

PACS: 13.25.-k, 13.85.-t, 07.05.Tp

RECONSTRUCTING THE K_s^0 - MESON FROM THE FIRST DATA OF CMS EXPERIMENT

S.T. Lukyanenko

National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology"

1, Academicheskaya Str., 61108 Kharkov, Ukraine

E-mail: lukyanenko@kipt.kharkov.ua

Received September 10, 2015

The Large Hadron Collider startup took place on November 2009 in CERN, at center-of-mass energies of 900 GeV for the colliding protons. The results of processing the first data accumulated by CMS experiment are presented. For processing and analyzing the track collections as well as the collection of identified particles have been used. The distributions of charged pions over their transverse momentum and pseudorapidity are built. K_s^0 -meson mass is reconstructed in channel of K_s^0 decay to two charged pions. Comparison with results of computer simulation of proton-proton interactions in CMS detector is also done. It is shown that reconstruction of events is adequate.

KEYWORDS: Large Hadron Collider, track collection, collection of identified particles, distributions of charged pions, K_s^0 -meson mass

РЕКОНСТРУКЦИЯ K_s^0 -МЕЗОНА ИЗ ПЕРВЫХ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА CMS

С.Т. Лукьяненко

Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт"

61108, ул. Академическая, 1, Харьков, Украина

В ноябре 2009 года в CERN состоялся запуск Большого адронного коллайдера при энергии в системе центра масс сталкивающихся протонов 900 ГэВ. Представлены результаты обработки первых данных, накопленных в эксперименте CMS. Для обработки и анализа использовались как трековая коллекция, так и коллекция уже идентифицированных частиц. Получены распределения заряженных пионов по их поперечному импульсу и псевдобыстроте, восстановлена масса K_s^0 -мезона в канале его распада на два заряженных пиона. Также приведено сравнение с результатами компьютерного моделирования протон-протонных столкновений в детекторе CMS. Показано, что реконструкция событий является адекватной.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Большой адронный коллайдер, трековая коллекция, коллекция идентифицированных частиц, распределения заряженных пионов, масса K_s^0 -мезона

РЕКОНСТРУКЦІЯ K_s^0 -МЕЗОНА З ПЕРШИХ ДАНИХ ЕКСПЕРИМЕНТУ CMS

С.Т. Лук'яненко

Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут"

61108, вул. Академічна, 1, Харків, Україна

У листопаді 2009 року в CERN відбувся запуск Великого адронного колайдера з енергією 900 Гев в системі центру мас протонів, які зіштовхуються. Представлені результати обробки перших даних, накопчених в експерименті CMS. Для обробки та аналізу використовувалися як трекова колекція, так і колекція вже ідентифікованих частинок. Отримано розподіли заряджених піонів по їх поперечному імпульсу та псевдобистроті, реконструйована маса K_s^0 -мезона в каналі його розпаду на два заряджених піона. Також наведено порівняння з результатами комп'ютерного моделювання протон-протонних зіткнень в детекторі CMS. Показано, що реконструкція подій є адекватною.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Великий адронний колайдер, трекова колекція, колекція ідентифікованих частинок, розподіли заряджених піонів, маса K_s^0 -мезона

Первые данные о взаимодействии протонов при $\sqrt{s}=900$ ГэВ были записаны детектором CMS [1] в конце ноября 2009 года. Накопленная интегральная светимость перед первой запланированной остановкой ЛHC и его энергия не давали возможность проводить обработку и анализ данных с целью поиска проявлений "новой физики". Поэтому в этот период нашей главной задачей была апробация программ обработки и анализа данных, а также освоение методов программного обеспечения эксперимента CMS (CMSSW) [2], необходимых для дальнейших исследований, напрямую связанных с возможностью обнаружения новых объектов: бозона Хиггса, SUSY-частиц, экзотических частиц и др.

Основой для обработки и анализа данных являются наборы (т. н. "коллекции") восстановленных физических объектов. Под восстановленными объектами подразумеваются идентифицированные заряженные и нейтральные частицы (с соответствующими кинематическими характеристиками), адронные струи и потерянный поперечный импульс в событии. Важной является коллекция Particle Flow (PF). Она включает в себя все восстановленные частицы, образующиеся в протон-протонных столкновениях и непосредственно регистрируемые детектором CMS, т.е. электроны, фотоны, мюоны и заряженные пионы. Её реализация возможна благодаря сильному магнитному полю детектора, высокому пространственному разрешению внутреннего трекового детектора и хорошей поперечной сегментации электромагнитного калориметра в детекторе CMS. Одной из базовых для получения упомянутых наборов является трековая коллекция. Она

содержит восстановленные треки всех заряженных частиц.

Чтобы апробация программ анализа и методов CMSSW не была самоцелью, было принято решение о выделении событий с рождением хорошо изученных K_s^0 -мезонов, так как анализ распределения таких событий, в частности, по инвариантной массе продуктов распада K_s^0 -мезона, даст возможность оценить качество работы детектора CMS и методов восстановления физических объектов. Более того, в CMSSW алгоритмы реконструкции объектов для коллекции PF стали применяться относительно недавно и к моменту запуска LHC были недостаточно сертифицированы. Поэтому имеет смысл сравнить результаты двух реконструкций K_s^0 -мезонов, одна из которых реализована на основе объектов коллекции PF, а другая - на основе объектов трековой коллекции. При корректности методик, ответственных за реконструкцию, и чётком понимании работы детектора результаты должны совпадать. Учитывая, что π -мезоны являются элементами обеих коллекций, мы остановились на идентификации K_s^0 -мезона по каналу его распада $K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$. Следует отметить, что при работе с трековой коллекцией применялась процедура т. н. “трековой очистки”. В статье приводятся основные параметры такой очистки, и показывается её необходимость на примере восстановления массы K_s^0 -мезона. Наконец, сравнение результатов обработки экспериментальных данных с компьютерным моделированием событий рождения K_s^0 -мезонов в детекторе CMS позволит оценить точность описания геометрии детектора и процессов взаимодействия частиц с его веществом в соответствующих пакетах CMSSW.

Целью работы является реконструкция массы K_s^0 -мезона из первых данных эксперимента CMS и оценка качества такой реконструкции, которая выполнена отдельно для двух разных коллекций физических объектов, а также сравнение результатов анализа реальных и псевдоэкспериментальных данных, полученных методом Монте-Карло.

Работа выполнена в CMS-группе Харьковского физико-технического института, которая является участником эксперимента CMS на LHC. Созданный ею вычислительный комплекс, интегрированный в GRID-инфраструктуру WLCG [3], уже несколько лет активно используется для хранения, обработки и анализа данных эксперимента CMS. Именно на нём с помощью CMSSW были проведены необходимые вычисления и получены результаты, представленные в статье. Разработанный на основе языков программирования C++ и Python, комплекс CMSSW даёт гибкие механизмы для имплементации в его структуру собственных целевых программных кодов. Несомненным его преимуществом является также возможность работы с известным пакетом обработки и хранения данных ROOT.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ВЫБОРКИ

Все результаты, представленные в статье, получены на основе обработки набора данных эксперимента CMS /MinimumBias/BeamCommissioning09-BSCNOBEAMHALO-Dec19thSkim_336p3_v1/RAW-RECO. Он сформирован из первичного набора “сырых” данных путём отсечки событий, не связанных со столкновением протонов, и содержит т. н. “Minimum Bias” (MB) события. “Сырые” данные представляют собой массив записанных сигналов от различных подсистем детектора CMS. Анализ их амплитуд, длительностей и форм, а также разбросов во времени, позволяет восстановить физические объекты. Под MB понимаются события, из которых исключены лишь упругие взаимодействия протонов. При этом основной вклад дают дифракционные процессы и квантово-хромодинамические процессы с малым переданным импульсом. Их отбор обеспечивался триггером, основу которого составляют два сцинтилляционных детектора BSC (beam scintillator counter), работающие в режиме совпадения с детекторами времени пролёта банчей пучка BPTX (beam pick-up timing detector). Нами обрабатывались данные, аккумулированные в двух “золотых” сеансах №123596 и №124020, которые имели относительно небольшое количество “плохих” подсеансов (т.н. люмисекций) и достаточное для статистической обеспеченности результата число протон-протонных столкновений.

MB-события были также сгенерированы с помощью генератора протон-протонных столкновений PYTHIA 6.4 [4] при энергии в системе центра масс сталкивающихся протонов 900 ГэВ. Генератор PYTHIA представляет собой компьютерную реализацию таких столкновений в рамках кварк-партонной модели адронов с использованием модели струнной фрагментации и с учётом партонных ливней. Для обработки данных и моделирования отклика детектора CMS методом Монте-Карло применялся уже упомянутый программный комплекс CMSSW, обеспечивающий также реконструкцию событий. Важно отметить, что в моделировании использовались параметры детектора CMS, которые отвечали условиям его работы во время первых протонных столкновений на LHC.

АНАЛИЗ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ КОЛЛЕКЦИИ PF

Коллекцию PF можно использовать для реконструкции промежуточных объектов, например, относительно долгоживущих частиц. В качестве объекта реконструкции выберем K_s^0 -мезон. Основным каналом его распада является канал $K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ [5]. Так как основная доля пионов рождается непосредственно в точке столкновения протонов, а пробег K_s^0 -мезона составляет, по меньшей мере, несколько сантиметров, то для подавления фона будем отбирать события, в которых расстояние от вершины пионных треков до номинальной линии протонных пучков (оси Oz) превышает 0,4 см. Для накопленных детектором данных и данных, полученных методом Монте-Карло, мы построили распределения по поперечному импульсу и псевдобыстроте заряженных пионов в

таких событиях (рис. 1,2). Распределения для событий, сгенерированных методом Монте-Карло, нормированы на количество заряженных пионов в зарегистрированных детектором CMS событиях. Результаты компьютерного моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными и с результатами, полученными коллаборацией CMS и опубликованными в работе [6].

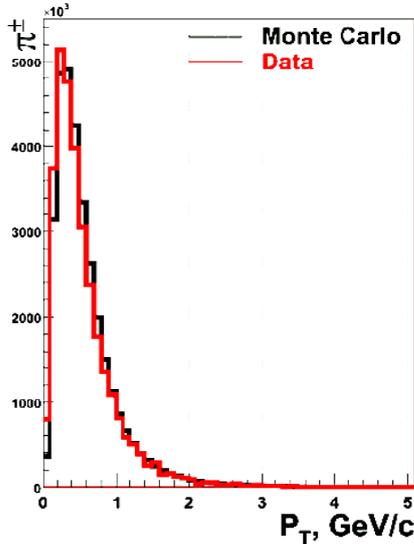


Рис. 1. Распределения по поперечному импульсу заряженных пионов из коллекции PF. Data – данные эксперимента CMS, Monte Carlo – данные компьютерного моделирования

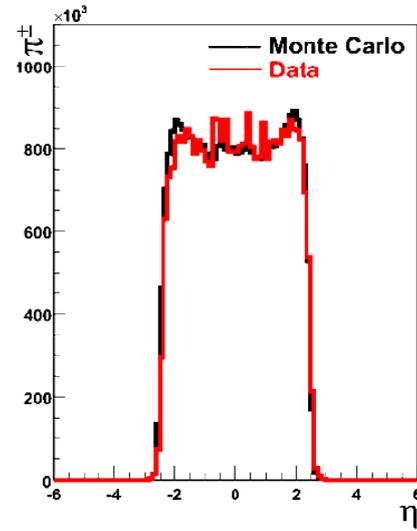


Рис. 2. Распределения по псевдобыстроте заряженных пионов из коллекции PF. Data – данные эксперимента CMS, Monte Carlo – данные компьютерного моделирования

Затем мы сформировали собственную коллекцию K_s^0 -мезонных кандидатов из пар противоположно заряженных и находящихся в коллекции PF пионов, расстояние между вершинами треков которых не более 1 см. Рис. 3 показывает, что даже такие простые критерии отбора позволяют выделить в распределении инвариантной массы пионной пары пик при $M(\pi^+\pi^-) \approx 500$ МэВ/ c^2 и тем самым идентифицировать события с рождением K_s^0 -мезонов.

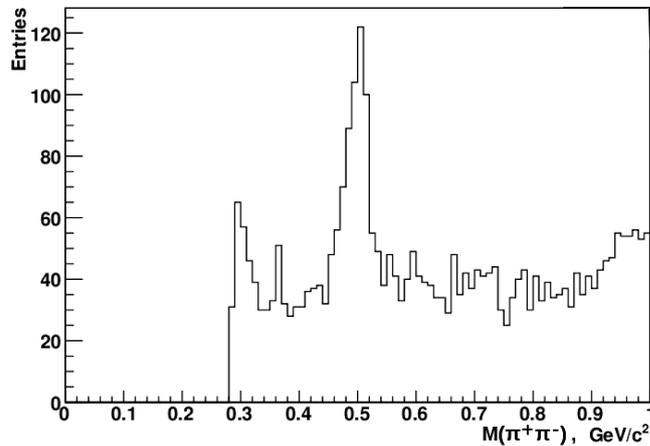


Рис. 3. Распределение по инвариантной массе пары противоположно заряженных пионов из коллекции PF. На этом и последующих рисунках Entries обозначает количество K_s^0 -мезонных кандидатов в одном бине гистограммы.

Уменьшение расстояния между вершинами двух противоположно заряженных пионных треков вместо ожидаемого улучшения разрешения пика и дальнейшей дискриминации фона приводит к обратному результату. Такое поведение может быть обусловлено двумя причинами. Во-первых, восстановленные методами CMSSW вершины пионных треков в коллекции PF (как и других физических объектов) отвечают “перигейным” (ближайшим) к оси Oz точкам пионных треков. Во-вторых, очистка треков может оказаться неполной, либо вообще отсутствовать. Для качественной реконструкции K_s^0 -мезона необходимо использовать непосредственно коллекцию восстановленных пионных треков (см. ниже).

ОБРАБОТКА ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ТРЕКОВОЙ КОЛЛЕКЦИИ И ТРЕКОВАЯ ОЧИСТКА

Коллекция треков содержит все треки, которые восстановлены с помощью метода комбинаторного поиска треков (CTF) из набора “попаданий” (“hits”) во внутреннем трековом детекторе [7]. Качество трека

характеризуется следующими основными величинами: количеством “попаданий”, достоверностью фитирования реконструированного трека χ^2/ndf , поперечным и продольным прицельными параметрами и их значимостями (значимость определяется как отношение измеренной величины к ошибке её измерения). Если восстановленные треки удовлетворяют достаточно жёстким ограничениям на указанные величины, то они маркируются как треки “высокой чистоты” (“HighPurity” треки) [8]. Методику отбора треков “высокой чистоты” часто называют трековой очисткой, и в нашем случае она является необходимым условием корректного анализа (см. ниже). Именно такие треки формируются нами на первом этапе анализа, что позволяет исключить из рассмотрения ложные треки. Далее строим коллекцию пар противоположно заряженных треков (дитреков), удовлетворяющих ещё более жёстким критериям: $\chi^2/ndf < 5$, как минимум 6 “попаданий” в трековом детекторе, значимость поперечного прицельного параметра по отношению к действительной точке взаимодействия протонов не менее 2. Эти ограничения обеспечивают отбор треков с меньшей ошибкой вычисления величины импульса трека. Методы экстраполяции в CMSSW позволяют восстановить параметры трека по всей его длине и получить т. н. “транзитный” трек. Именно транзитные дитреки передаются на вход фильтра Кальмана [9]. Он обеспечивает реконструкцию вершины, общей для выбранной группы треков. При этом мы отбираем события, в которых достоверность фитирования реконструированной кальмановской вершины $\chi^2/ndf < 7$. Остаточный трековый фон подавляется условием: реконструированная вершина должна находиться не ближе 15σ к реальной линии пучков (σ – неопределённость в вычислении расстояния), что соответствует приблизительно 0,35 см. Заметим, что реальная линия взаимодействия протонных пучков может не совпадать с номинальной. На первых этапах работы LHC соответствующее смещение было существенным и изменялось во времени, поэтому желательно определять расстояние между кальмановской вершиной и реальной линией пучков. Наконец, инвариантную массу отобранных дитреков вычисляем из предположения, что треки соответствуют заряженным пионам.

Распределение событий с рождением K_s^0 -мезонов по инвариантной массе дитреков, отобранных с помощью вышеупомянутой процедуры, показано на рис. 4, где наблюдается удовлетворительное согласие с результатом компьютерного моделирования.

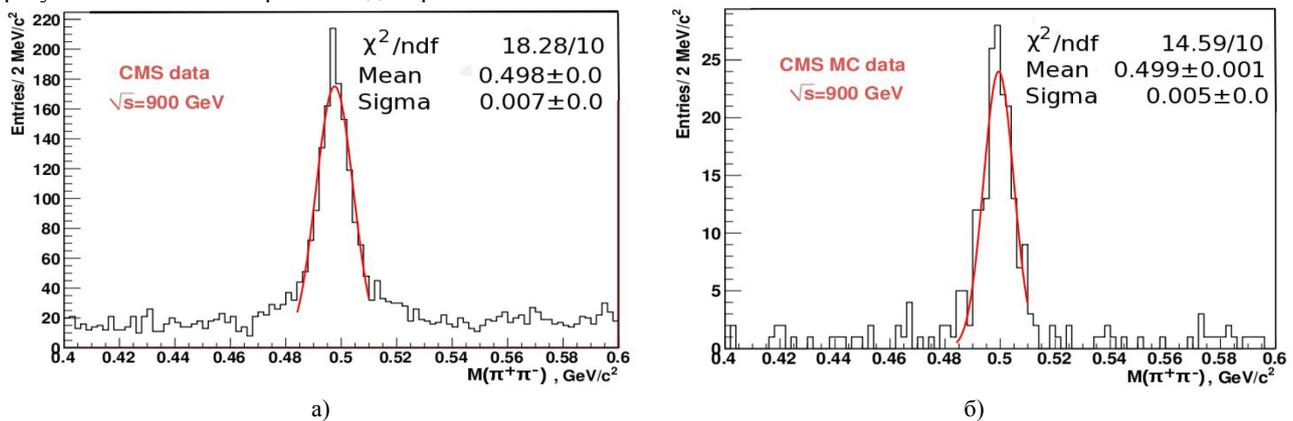


Рис. 4. Полученные с помощью трековой очистки распределения событий с рождением K_s^0 -мезонных кандидатов по инвариантной массе противоположно заряженных пионов из трековой коллекции и их подгонка в пике гауссианом. а) - результат обработки данных эксперимента CMS, б) - результат компьютерного моделирования. Обозначения: χ^2/ndf – достоверность фитирования, Mean – главное значение гауссиана, Sigma – его стандартное отклонение.

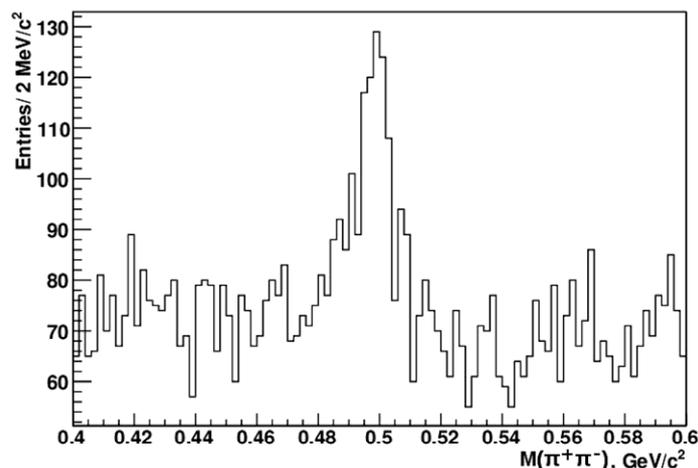


Рис. 5. То же, что и на рис. 4а, но с меньшей статистикой и без процедуры трековой очистки.

Подгонка распределения событий гауссианом даёт значение массы K_s^0 -мезона, совпадающее в пределах ошибки с табличным значением (рис. 4). Ширина пика определяется прежде всего разрешением внутреннего трекового детектора. Отношение (сигнал+фон)/фон в пике увеличилось по сравнению с полученным при обработке коллекции PF: с 3 до 10. Однако оно оказалось приблизительно в 2 раза меньше значения, приведенного в работах [8,10], опубликованных коллаборацией CMS. Лучшее подавление фона могло быть достигнуто за счёт дополнительной трековой очистки [6].

В статье мы не обсуждаем степень влияния на качество восстановления массы K_s^0 -мезона каждого этапа реконструкции. Сравнение рис. 4,5 демонстрирует необходимость трековой очистки, без которой последующие этапы восстановления, и не только в случае идентификации K_s^0 -мезонов, могут оказаться не эффективными.

ВЫВОДЫ

Апробирована методика реконструкции событий с рождением K_s^0 -мезонов в первых данных эксперимента CMS (в первых протон-протонных столкновениях на LHC при $\sqrt{s}=900$ ГэВ). На основе коллекции треков восстановлена масса K_s^0 -мезона с удовлетворительной точностью. Ширина пика в распределении событий по инвариантной массе пионного дитрека определяется, прежде всего, разрешением внутреннего трекового детектора. Важным элементом методики является трековая очистка. Рассмотренную процедуру с некоторыми изменениями можно использовать для реконструкции других относительно долгоживущих частиц, например Λ^0 , Σ -гиперонов, а также для поиска гипотетических объектов “новой физики”.

Результаты моделирования pp-столкновений в детекторе CMS, выполненного методом Монте-Карло, удовлетворительно согласуются с данными эксперимента. Это указывает на достаточную точность описания в соответствующих пакетах CMSSW как геометрии детектора, так и процессов взаимодействия частиц с его материалом, что приводит к адекватному восстановлению физических объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CMS Collaboration. CMS Physics: Technical Design Report, Volume I: Detector Performance and Software. CERN, 2 February 2006.
2. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/WorkBookCMSSWFramework>, <http://cms-sw.github.io/index.html>.
3. <http://wlcg.web.cern.ch>.
4. Sjöstrand T., Mrenna S., Skands P. PYTHIA 6.4 Physics and Manual // JHEP 05 (2006) 026.
5. Amsler C. et al. (Particle Data Group). Review of Particle Physics // Physics Letters B. – 2008. – Vol. 667. – P.725.
6. Tracking and b Tagging POGs. Tracking and Vertexing Results from First Collisions // CMS AN-2010/055 - 2010.
7. Adam W., Mangano B., Speer T., Todorov T. Track Reconstruction in the CMS tracker // CMS Note-2006/41 - 2006.
8. CMS Collaboration. Tracking and Vertexing Results from First Collisions // CMS PAS TRK-10-001 - 2010.
9. http://www.cs.unc.edu/~tracker/media/pdf/SIGGRAPH2001_CoursePack_08.pdf.
10. Mulders M. for the CMS Collaboration. The CMS experiment: status and first results // e-Print: arXiv:1006.4010 [hep-ex]