

## НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА БАК

*А. Г. Мягков*<sup>1</sup>

Институт физики высоких энергий им. А. А. Логанова  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Протвино, Россия

В обзоре представлены новые результаты экспериментов ATLAS, CMS, ALICE и LHCb, полученные на Большом адронном коллайдере.

Recent results from ATLAS, CMS, ALICE and LHCb experiments are presented in this review.

PACS: 44.25.+f; 44.90.+c

### ВВЕДЕНИЕ

В данном обзоре представлены некоторые новые результаты, полученные в экспериментах на Большом адронном коллайдере (БАК). Рассматриваются работы по новым измерениям в рамках Стандартной модели (СМ), физика бозона Хиггса, поиск проявлений новой физики за рамками СМ. Результаты коллабораций ATLAS и CMS были получены на основе анализа данных, собранных в течение сеанса 2 при энергии  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ и набранной светимости порядка  $140 \text{ фб}^{-1}$ . Также в обзоре представлены некоторые результаты коллабораций LHCb и ALICE. В небольшом обзоре невозможно написать обо всех интересных результатах. Еще больше новых и интересных результатов будет получено в сеансе 3, который начался.

### ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕХ $W$ -БОЗОНОВ [1]

Измерения образования трех векторных бозонов являются прямой проверкой самодействия калибровочных бозонов Стандартной модели, чтобы отклонения указывали на эффекты новой физики. Процессы с образованием трех векторных бозонов относятся к числу наименее изученных процессов СМ ввиду небольшого сечения этих реакций.

Коллаборация ATLAS изучала процесс образования трех  $W$ -бозонов. Поиск проводился по выборке событий, содержащих два лептона одного знака либо три лептона. Процесс выделялся с помощью метода Boosted Decision Tree (BDT). Пример выхода BDT для канала  $e^{\pm}\mu^{\pm}$  показан на рис. 1. Такой процесс наблюдается впервые со значимостью  $8,0\sigma$  ( $5,4\sigma$  ожидаемой), измеренное сечение составило  $\sigma(WWW) = (820 \pm 100(\text{стат.}) \pm 80(\text{сист.})) \text{ фб}$ . Результат совместим с предсказанием СМ на уровне  $2,6\sigma$ .

---

<sup>1</sup>E-mail: miagkov@ihep.ru

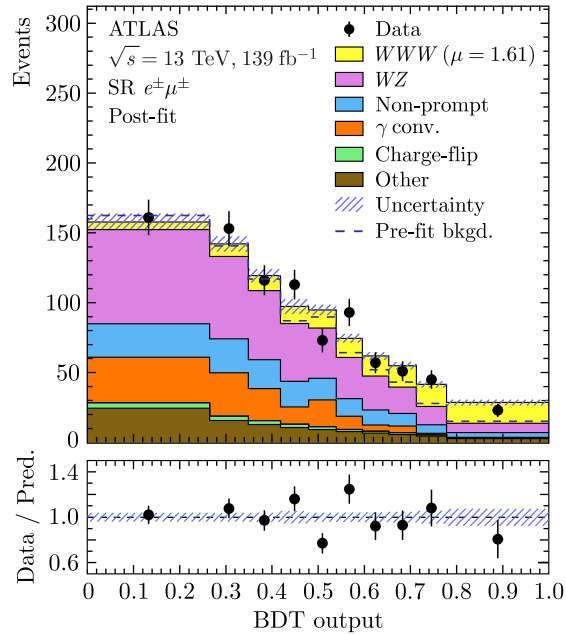


Рис. 1. Выходное распределение BDT после подгонки в каналах  $e^\pm\mu^\pm$

### ЭЛЕКТРОСЛАБОЕ РОЖДЕНИЕ $W\gamma$ [2]

Процессы рассеяния векторных бозонов (VBS) играют независимую и дополняющую роль в понимании нарушения электрослабой симметрии. Неабелев характер калибровочных взаимодействий в Стандартной модели приводит к большому разнообразию процессов с уникальными возможностями исследовать новую физику за пределами СМ.

Коллаборация CMS представила результаты измерения электрослабого рождения  $W$ -бозона, фотона ( $\gamma$ ) и двух струй ( $j$ ) в протон-протонных столкновениях. Лептонные распады  $W$ -бозона отбираются требованием наличия одного идентифицированного электрона или мюона и большого недостающего поперечного импульса. Две струи должны иметь большую инвариантную массу двух струй и большое расстояние между ними по псевдобыстроте. Сечение определялось из фита 2-мерного распределения по инвариантной массе двух струй и инвариантной массе лептона и  $\gamma$ -кванта. Сечение электрослабого рождения  $W\gamma jj$  в доверительной области составляет  $(19,2 \pm 4,0)$  фб, а инклюзивное сечение для рождения  $W\gamma jj$  в той же доверительной области составляет  $(90 \pm 11)$  фб. Эти сечения соответствуют ожидаемым.

### ПОЛЯРИЗАЦИЯ ВЕКТОРНЫХ БОЗОНОВ В ПРОЦЕССЕ ПАРНОГО РОЖДЕНИЯ [3]

Коллаборация ATLAS представила результаты измерения поляризаций векторных бозонов в реакции образования пары  $WZ$ -бозонов. События-кандидаты с образованием  $W$  и  $Z$  восстанавливаются с использованием лептонных мод распада калибровочных бозонов с образованием электронов и мюонов. Были измерены доли совместных

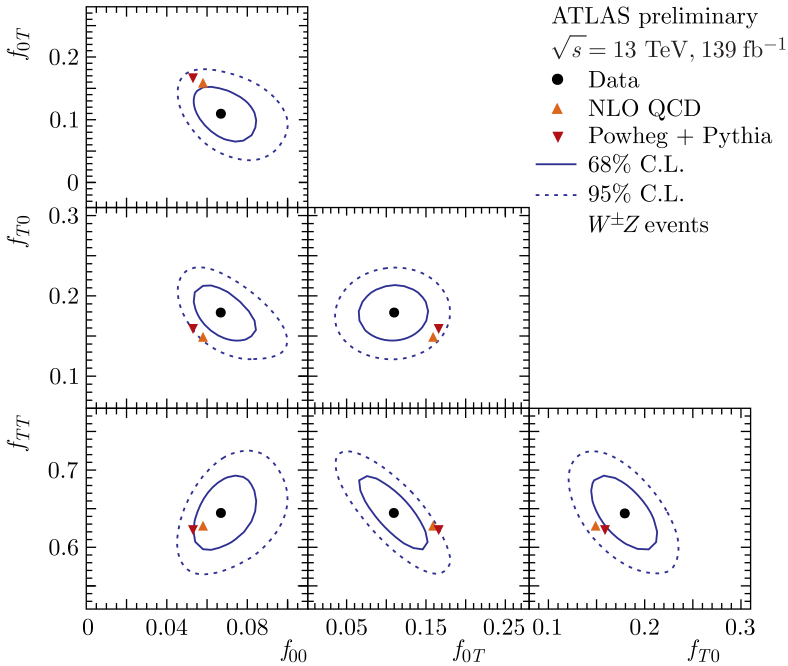


Рис. 2. Измеренные доли совместной спиральности  $f_{00}$ ,  $f_{0T}$ ,  $f_{T0}$  и  $f_{TT}$  для  $W$ - и  $Z$ -бозонов в событиях  $W^\pm Z$  по сравнению с предсказаниями расчетов NLO

спиральностей (рис. 2). Одновременное рождение пар продольно поляризованных векторных бозонов впервые измерено со значимостью 7,1 стандартных отклонения. Измеренные доли совместной спиральности, проинтегрированные по доверительной области:  $f_{00} = 0,067 \pm 0,010$ . В расчетах NLO QCD предсказывается значение  $0,058 \pm 0,002$ , что согласуется с полученным результатом.

### ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ ТОП-КВАРКА [4]

Топ-кварк является самой массивной элементарной частицей, обнаруженной на сегодняшний день. Из-за его большой массы  $m_t$  и большой константы связи с бозоном Хиггса он играет особую роль в электрослабом секторе Стандартной модели физики элементарных частиц. Точные измерения  $m_t$  позволяют сделать критические проверки справедливости СМ и накладывают ограничения на устойчивость электрослабого вакуума.

Коллаборация CMS выполнила анализ в канале распада  $t\bar{t}$  с одним лептоном в конечном состоянии. С использованием подгонок в пяти измерениях профильной функции вероятности получено значение  $m_t = (171,77 \pm 0,38)$  ГэВ.

Другой подход заключается в определении  $m_t$  по измерениям сечения рождения пары топ-кварков для извлечения значения массы полюса топ-кварка путем сравнения с расчетами фиксированного порядка в пертурбативной квантовой хромодинамике (пКХД). Недавно коллаборация CMS провела анализ массового распределения струй большого радиуса в адронных распадах топ-кварков с большими поперечны-

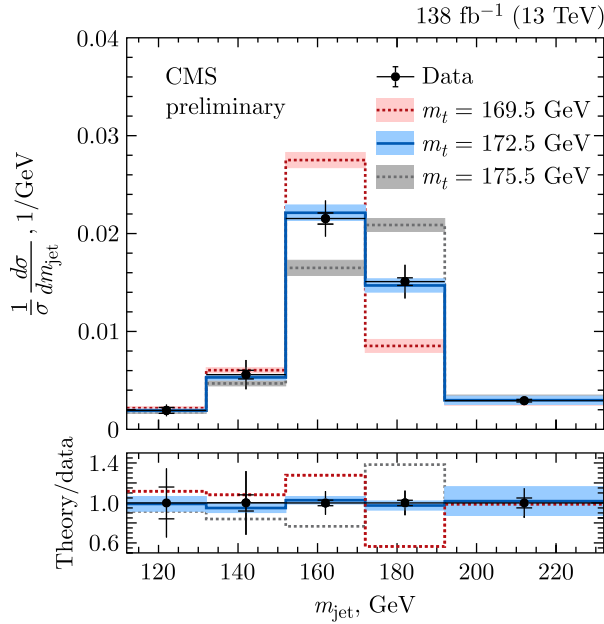


Рис. 3. Нормализованное сечение рождения  $t\bar{t}$  как функция  $m_{\text{jet}}$  по сравнению с предсказаниями, полученными с помощью POWHEG. Для нормализованного измерения данные сравниваются с предсказаниями с разными значениями  $m_t$

ми импульсами. Измерение осуществляется в канале лептон + струи  $t\bar{t}$ -событий, где лептон — электрон или мюон. Дифференциальное распределение было восстановлено до уровня частиц и использовалось для извлечения массы топ-кварка  $m_t$  (рис. 3). Неопределенности в моделировании излучения в конечном состоянии уменьшаются путем изучения угловых соотношений субструктуры струй. Эти разработки привели к значительному повышению точности по отношению к более ранним измерениям, в результате которого было получено  $m_t = (172,76 \pm 0,81)$  ГэВ.

### ИЗМЕРЕНИЕ ШИРИНЫ БОЗОНА ХИГГСА [5]

Коллаборация CMS представила результаты о первом наблюдении образования бозона Хиггса вне массовой поверхности. Также выполнено измерение ширины бозона Хиггса.

Ожидается, что 10% всех протон-протонных столкновений с  $pp \rightarrow H \rightarrow VV$  в СМ приводят к образованию двух векторных бозонов ( $V$ -бозонов) на массовой поверхности. Такое сечение достаточно велико, чтобы обеспечить статистически значимое измерение образования  $H$ -бозона вне массовой поверхности. Измерение сечения для больших значений инвариантных масс  $VV$  затем можно использовать для измерения сечения образования  $H$ -бозона вне массовой поверхности, а отношение сечения образования вне массовой поверхности к сечению образования на массовой поверхности позволяет измерить ширину бозона Хиггса  $\Gamma_H$ .

Информация о величине сигнала вне массовой поверхности,  $\Gamma_H$  и ограничениях на возможные аномальные связи за пределами СМ (BSM) извлекается из комбиниро-

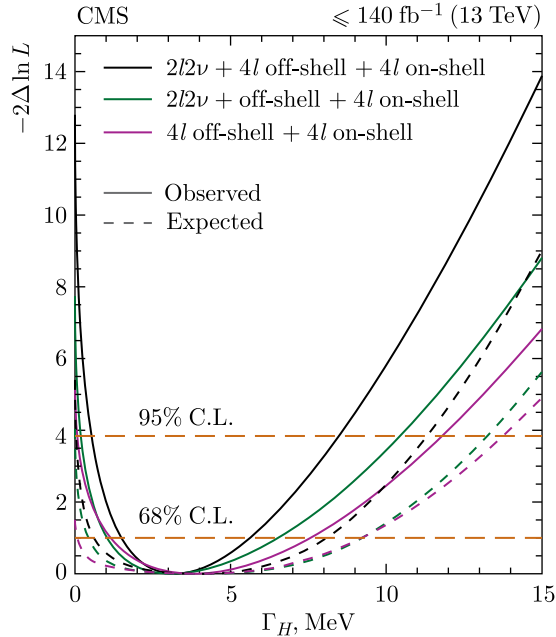


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Наблюдаемое (сплошные кривые) и ожидаемое (штриховые) однопараметрическое сканирование правдоподобия по  $\Gamma_H$ . Сканы показаны для комбинации данных  $4l$  на массовой поверхности с данными  $4l$  вне массовой поверхности или данными  $2l2\nu$  вне массовой поверхности отдельно или с обоими наборами данных (черная кривая)

ванных подгонок по нескольким кинематическим распределениям выбранных событий  $2l2\nu$  и  $4l$ . В то время как события вне массовой поверхности используются исключительно для установления наличия образования  $H$ -бозона вне массовой поверхности, измерение  $\Gamma_H$  основано на комбинации данных на массовой поверхности и вне массовой поверхности.

Сценарий без обмена бозоном Хиггса исключается при уровне достоверности 99,97% (3,6 стандартных отклонения). Комбинация данных  $4l$  и  $2l2\nu$  позволяет измерять  $\Gamma_H$  с точностью около 50%. Измерение улучшает верхний предел  $\tau_H$  на восемь порядков по сравнению с прямым ограничением. Для ширины бозона Хиггса получено значение  $\Gamma_H = 3,2^{+2,4}_{-1,7}$  МэВ, что согласуется с ожиданием Стандартной модели в 4,1 МэВ.

По разным периодам данных и категориям событий в подгонке используется в общей сложности 117 многомерных распределений. На рис. 4 показаны результаты сканирования функции правдоподобия по  $\Gamma_H$ .

## ПОИСК ОБРАЗОВАНИЯ ПАР БОЗОНОВ ХИГГСА [6]

Физические эффекты за пределами СМ могут проявляться через аномальные связи бозонов Хиггса или через новые частицы, которые могут войти в квантовые петли в процессе реакции образования двух бозонов Хиггса. Экспериментально это будет наблюдаться как изменение сечения образования  $HH$  и кинематики событий.

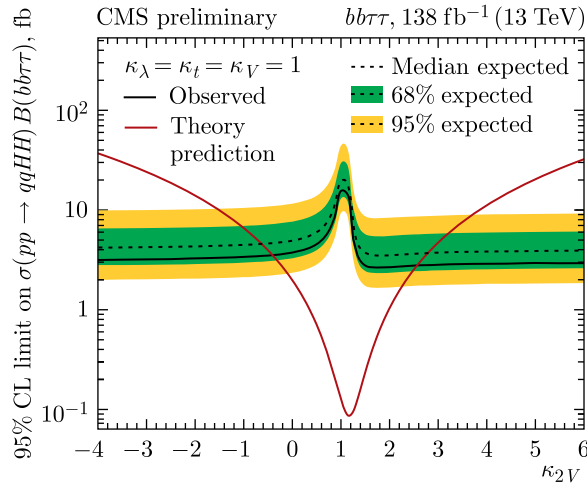


Рис. 5. Наблюдаемые и ожидаемые верхние пределы при 95%-м уровне достоверности на поперечном сечении  $HH$  VBF, умноженном на вероятность распада  $bb\tau\tau$

Константу трехлинейного самодействия бозона Хиггса  $\lambda_{HHH}$  можно извлечь из измерения реакции образования двух бозонов Хиггса. Информацию о величине константы удобно представлять в виде коэффициента  $k_\lambda$ , который показывает отношение померенной константы к предсказаниям СМ ( $k_\lambda = \lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{\text{SM}}$ ). Другим процессом образования пары бозонов Хиггса является процесс слияния векторных бозонов. Этот процесс дает второй по величине вклад в реакцию образования пары бозонов Хиггса и возможность получения информации о константах взаимодействия бозона Хиггса с двумя векторными бозонами ( $k_V$  для  $VVH$ -взаимодействия и  $k_{2V}$  для  $VVHH$ -взаимодействия).

Исследуется конечное состояние, в котором один  $H$ -бозон распадается на пару  $b$ -кварков, а другой распадается на  $\tau^+\tau^-$  (для простоты  $HH \rightarrow bb\tau\tau$ ), характеризующееся большой вероятностью распада 7,3% для массы  $H$ -бозона 125 ГэВ. Значительная доля вероятности распада в сочетании с точными алгоритмами идентификации  $\tau$  делают это конечное состояние одним из наиболее чувствительных к реакции образования  $HH$ . В работе получены интервалы на 95%-м уровне достоверности для этих величин. Для  $k_{2V}$  этот интервал приведен на рис. 5.

## ПОИСК РЕЗОНАНСОВ В СИСТЕМАХ ДВУХ ВЕКТОРНЫХ БОЗОНОВ ( $VV$ ) И СИСТЕМЕ $VH$ [7]

Многие расширения Стандартной модели предполагают существование новых частиц, которые можно было бы зарегистрировать на БАК. Спектр таких моделей, как и предсказываемых ими частиц, весьма велик. В экспериментах на БАК проводится поиск таких частиц. Для различных моделей было изучено около 100 каналов рождения и распадов новых частиц.

Многие из этих поисков мотивированы моделями, направленными на решение проблемы иерархий, такими как модель Рэндалла–Сандрума с искривленным допол-

нительным измерением, моделями с расширенными секторами Хиггса, как в модели с двумя дублетами Хиггса (2HDM), или моделями с составными бозонами Хиггса или с расширенными калибровочными секторами, как в теориях Великого объединения.

Поиски проводились для комбинаций, которые включали в себя тяжелый резонанс, распадающийся на  $VV$ ,  $VH$  (где  $V = W$  или  $Z$ , а  $H$  представляет бозон Хиггса  $SM$ ) и их последующие конечные состояния, а также прямые распады на  $ll$  и  $lv$ . Конкретные поиски, объединенные в этой работе, выполнялись в  $VV$ -каналах:  $WZ \rightarrow qqqq, \nu\nu qq, lvqq, llqq, l\nu ll, WW \rightarrow qqqq$ ; каналах  $VH$ :  $WH \rightarrow qqbb, lvbb$  и  $ZH \rightarrow \nu\nu bb, llbb$ . Анализы ориентировались в целом на поиск узких резонансов в распределении масс в конечном состоянии. Результаты, представленные в работе, интерпретировались в контексте тяжелого векторного триплета со спином 1 (HVT). Модель HVT обеспечивает широкую феноменологическую основу, которая охватывает ряд различных сценариев, включающих новые тяжелые калибровочные бозоны и их связи с фермионами и бозонами  $SM$ . В этой модели вводится тройка бесцветных векторных бозонов  $W$  с нулевым гиперзарядом. Рассматривались два сценария. Первый сценарий, называемый моделью А, воспроизводит феноменологию слабосвязанных моделей. Второй сценарий, называемый моделью В, реализует сильносвязанный сценарий.

Стратегия состояла в том, чтобы рассматривать ортогональные анализы ATLAS, которые независимо изучали конкретные конечные состояния новой физики, и объединять их вместе в статистической интерпретации, которая более строго ограничивает соответствующие параметры моделей.

Данные исключают наличие резонансов в слабосвязанной модели HVT А с массой менее 5,8 ТэВ, а соответствующий предел в сильносвязанной модели HVT В составляет 4,5 ТэВ.

### ПОИСК ЛЕПТОКВАРКОВ [8]

Коллаборация CMS представила результаты поиска лептокварков LQ 3-го поколения, взаимодействующих с  $\tau$ -лептоном и  $b$ -кварком. Отбирались события с  $\tau$ -лептоном и по крайней мере одной струей, идентифицированной как  $b$ -струя. Поиск проводился как для процессов одиночного образования лептокварка, так и для процессов парного рождения. Также рассматривался нерезонансный процесс с обменом лептокварком в  $t$ -канале.

Получены верхние пределы на сечение рождения LQ в диапазоне масс LQ 0,5–2,3 ТэВ. Нижние пределы при 95%-м уровне достоверности по массе LQ задаются в диапазоне 1,22–1,96 ТэВ, а для константы связи менее 2,5 — в зависимости от модели LQ (рис. 6). Верхние пределы также устанавливаются на таких LQ в зависимости от их массы.

### НАБЛЮДЕНИЕ ТЕТРАКВАРКА $T_{cc}^+$ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ЛНСЬ [9]

Коллаборация ЛНСЬ представила результаты наблюдения адронного состояния, содержащего четыре кварка. Это так называемый тетракварк содержит два очарованных кварка, а также  $u$ - и  $d$ -кварки. Это экзотическое состояние имеет массу примерно 3875 МэВ/ $c^2$  и проявляет себя как узкий пик в спектре масс  $D^0 D^0 \pi^+$ -мезонов чуть

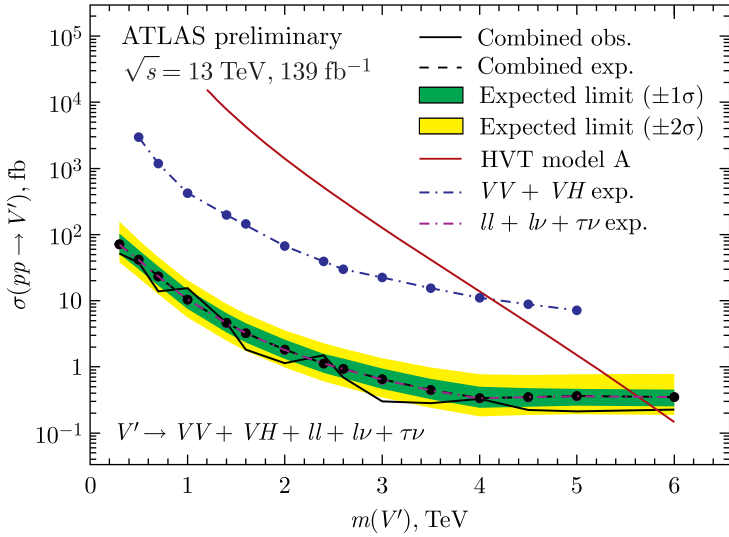


Рис. 6. 95% С.Л. Верхние наблюдаемые и ожидаемые пределы поперечного сечения тяжелого векторного бозона в зависимости от массы полюса для анализов и их соответствующей комбинации в предположении контрольной точки HVT-A и режима рождения  $q\bar{q}$

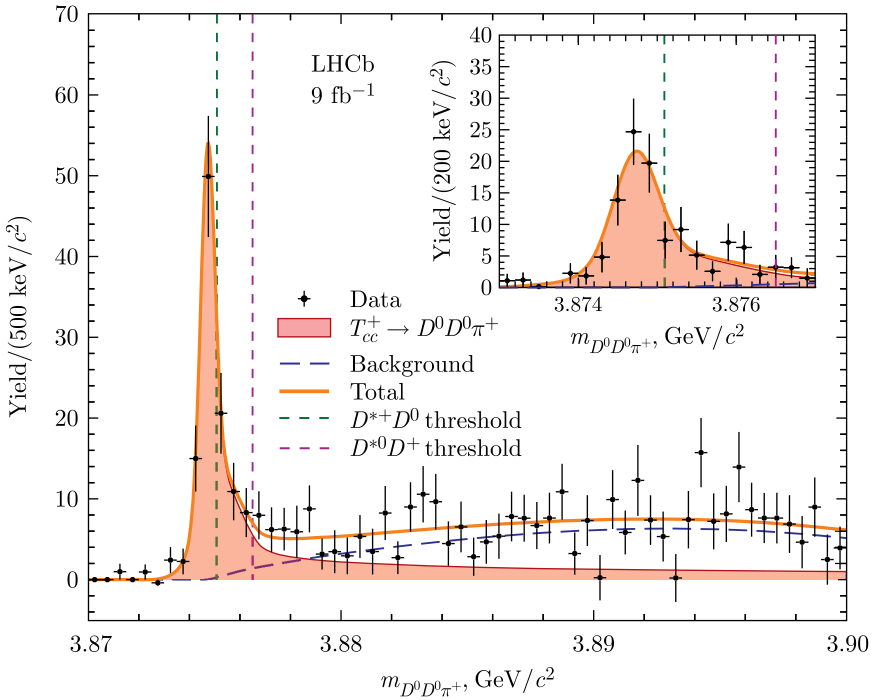


Рис. 7. Распределение массы  $D^0 D^0 \pi^+$ , из которого статистически вычтен вклад нештрихового фона  $D^0$



ниже. Анализировались данные протон-протонных столкновений, собранные с помощью детектора LHCb при энергиях центра масс 7, 8 и 13 ТэВ, соответствующих интегральной светимости  $9 \text{ фб}^{-1}$ . Состояние  $D^0 D^0 \pi^+$  восстанавливается путем отбора событий с двумя  $D^0$ -мезонами и всех положительно заряженных пионов, образовавшихся в одной и той же точке взаимодействия  $pp$  (рис.7). Оба мезона  $D^0$  реконструируются в канал распада  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ .

## НАБЛЮДЕНИЕ ЭФФЕКТА МЕРТВОГО КОНУСА [10]

Изучение картины партонного ливня является одним из ключевых экспериментальных инструментов проверки КХД. Ожидается, что в описании такой картины существенную роль играет масса иницирующего кварка. Такая зависимость проявляется в виде эффекта мертвого конуса. Этот механизм предсказывает подавление глюонного излучения, испускаемого тяжелым кварком с массой  $m_Q$  и энергией  $E$ , в пределах конуса углового размера  $m_Q/E$  вокруг излучателя. Коллаборация ALICE опубликовала результаты о прямом наблюдении мертвого конуса КХД с использованием новых методов итеративной декластеризации для реконструкции партонного потока очарованных кварков. Этот результат подтверждает фундаментальную особенность КХД. Кроме того, измерение угла мертвого конуса представляет собой прямое экспериментальное наблюдение ненулевой массы очарованного кварка, которая является фундаментальной константой в Стандартной модели физики элементарных частиц.

Ожидается, что эффект мертвого конуса будет иметь значительные последствия для  $b$ - и  $c$ -кварков. Вероятность излучения в коллинеарной области, которая является расходящимся пределом КХД, на котором излучение наиболее интенсивно, подавляется с увеличением массы кварка. Это приводит к уменьшению среднего числа частиц, образующихся в партонном ливне.

Значительное подавление сечения малоугловых расщеплений наблюдается в меченых  $D^0$ -мезонами струях по сравнению с инклюзивной популяцией струй.

Величина этого подавления увеличивается с уменьшением энергии излучателя, как и следовало ожидать из обратной зависимости угла мертвого конуса от энергии излучателя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aad G. et al. Observation of  $WWW$  Production in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  with the ATLAS Detector // Phys. Rev. Lett. 2022. V. 129. P. 061803.
2. CMS Collab. EW  $W$  Gamma plus 2 Jets at 13 TeV Full Run 2 // CMS-PAS-SMP-21-011.
3. ATLAS Collab. Observation of Gauge Boson Joint-Polarisation States in  $W^\pm Z$  Production from  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  with the ATLAS Detector. CERN Report ATLAS-CONF-2022-053. Geneva: CERN, 2022.
4. CMS Collab. Measurement of the Jet Mass Distribution and Top Quark Mass in Hadronic Decays of Boosted Top Quarks in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ . CERN Report CMS-PAS-TOP-21-012. Geneva: CERN, 2022.
5. CMS Collab. First Evidence for Off-Shell Production of the Higgs Boson and Measurement of Its Width // Nature Phys. 2022. V. 18. P. 1329.

6. *CMS Collab.* Search for Nonresonant Higgs Boson Pair Production in Final States with Two Bottom Quarks and Two Tau Leptons in Proton–Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV. CERN Report CMS-PAS-HIG-20-010. Geneva: CERN, 2022.
7. *ATLAS Collab.* Combination of Searches for Heavy Resonances Using 139 fb<sup>-1</sup> of Proton–Proton Collision Data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS Detector. CERN Report ATLAS-CONF-2022-028. Geneva: CERN, 2022.
8. *CMS Collab.* The Search for a Third-Generation Leptoquark Coupling to a  $\tau$  Lepton and a  $b$  Quark through Single, Pair and Nonresonant Production at  $\sqrt{s} = 13$  TeV. CERN Report CMS-PAS-EXO-19-016. Geneva: CERN, 2022.
9. *LHCb Collab.* Observation of an Exotic Narrow Doubly Charmed Tetraquark // Nature Phys. 2022. V. 18. P. 751–754.
10. *ALICE Collab.* Direct Observation of the Dead-Cone Effect in Quantum Chromodynamics // Nature. 2022. V. 605. P. 440–446.

Получено 27 октября 2022 г.