

Известия НАН Армении, Физика, т.59, №4, с.431–438 (2024)

УДК 539.129

DOI:10.54503/0002-3035-2024-59.4-431

РЕКОНСТРУКЦИЯ ДОЛГОЖИВУЩИХ ЧАСТИЦ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS (LHC)

А.А. АЙРАПЕТЬЯН*

Национальная научная лаборатория им. А.И. Алиханяна, Ереван, Армения

*e-mail: aram.hayrapetyan@cern.ch

(Поступила в редакцию 25 сентября 2024 г.)

Разработан алгоритм для реконструкции долгоживущих частиц (Long-Lived Particles, LLP), распадающихся в центральной и торцевой частях мюонной системы установки CMS на Большом адронном коллайдере. Расчеты проводились на данных Монте-Карло, смоделированных с помощью программного пакета CMSSW, адаптированного к условиям эксперимента, проводимого на детекторе CMS в 2018 году. Рассматривался процесс, где гипотетические LLP-частицы рождаются от распадов В мезонов в протон-протон (p - p)-столкновениях при энергии в системе центра масс 13 ТэВ. Распад LLP-частиц в мюонной системе детектора CMS характеризуется наличием широких ливней с большой множественностью сигналов от каналов мюонных камер, которая в значительной степени отличается от сигналов известных частиц, и является хорошим критерием для идентификации LLP-частиц.

1. Введение

Начиная с 2010 г. на Большом адронном коллайдере (LHC) [1] в p - p и ядро-ядро столкновениях при высоких энергиях исследуются фундаментальные свойства материи. До сих пор все наблюдения подтверждают утверждения Стандартной Модели (SM) [2], которая является современной единой теорией элементарных частиц и их взаимодействий. Однако есть веские доказательства, основанные на космологических наблюдениях, что текущее понимание структуры Вселенной не является полным, и SM может быть расширена, в частности, в рамках существующих моделей и гипотез, оперирующих за пределами стандартной модели (BSM), многие из которых предсказывают наличие неизвестных частиц, которые могут наблюдаться в LHC. LLP-частицы предсказываются рядом суперсимметричных моделей (SUSY), таких как: минимально расщепленная SUSY [2, 3], калибровочным способом нарушения SUSY (GMSB) [3], SUSY с нарушением R -четности (RPV) [4], скрытая SUSY [5] и т. д.

В настоящей статье рассматривается так называемая Минимальная Суперсимметричная Стандартная Модель (MSSM), которая представляет из себя минимальное суперсимметричное расширение SM, где SM расширяется за счёт добавления одной новой частицы. Эта частица может быть скаляром, псевдоскаляром, фермионом или вектором [6]. В рассматриваемом случае SM расширяется добавлением LLP-частицы. В рассматриваемом сигнальном процессе в результате p - p соударения рождается пара В-мезонов, один из которых распадается по

мюонному каналу, на основе которого строятся критерии отбора событий, а второй B -мезон распадается на LLP-частицу и каон (рис.1).

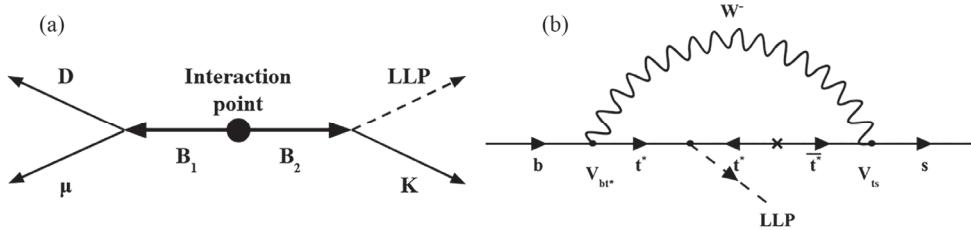


Рис.1. (а) Иллюстрация рождения пары B мезонов и (б) диаграмма Фейнмана с рождением LLP частицы.

2. CMS детектор на LHC

CMS (Compact Muon Solenoid [1]) — многоцелевой детектор на LHC, который предназначен для выполнения точных измерений характеристик частиц в широком диапазоне энергий (до нескольких ТэВ). Детектор CMS базируется на массивном сверхпроводящем соленоидном магните, обеспечивающим магнитное поле 3.8 Тл, и состоит из следующих общих подсистем: внутренний трекер, электромагнитный и адронный калориметры, система мюонных детекторов, а также фронтальные детекторы CASTOR (Centauro And STrange Object Research) и ZDC (Zero Degree Calorimeter). Координатная система CMS связана с его геометрическим центром. Ось X направлена к центру LHC по радиусу, ось Y направлена вертикально вверх, а ось Z имеет направление движения пучков в точке их столкновения. Азимутальный угол ϕ вычисляется в плоскости XY относительно оси X , а полярный угол θ — относительно оси Z . Вместо полярного угла используется псевдобыстрота $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$.

Внутренний трекер состоит из пиксельных и стripовых детекторов на основе кремния и используется для измерения импульса заряженных частиц и восстановления вершин взаимодействия с высокой точностью в области псевдобыстрот $|\eta| < 2.40$. Трекер расположен в центральной части детектора CMS, ближе всего к точке взаимодействия. Электромагнитный калориметр (ECAL) состоит из 75848 кристаллов вольфрамата свинца, которые обеспечивают покрытие в области псевдобыстрот $|\eta| < 1.48$ в области центральной (EB) и $1.48 < |\eta| < 3.00$ в двух торцевых областях (EE). ECAL предназначен для идентификации электронов и фотонов, а также, для измерения их энергий и координат, что также способствует реконструкции адронных струй и недостающего попечерного импульса. Перед каждой торцевой частью ECAL расположены составляющие системы pre-shower, — две плоскости кремниевых датчиков, чередующиеся со свинцовыми слоями, покрывающими, в общей сложности, 3 радиационные длины. Адронный калориметр (HCAL), изготовленный на основе латуни и сцинтиллятора, предназначен для измерения энергии заряженных и нейтральных адронов и состоит из центральной и двух торцевых частей и покрывает область псевдобыстрот $|\eta| < 3.00$.

Мюонная система, состоящая из катодно-стриповых камер (CSC), дрейфовых трубок (DT) и резистивных плоских камеры (RPC), обеспечивает покрытие области псевдобыстрот $|\eta| < 3.00$ и используется для идентификации мюонов и

измерения их импульсов.

Реконструкция частиц и объектов выполняется при помощи глобального алгоритма реконструкции Particle Flow (PF) [7], используя данные из всех подсистем детектора CMS одновременно. PF проецирует кластеры из калориметров на трекерную систему для сопоставления сигнала от частицы и его трека. Заряженные адроны идентифицируются сопоставлением их траекторий с одним или несколькими кластерами в калориметрах, в то время как фотоны и нейтральные адроны идентифицируются, основываясь только на таких калориметрических кластерах, которые не ассоциируются с треками в трекерной системе. Электроны идентифицируются с учетом отклика ECAL и треков, которые не оставили сигнал в HCAL, а мюоны идентифицируются сопоставлением треков и сигналов в мюонных камерах и калориметрах.

3. Алгоритм восстановления LLP-частиц

В установке CMS поиск LLP-частиц может осуществляться либо их непосредственной регистрацией, либо регистрацией их распадов, происходящих на некотором расстоянии от точки образования. В первом случае используется след LLP-частицы от прямого взаимодействия со слоями детектора, а во втором случае выполняется реконструкция LLP-частицы из продуктов распада. Если LLP-частицы заряжены, их можно непосредственно обнаружить по следу, который они оставляют в трекерной системе. В случае нейтральных LLP-частиц за счет длинного времени жизни вершина распада частицы будет смещена от первичной точки взаимодействия протонов, а распад может происходить в разных подсистемах детектора CMS (рис.2).

В этой статье рассматривается случай с распадом нейтральных LLP-частиц в мюонных камерах детектора CMS. Эти частицы в рассматриваемом процессе распадаются на пару пионов, которые впоследствии инициируют лавины в мюонной системе и производят сигнал. Большинство частиц, которые регистрируются в мюонной системе, являются мюонами и поэтому необходимо эффективное различение сигнала LLP-частицы от сигнала мюона. Разработка такого алгоритма была выполнена на основе Монте-Карло моделированных данных с помощью программного пакета CMSSW (CMS SoftWare) [8]. Сигналы каналов мюонной системы кластеризуются с помощью алгоритма DBSCAN [9]

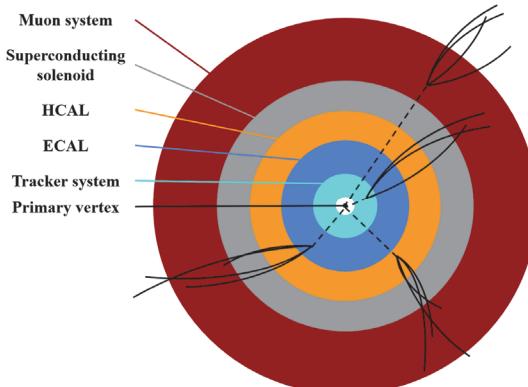


Рис.2. Иллюстрация смещенных вершин взаимодействия.

(основанная на плотности пространственная кластеризация для приложений с шумами). Алгоритм имеет два входных аргумента: радиусный параметр и минимальное количество сигналов в каждом кластере. С помощью радиусного параметра выбирается окрестность произвольной точки (сигнала) и, если окрестность содержит достаточно сигналов (не менее минимального количества сигналов), образуется кластер, в противном случае точка помечается как шум. Способность кластеризовать сигналы произвольной формы является преимуществом данного алгоритма. Исследования показывают, что оптимальные значения радиусного параметра (ΔR) и минимального размера кластера составляют 0.2 и 50.

Для идентификации кластеров, инициированных распадом LLP, к ним был применен ряд критериев отбора. Кластеры из первого слоя центральной и торцевых частей мюонной системы не рассматривались, поскольку они могли возникнуть из-за адронных струй, которые проходя калориметры проникают в мюонную систему и вносят вклад в фон. Кластеры из области псевдобыстрот $|\eta| > 1.9$ тоже не рассматривались, поскольку мюоны плохо реконструируются в этой области.

4. Отбор событий

Для эффективного отбора событий сигнального процесса и подавления фоновых процессов SM, были разработаны критерии отбора. Базой для реконструкции LLP-частиц, а также для критериев отбора событий по LLP-частицам послужили алгоритмы реконструкции и условия, представленные в работах [10, 11], где пара LLP-частиц образуется в результате распада бозона Хиггса. В рассматриваемом же процессе всего одна LLP-частица рождается от распада B-мезона. К тому же по сравнению с вышеуказанными работами кинематика и моды распада LLP-частиц в данной работе отличаются. Эти критерии базируются на основных особенностях сигнального процесса – наличие мюона от распада одного B-мезона, и наличие LLP-частицы от распада другого B-мезона, где LLP-частица ассоциируется с характерным кластером в мюонной системе. На события накладывается требование выполнения следующих условий: наличие мюона с поперечной энергией больше 7 ГэВ в области псевдобыстрот $|\eta| < 1.5$, который также активирует выбранный триггер высокого уровня (HLT); а также этот мюон должен удовлетворять требованию о совпадении с треком высокого качества в трекерной системе (мюонный трек): трек, совпадающий хотя-бы с одним сегментом в мюонной системе ($< 3\sigma$) в координатах X и Y ; требуется, чтобы мюонный трек был реконструирован сигналами не менее 5 трекерных слоев; также требуется, чтобы мюонный трек совпадал с основной вершиной взаимодействия в пределах $dxy < 0.3$ см в поперечном и $dz < 20$ см в продольном направлениях; наличие кластера с более чем 50 сигналами, который хорошо удалён от выбранного мюона в η - φ пространстве ($\Delta r = (\Delta\eta^2 + \Delta\varphi^2)^{1/2} > 0.8$). Оптимизация критериев отбора событий была выполнена на основе Монте-Карло данных, смоделированных с помощью программного пакета CMSSW, с учетом официальных рекомендаций CMS и с учетом использованных онлайн триггеров. Основным источником ошибочной идентификации LLP-частиц (фон) являются мюоны, которые в результате тормозного излучения могут сформировать широкие ливни. Другим источником могут быть ливни, порожденные распадом B-мезонов, которые

ввиду относительно долгой длительности жизни, проходят калориметры и создают сигналы в передовых станциях мюонной системы ввиду отсутствия стального поглощающего слоя. Вклад в фон тормозным излучением мюонов возможно подавить с помощью критерииов отбора объектов и событий, которые представлены в настоящей работе. Вклад же от распадов B -мезонов оценивается в контрольной категории, которая ортогональна сигнальной категории, представленной в этой работе, и не является предметом обсуждения здесь.

5. Результаты реконструкции моделированных данных

Сигнальный процесс был смоделирован с помощью программного пакета CMSSW при условиях эксперимента CMS 2018 г. Как упоминалось ранее, в сигнальном процессе LLP-частицы распадаются на пару заряженных или нейтральных пионов. При генерации в качестве модельных параметров варьировались время жизни (как следствие и длина пролета) и масса LLP-частиц. Частицы, рожденные в результате распада LLP, создадут ливни в стальных слоях мюонной системы. На рис.3 представлены эффективности реконструкции LLP-частиц в центральной части, а на рис.4 в торцевой части мюонной системы установки CMS. Стальные слои мюонной системы обозначены серым цветом.

Кластеры реконструированных LLP-частиц для случаев распада на заряженные и нейтральные пионы были сравнены с мюонными кластерами (рис.5). Результаты исследований показали, что, как и ожидалось, множественность сигналов в кластерах, инициированных LLP-частицами больше по сравнению с мюонными кластерами.

Детальный анализ показал, что можно улучшить дискриминацию кластеров

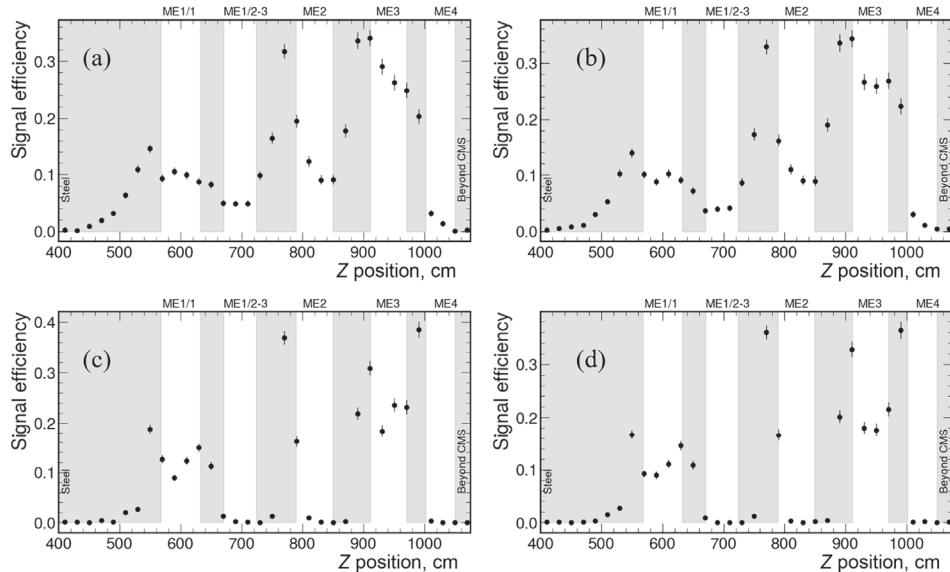


Рис.3. Зависимость эффективности регистрации LLP-частиц от положения вершин распада вдоль оси z в торцевой области мюонной системы: в случае распада LLP-частиц на заряженные (а, б) и нейтральные (с, д) пионы для следующих модельных параметров – масса LLP-частиц 1 ГэВ, длительность полета 1000 мм (а, с) и масса LLP-частиц 0.3 ГэВ, длительность полета 300 мм (б, д).

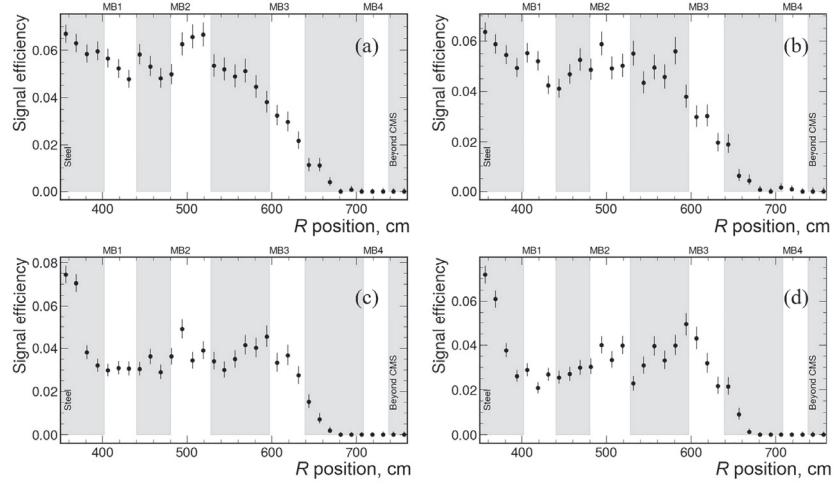


Рис.4. Зависимость эффективности регистрации LLP-частиц от положения вершин распада вдоль оси u в центральной области мюонной системы: в случае распада LLP-частиц на заряженные (а, б) и нейтральные (с, д) пионы для следующих модельных параметров – масса LLP-частиц 1 ГэВ, длительность полета 1000 мм (а, с) и масса LLP-частиц 0.3 ГэВ, длительность полета 300 мм (б, д).

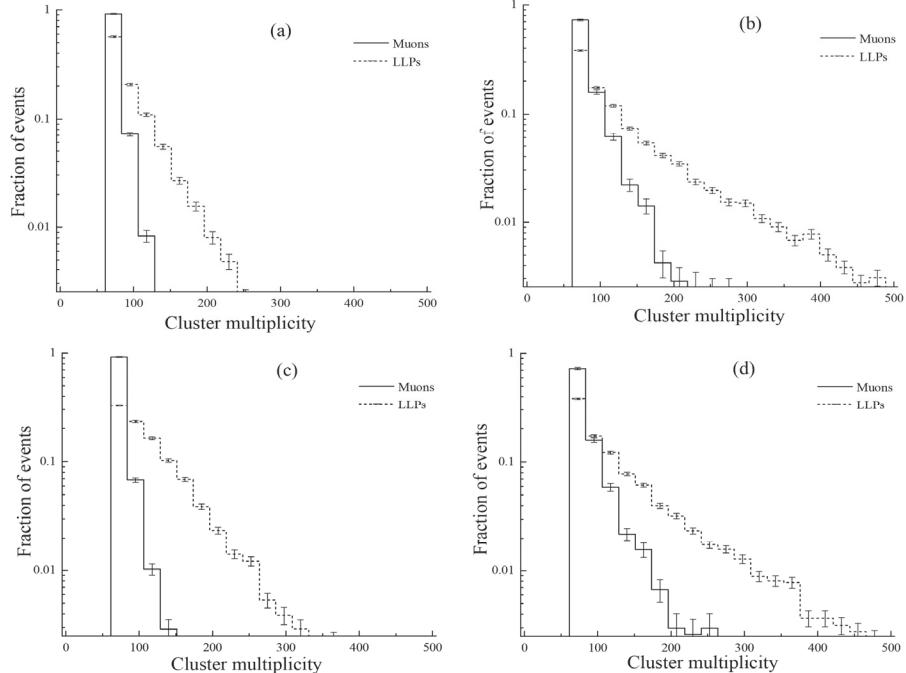


Рис.5. Число сигналов в кластерах, реконструированных в центральной (а, с) и торцевой (б, д) областях в случае распада LLP-частиц с массой 1 ГэВ и с длительностью полета 1000 мм, на нейтральные (а, б) и заряженные пионы (с, д).

LLP-частиц от мюонных, применив дополнительные условия: накладывается вето на кластеры, образованные от космической радиации требованием наличия не больше 8 сигналов в первых слоях центральной и торцевых частях мюонной системы. Также требуется, чтобы кластеры по времени образования совпадали с

основным протон-протонным взаимодействием (во временном отрезке ± 25 нс от протон-протонного столкновения). В случае, если кластер был образован в торцевом регионе накладывается дополнительное ограничение, которое основывается на количестве мюонных станций (N_{stations}), по которым сигналы распространены, усредненное положение кластера по станциям и усредненное значение псевдобыстрот. Рассматриваются только те кластеры, для которых выполняется одно из следующих условий: если $N_{\text{stations}} > 1$, $|\eta| < 1.8$; если $N_{\text{stations}} = 1$ и кластер из станции номер 4: $|\eta| < 1.8$; если $N_{\text{stations}} = 1$ и кластер из станции номер 3: $|\eta| < 1.6$; если $N_{\text{stations}} = 1$ и кластер из станции номер 2: $|\eta| < 1.7$; если $N_{\text{stations}} = 1$ и кластер из станции номер 1: $|\eta| < 1.1$.

На рис.6 представлен эффект применения дополнительных ограничений на кластеры в случае распада LLP-частиц на нейтральные пионы.

С помощью дополнительных критериев отбора кластеров возможно улучшить дискриминацию между сигналами от LLP-частиц и мюонов. В торцевой части подавление фона в виде мюонных кластеров осуществляется лучше, чем в центральной области.

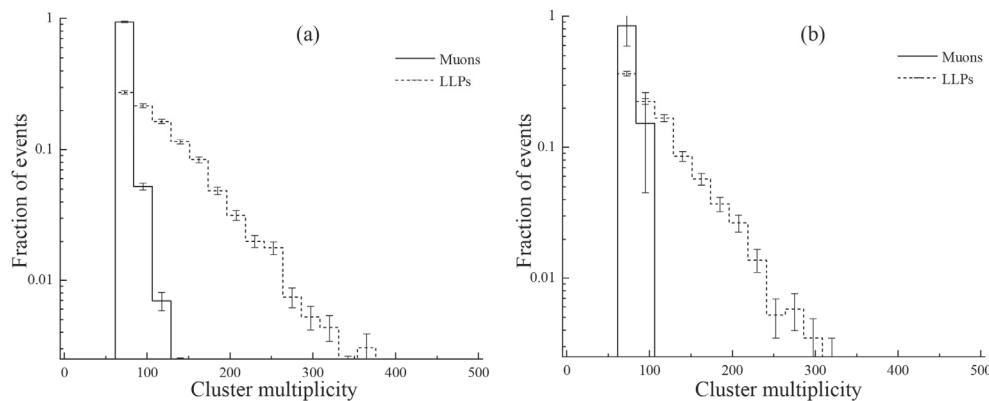


Рис.6. Число сигналов в кластерах, реконструированные в центральной (а) и торцевой (б) областях в случае распада LLP-частиц с массой 1 ГэВ и с длительностью полета 1000 мм, на нейтральные пионы после применения дополнительных критериев отбора.

6. Заключение

Разработан алгоритм реконструкции нейтральных LLP-частиц, распадающихся на два пиона в мюонной системе детектора CMS. Рассматривался процесс образования В-мезонов в p - p -взаимодействиях, где один из В-мезонов распадается по мюонному каналу, а другой – на каон и LLP-частицу. Исследования проводились на основе моделированных данных с помощью пакета CMSSW при условиях установки CMS 2018 г. Алгоритм реконструкции использует ливни, инициированные распадом LLP-частиц для построения кластеров.

Проведено сравнение свойств кластеров, производимых мюонами и LLP-частицами. Исследования показали, что ливни, инициируемые распадом LLP-частиц, содержат больше сигналов и можно достичь хорошей дискриминации,

используя множественность сигналов реконструированных кластеров, а применение дополнительных требований на подавление космического фона и фона остаточных взаимодействий делает дискриминацию значительно лучше. Также установлено, что в торцевых частях кластеры могут быть идентифицированы лучше, чем в центральной части мюонной системы CMS.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по Науке МОНКС РА в рамках научного проекта 24PTS-1C009.

ЛИТЕРАТУРА

1. **CMS Collaboration.** JINST, **3**, S08004, (2008).
2. **A. Arvanitaki, N. Craig, S. Dimopoulos, G. Villadoro.** JHEP, **2013**, 126 (2013).
3. **H. Kawase, N. Maekawa, K. Sakurai.** J. High Energ. Phys., **2010**, an. **27** (2010).
4. **G.F. Giudice, R. Rattazzi.** Physics Reports, **322**, 419 (1999).
5. **C. Csaki, E. Kuflik, T. Volansky.** Phys. Rev. Lett., **112**, 131801 (2014).
6. **G. Aielli, E. Ben-Haim, R. Cardarelli, et al.** Eur. Phys. J. C, **80**, 1177 (2020).
7. Milos Dordevic on behalf of the CMS Collaboration, 11001 Belgrade, Serbia, 2018, 7 p.
8. **A. Bocci, M. Kortelainen, V. Innocente, F. Pantaleo, M. Rovere.** Frontiers in Big Data, 31-08-2020, 2008.13461, 12 p.
9. **B. Maa, C. Yang, A. Li, Y. Chi, L. Chen.** Procedia Computer Science, **221**, 113 (2023).
10. **CMS Collaboration.** Phys. Rev. Lett., **127**, 261804 (2021).
11. **CMS Collaboration.** Phys. Rev. D, **110**, 032007 (2024).

THE RECONSTRUCTION OF LONG-LIVED PARTICLES IN THE CMS(LHC) EXPERIMENT

A.A. HAYRAPETYAN

In this article the production of neutral Long-Lived Particles (LLP) has been investigated. In the investigated signal process the LLPs are produced in the decay of B mesons. The long-lived particles decay in the CMS muon system creating showers of hits in the barrel and endcap regions. The simulation of the signal process has been done using the CMS SoftWare (CMSSW) package based on the conditions of the CMS detector in 2018. An event selection strategy has been developed which will select the events with at least one high multiplicity cluster made by the LLP decay products. The clusters made by the LLPs were compared to the clusters made by muons.