
- Алгоритмы глобальной реконструкции, объединяющие локальные треки в один общий и использующие различные комбинации локальных треков: локальные треки, найденные во всех детекторных подсистемах, реконструкция, основанная на использовании i) только хитов в трекере, ii) всех хитов в трекере и хитов только в одной мюонной станции, ближайшей к точке взаимодействия, iii) мюонных хитов из нескольких «чистых» станций, т. е. станций, менее всего подвергшихся влиянию вторичных взаимодействий.
- Алгоритмы, основанные на комбинации различных подходов — так называемые «коктейли» алгоритмов: i) объединяющий коллекции мюонных треков разных алгоритмов, ii) комбинация, основанная на сравнении качества фита алгоритмов, iii) комбинации, включающие все возможные алгоритмы.
- Методика определения поперечного импульса мюонов, основанная на подходе равноудаленных хитов траектории мюона, искривленной в магнитном поле.
- Методика измерения эффективности реконструкции мюонов из данных эксперимента с помощью метода «меченого и пробного мюона».
- Методика коррекции импульса мюонов на основании вычисления независимых поправок к импульсам положительно и отрицательно заряженных мюонов, исходя из данных по рождению  $Z^0$ -бозона.
- Методика последовательной коррекции данных для учета влияния систематических эффектов на точность реконструкции (конечного разрешения и излучение в конечном состоянии – FSR).

Все алгоритмы проходили настройку, оптимизацию и дальнейшее развитие на данных Монте-Карло, атмосферных мюонах и данных эксперимента, полученных при энергии взаимодействия пучков протонов в с.ц.м.  $\sqrt{s} = 7$  и 8 ТэВ (первый этап работы LHC – RUN1) и  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ (второй этап работы LHC – RUN2). Соответствующее программное обеспечение позволяет проводить выбор того или иного алгоритма либо в ручном, либо в автоматическом режиме в зависимости от качества работы алгоритмов при тех или иных условиях проведения эксперимента.

Разработанные алгоритмы позволяют проводить оффлайн реконструкцию мюонов с эффективностью не ниже 98% и точностью не хуже 5-7% в области значений импульса мюонов до 2000-3000 ГэВ/с. Для менее жестких мюонов точность значительно лучше (1-2% в области импульса до 300 ГэВ/с). При этом вероятность ошибочной идентификации знака заряда мюона составляет доли процента в центральной части установки CMS ( $|\eta| < 1.4$ ), а в торцевых — значение этой ошибки не превышает 6% во всех рассмотренных диапазонах  $p_T$  и  $\eta$  (до  $|\eta| = 2.4$ ).

## 2. Разработка методов идентификации и отбора мюонов и пар мюонов

Для анализа событий с мюонами, кроме точных алгоритмов их реконструкции, необходимо иметь высокоэффективную процедуру их идентификации и отбора, в том числе в режиме реального времени (в системе триггера). Членами авторского коллектива выполнены следующие работы [1, 5, 13–15]:

- Разработка методики идентификации мюонов, основанной на экстраполяции реконструированного трекового трека в наиболее вероятные области присутствия сигнала от мюона во внешних детекторных системах (электромагнитный калориметр, адронный калориметр, внешний адронный калориметр, мюонная система) и оценки комбинированной совместимости с использованием различных критериев согласия.
- Разработка методики объединения двух основных логических решений триггера первого уровня: триггер на одиночные мюоны и триггер на мюонную пару, осуществлена оптимизация кинематических порогов для эффективного отбора пар мюонов.
- Модернизация алгоритма реконструкции мюонов и пар мюонов в режиме реального времени, используемого в триггере второго уровня. В итоге алгоритм позволил проводить переоценку параметров траектории мюонов, полученных алгоритмом первого уровня, а также фильтрацию событий в соответствии с оптимизированными критериями отбора.
- Разработка методики применения критериев пространственной изолированности трека мюонов высоких энергий при отборе событий системами триггера высокого уровня. Данная методика позволила подавить фон от процессов КХД без существенного снижения эффективности отбора полезного сигнала.

Разработанные алгоритмы позволяют проводить отбор мюонов с высокой эффективностью (не ниже 97% триггером первого уровня и ~100% триггером высокого уровня для числа вершин в событии до 60) в широком диапазоне аксептанса мюонной системы установки CMS ( $|\eta| \leq 2.4$ ) и значений поперечного импульса рт мюона свыше 1000 ГэВ/с.

## 3. Внедрение методов и алгоритмов в программные комплексы

Все разработанные алгоритмы реконструкции мюонов, программные реализации методов их идентификации и отбора были включены в официальное программное обеспечение эксперимента CMSSW в виде единого программно-алгоритмического комплекса.

Программно-алгоритмический комплекс был адаптирован как для работы на локальных вычислительных ресурсах, так для использования в грид-ориентированных системах проекта WLCG (Worldwide LHC Computing Grid), обеспечивающих географически распределенную обработку данных. Соответствующая оптимизация и настройка осуществлялись в том числе с помощью грид-сайтов уровня Tier-2 и Tier-1 Многофункционального информационно-вычислительного комплекса ОИЯИ.

Созданный программно-алгоритмический комплекс использовался в качестве основного инструмента обработки и анализа данных во время всех трех этапов работы LHC. С его помощью при активном участии физиков ОИЯИ были сделаны открытие и дальнейшее изучение свойств бозона Хиггса (в канале распада на 4 лептона), выполнена серия поисковых экспериментов по обнаружению сигналов новой физики (темная материя, дополнительные хиггсовские состояния, дополнительные измерения в моделях низкоэнергетической гравитации, расширенные калибровочные модели и т.д.), и осуществлены прецизионные измерения характеристик процесса Дрелла-Яна (сечений, угловых распределений, пространственных асимметрий) для тестов предсказаний Стандартной модели.

Уникальность и новизна представленных разработок обусловлены не только вышеописанными особенностями условий работы алгоритмов, но и возможностью их масштабирования для условий проведения разных экспериментов. Большинство алгоритмов может быть адаптировано

для реконструкции заряженных частиц в условиях экспериментов на ускорительном комплексе NICA. В настоящее время эти работы уже ведутся, в частности, адаптированные алгоритмы включены в программный комплекс эксперимента BM@N для реконструкции траекторий заряженных частиц в системе дрейфовых камер и используются для реализации программы исследований эксперимента. Кроме того, разработанная методика может быть также полезна для экспериментов в области физики элементарных частиц с использованием космических лучей, для развития ядерно-физических технологий, наук о жизни, радиобиологии, биофизики и т.д.

Результаты цикла работ были включены в три докторские, три кандидатские и одну PhD диссертации.

**В представленный цикл работ входят 15 публикаций:**

1. A.M. Sirunyan et al. (CMS Collab.). “Performance of the CMS muon trigger system in proton-proton collisions at 13 TeV”, JINST 16 (2021) P07001.
2. A.M. Sirunyan et al. (CMS Collab.). “Performance of the reconstruction and identification of high-momentum muons in proton-proton collisions at 13 TeV”, JINST 15 (2020) P02027.
3. N.Voytishin. “Hit Reconstruction Improvements in the Cathode Strip Chambers of the CMS Experiment”, CEUR Workshop Proceedings 2507, 120–124, (2019).
4. A.M. Sirunyan et al. (CMS Collab.). “Performance of the CMS muon detector and muon reconstruction with proton-proton collisions at 13 TeV”, JINST 13 (2018) P06015.
5. A.M. Sirunyan et al. (CMS Collab.). “The Phase-2 Upgrade of the CMS Muon Detectors”, CMS-TDR-016, CERN-LHCC-2017-012, CERN, Geneva; ISBN 978-92-9083-457-1, 365 p..
6. V. Palichik, N. Voytishin. “New CSC segment builder algorithm with Monte-Carlo TeV muons in CMS experiment”, Phys. Part. Nuclei 48 №5, 786–788, (2017).
7. I. Golutvin, V. Karjavin, V. Palichik, N. Voytishin and A. Zarubin. “A New Segment Building Algorithm for the Cathode Strip Chambers in the CMS Experiment”, EPJ Web of Conferences 108, 02023, (2016).
8. A. Dolbilov, V. Korenkov, V. Mitsyn, V. Palichik, S. Shmatov, T. Strizh, E. Tikhonenko, V. Trofimov, N. Voytishin. “Grid technologies for large-scale projects”, U.T. PRESS, 978-606-737-039-3, (2015).
9. S. Chatrchyan (CMS Collab.). “The performance of the CMS muon detector in proton-proton collisions at 7 TeV at the LHC”, JINST 8 (2013) P11002.
10. S. Chatrchyan (CMS Collab.). “Performance of CMS muon reconstruction in pp collision events at 7 TeV”, JINST 7 (2012) P10002.
11. V. Khachatryan (CMS Collab.). “Measurement of the charge ratio of atmospheric muons with the CMS detector”, PLB 692 (2010) 83-104.
12. S. Chatrchyan, V. Khachatryan, A. M. Sirunyan et al. (CMS Collab.). “Performance of CMS Muon Reconstruction in Cosmic-Ray Events”, JINST 5, T03022 (2010).
13. G. Bayatian et al. (CMS Collab.). “CMS Physics Technical Design Report Vol.I: Detector performance and software”, CERN-LHCC-2006-001; CMS-TDR-008-1, CERN, Geneva, 2006; ISBN 978-92-9083-268-3, 521 p., pp. 332–364.
14. G. Bayatian et al. (CMS Collab.). “CMS Technical Design Report: The Trigger and Data Acquisition project, Vol.II, Data Acquisition and High-Level Trigger”, CMS-TDR-006-2, CERN/LHCC-2002-026, CERN, Geneva, 2002; ISBN 92-9083-111-4, 4681 p.
15. G. Bayatian et al. (CMS Collab.). “CMS Technical Design Report: The Trigger and Data Acquisition project, Vol.I, The Level-1 Trigger”, CMS-TDR-006-1, CERN/LHCC-2000–38, CERN-LHCC-2000-038, CERN, Geneva, 2000; ISBN 92-9083-110-2, 599 p.