

Распады B_c^+ мезона и поиск редкого распада
 $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ в эксперименте ATLAS
По материалам кандидатской диссертации

Турчихин Семён Михайлович



Физический факультет МГУ
им. М. В. Ломоносова,
Кафедра общей ядерной физики



НИИЯФ им. Д. В. Скобельцына

Научный руководитель:
д. ф.-м. н., проф.
Смирнова Лидия Николаевна

Семинар ОЭПВАЯ, 13 октября 2015 г.

- ▶ Установка ATLAS и условия набора данных
- ▶ В-физика в эксперименте ATLAS
- ▶ Триггер В-физики
 - ▶ Отбор событий распадов $B \rightarrow \mu^+ \mu^- X$
- ▶ Измерение характеристик распадов $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ и $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ в данных сеанса Run 1
- ▶ Поиск редкого распада $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ в данных pp -соударений при 7 ТэВ
 - ▶ Определение вклада фоновых процессов $B_{(s)}^0 \rightarrow hh$
- ▶ Заключение
 - ▶ Положения, выносимые на защиту
 - ▶ Личный вклад
 - ▶ Публикации

Детектор ATLAS

Внутренний детектор в магнитном поле соленоида

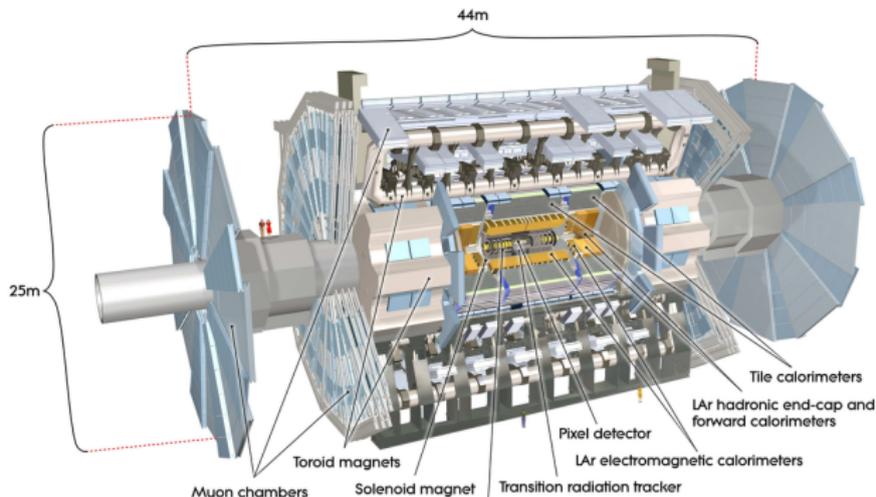
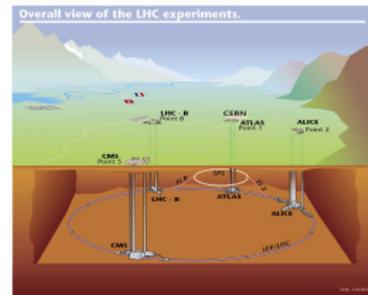
- ▶ Пиксельный детектор
- ▶ Полупроводниковый микростриповый детектор
- ▶ Трековый детектор переходного излучения

Калориметры

- ▶ Электромагнитный
- ▶ Адронный

Мюонный спектрометр в поле 2-х тороидальных магнитов

- ▶ Камеры с резистивными пластинами (RPC)
- ▶ Тонко-зазорные камеры (TGC)
- ▶ Мониторируемые дрейфовые трубки (MDT)
- ▶ Катодные полосковые камеры (CSC)



Условия набора данных в 2011–2012 гг.

Светимость коллайдера

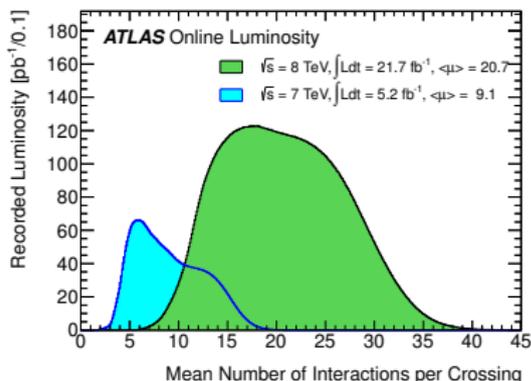
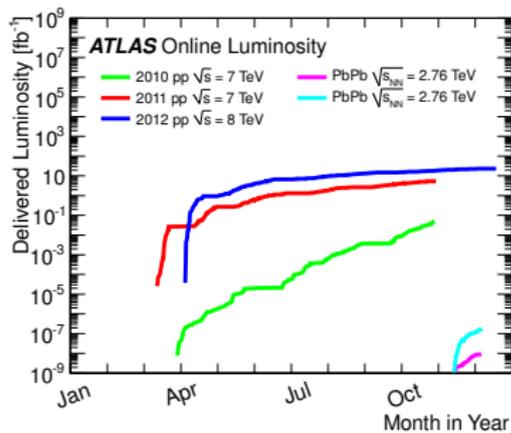
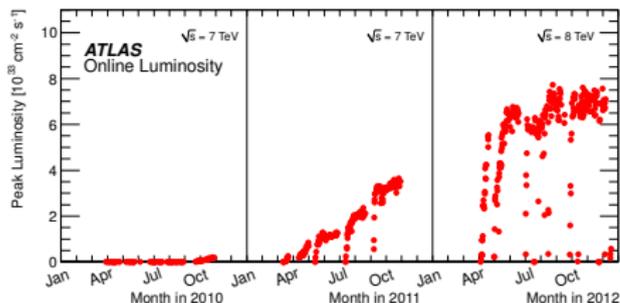
- ▶ до $7,7 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в 2012 г.

Полная интегральная светимость

- ▶ 5 фб^{-1} при $\sqrt{s} = 7 \text{ ТэВ}$
- ▶ 20 фб^{-1} при $\sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}$

Средняя множественность наложенных pp взаимодействий

- ▶ 9,1 при $\sqrt{s} = 7 \text{ ТэВ}$ (пиковая до 20)
- ▶ 20,7 при $\sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}$ (пиковая до 40)

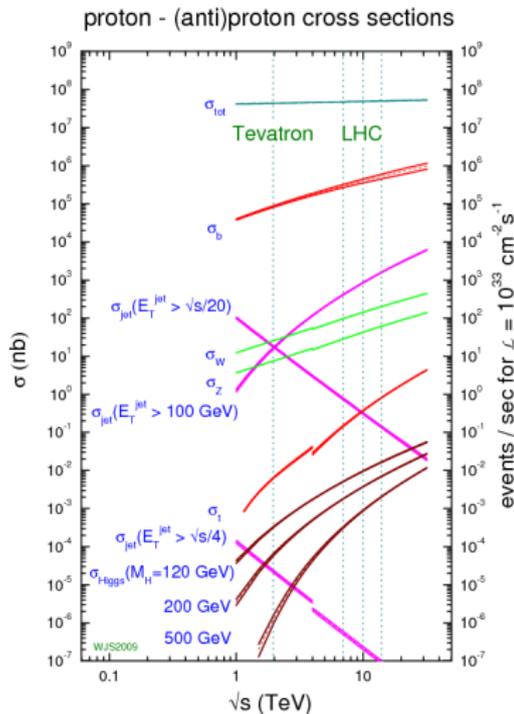


Физика тяжёлых ароматов (В-физика)

- ▶ Проверка предсказаний КХД
 - ▶ Сечения рассчитываются в NLO порядке КХД
 - ▶ Свойства распадов и спектроскопия связанных состояний
- ▶ Уточнение параметров Стандартной Модели (матрица СКМ, параметры CP-нарушения)
- ▶ Средство косвенных поисков Новой Физики
 - ▶ редкие процессы с петлевыми диаграммами чувствительны вкладам новых тяжёлых частиц
 - ▶ по отклонениям от СМ можно судить о наличии таких вкладов

В-физика на LHC

- ▶ Рождение всех b -адронов (в т. ч. B_c^+ , b -барионов)
- ▶ Высокие сечения рождения ([ATLAS: 360 мкб при 7 ТэВ](#), [Nucl. Phys. B 864 \(2012\) 341](#))



Триггер эксперимента ATLAS в сеансе Run 1

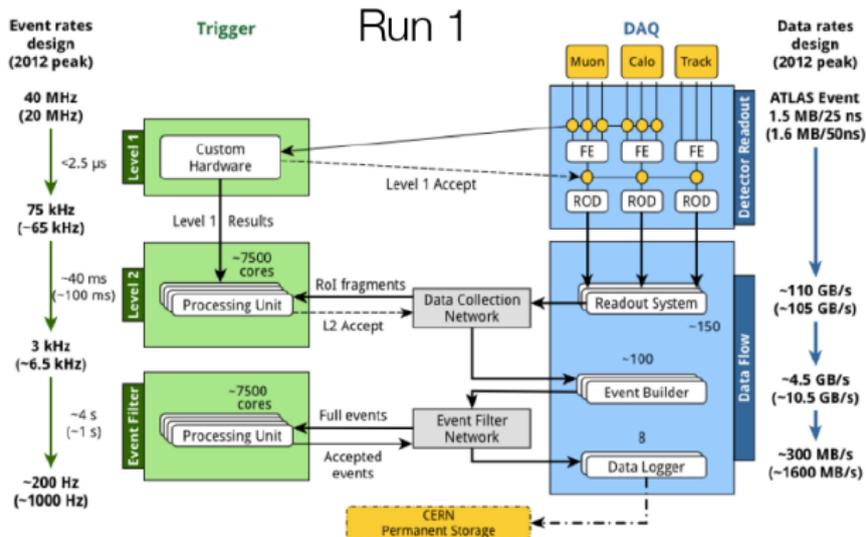
- ▶ “Железный” триггер первого уровня (L1)
 - ▶ калориметры (струи, электроны/фотоны, унесённая поперечная энергия)
 - ▶ быстрые мюонные камеры (RPC, TGC)

- ▶ Программный триггер высокого уровня (HLT)

- ▶ Триггер 2-го уровня (L2)
- ▶ Фильтр событий (EF)

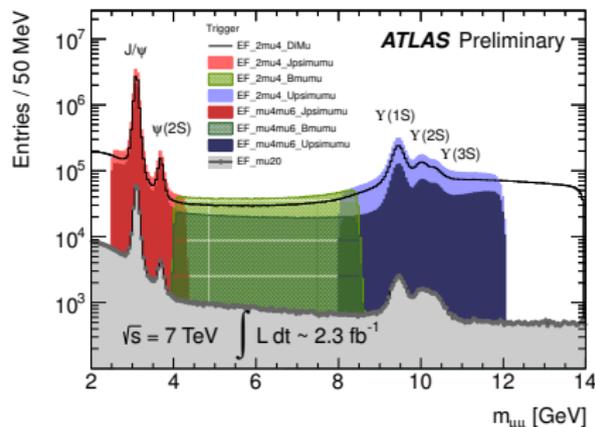
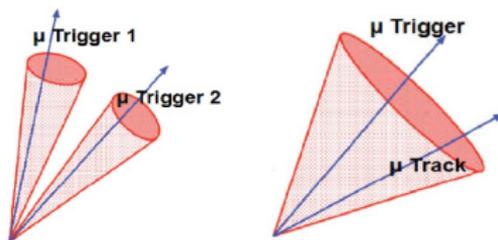
- ▶ Реконструкция в HLT

- ▶ внутри области интереса (RoI)
- ▶ для некоторых объектов — во всём объёме детектора
- ▶ алгоритмы, близкие к оффлайновым



Триггер В-физики

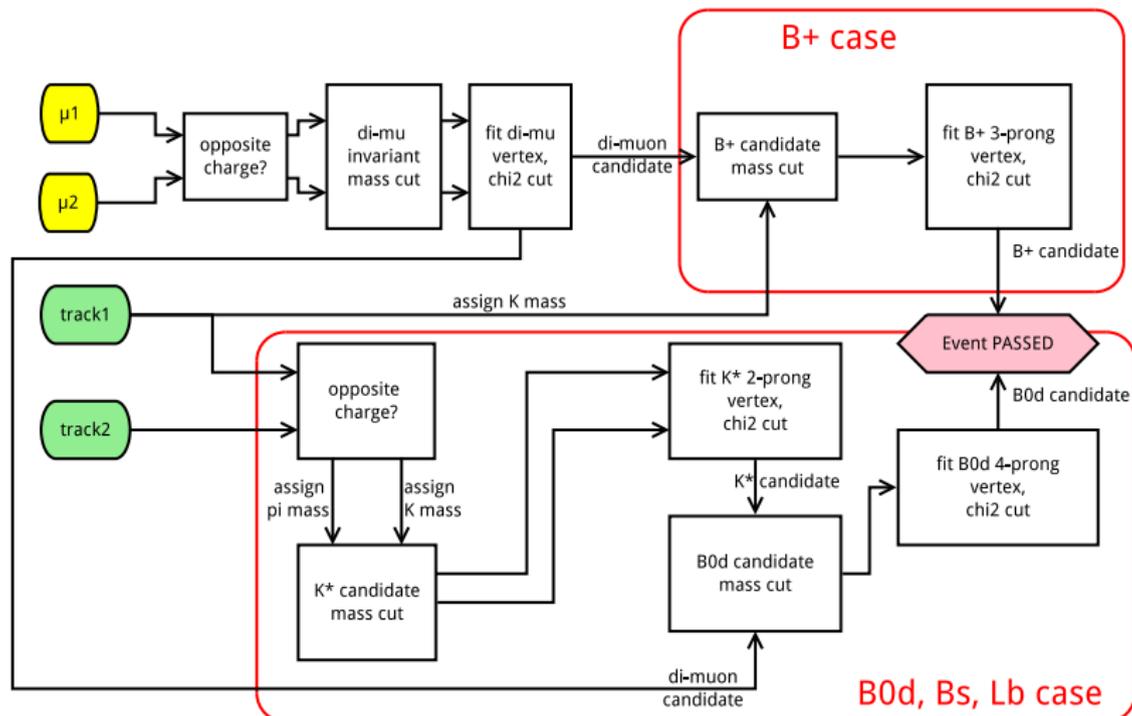
- ▶ Триггерный отбор событий для В-физики основан на поиске димюонной сигнатуры
 - ▶ 2 мюона на L1 в двух RoI
 - ▶ подтверждаются на L2 и EF
 - ▶ фитирование общей вершины
 - ▶ отбор по массе
 - ▶ пороги $p_T(\mu) > 4, 6$ ГэВ
- ▶ Одномюонные триггеры
 - ▶ один мюон на L1
 - ▶ второй ищется в том же RoI
 - ▶ высокие потоки событий → только при малой светимости
- ▶ Триггеры $B \rightarrow \mu^+ \mu^- X$
 - ▶ для отбора полулептонных распадов с парой мюонов в широком диапазоне масс
 - ▶ введены в 2012 г.



Триггерный отбор распадов $B \rightarrow \mu^+ \mu^- X$

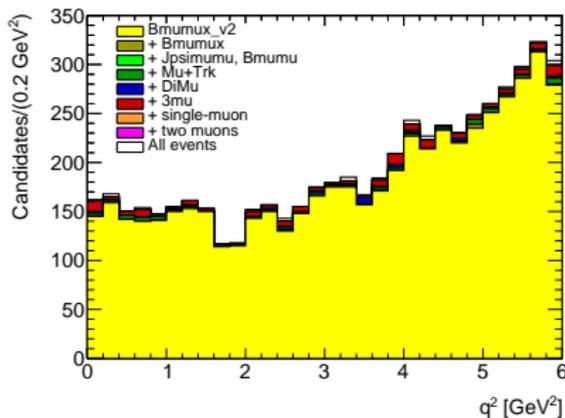
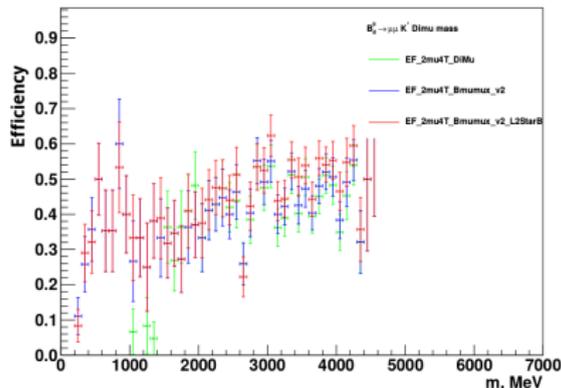
Отбираются 4 эксклюзивные топологии распадов:

- ▶ $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- K^{*0} (K^+ \pi^-)$
- ▶ $\Lambda_b \rightarrow \mu^+ \mu^- \Lambda (p \pi^-)$
- ▶ $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \phi (K^+ K^-)$
- ▶ $B^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- K^+$



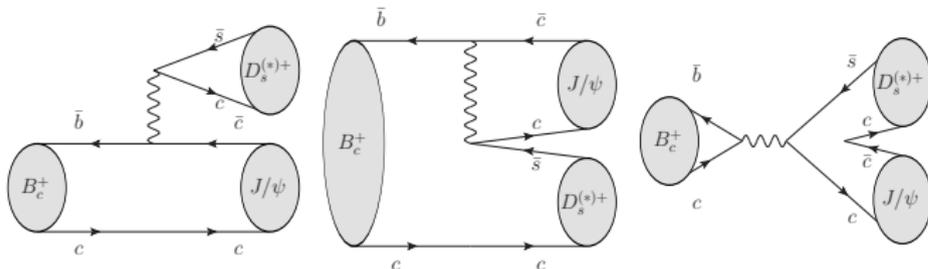
Триггерный отбор распадов $B \rightarrow \mu^+ \mu^- X$

- ▶ Триггер был разработан и внедрён в середине 2012 г.
 - ▶ Позволил снизить потоки событий в ~ 3 раза по сравнению с отбором димюонов в том же массовом окне
- ▶ Эффективность отбора для распадов с $p_T(\text{trk}) > 1$ ГэВ почти не уступает димюонным триггерам
- ▶ Используются в анализе распада $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- K^{*0}$ по данным при 8 ТэВ
 - ▶ В 2012 г. эти триггеры преобладают в отобранных событиях с $q^2(\mu^+ \mu^-) < 6$ ГэВ²



$B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{(*)+}$: МОТИВАЦИЯ

- ▶ B_c^+ – единственная слабо распадающаяся частица из двух тяжёлых кварков
 - ▶ Динамика **процессов рождения** тяжёлых кварков
 - ▶ **Модели распада** B_c^+
 - ▶ **Спектроскопия** системы $\bar{b}c$
- ▶ Распады с чармонием и $D_s^{(*)+}$ -мезонами – примеры процесса $\bar{b} \rightarrow \bar{c}s\bar{c}$ в B_c^+ -секторе



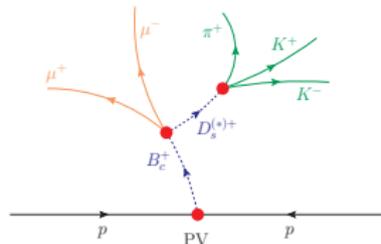
Спектаторная Подавленная спектаторная Аннигиляционная

- ▶ Ряд теоретических предсказаний свойств этих распадов – *парциальные ширины, поляризация*
 - ▶ пКХД, правило сумм, ряд релятивистских кварковых моделей; также возможна проверка гипотезы фрагментации (сходные распады B^0, B^+)
- ▶ Наблюдались ранее только в LHCb ([PRD 87 \(2013\) 112012](#))

Схема анализа

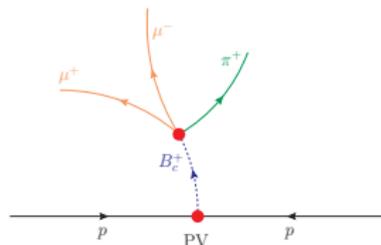
Сигнальные каналы: $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{(*)+}$

- ▶ Промежуточные резонансы через $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ и $D_s^+ \rightarrow \phi(K^+ K^-) \pi^+$
- ▶ Две раздельные вершины B_c^+ и D_s^+
- ▶ Массы кандидатов J/ψ и D_s^+ *фиксируются в каскадном фите* на их мировые средние
- ▶ D_s^{*+} распадается в $D_s^+ \gamma$ или $D_s^+ \pi^0$, нейтральная частица не реконструируется



Нормировочный канал: $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$

- ▶ Наблюдался ранее в ATLAS — [ATLAS-CONF-2012-028, PRL 113 \(2014\) 212004](#)
- ▶ Одна вторичная вершина B_c^+ ; масса кандидата J/ψ *фиксируется в фите* на её мировое среднее
- ▶ Большая статистика → используется для нормировки при измерении \mathcal{B}
- ▶ Измеряются $\mathcal{R}_{D_s^+/\pi^+}$, $\mathcal{R}_{D_s^{*+}/\pi^+}$ и $\mathcal{R}_{D_s^{*+}/D_s^+}$



Поляризация в распаде $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$

- ▶ Скалярный B_c^+ в 2 векторных частицы → *три амплитуды спиральности* A_{00} , A_{++} , A_{--}
- ▶ Продольно A_{00} поперечно $A_{\pm\pm}$ поляризованные компоненты имеют разную кинематику: форма *массы $J/\psi D_s^+$* и *угла вылета мюона из J/ψ*
- ▶ Могут быть разделены путём фитирования этих переменных → измерение $\Gamma_{\pm\pm}/\Gamma$

Набор данных

- ▶ pp соударения 2011 и 2012 гг., $4.9 \text{ fb}^{-1} @ 7 \text{ ТэВ} + 20.6 \text{ fb}^{-1} @ 8 \text{ ТэВ}$

Триггеры

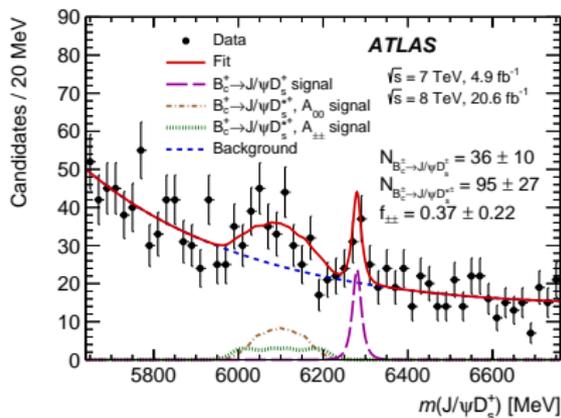
- ▶ Набор из 5–11 триггерных цепочек в зависимости от периода
- ▶ Поиск одно-, двух- и трёхмюонных сигнатур с кандидатом $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$

Отбор кандидатов для анализа

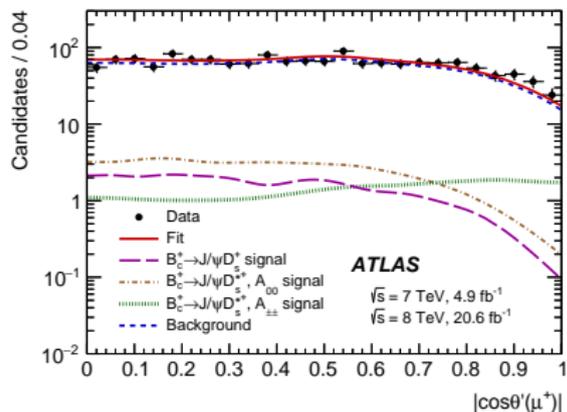
- ▶ Направлен в основном на подавление комбинаторного фона
- ▶ По возможности синхронизирован между сигнальным и калибровочным распадом
- ▶ Критерии отбора:
 - ▶ Кинематические характеристики (p_T треков и D_s^+ -кандидата)
 - ▶ Качество фита вершин ($\chi^2/\text{n.d.f.}$)
 - ▶ Смещение вторичной и третичной вершин ($L_{xy}(B_c^+)$ и $L_{xy}(D_s^+)$)
 - ▶ Массовые окна для промежуточных резонансов (J/ψ , D_s^+ , ϕ)
 - ▶ Угловые характеристики

Сигналы $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{(*)+}$ (1)

- ▶ 2-мерный фит распределений $m(J/\psi D_s^+)$ и $\cos \theta'(\mu^+)$ методом максимального правдоподобия



- ▶ Величины сигналов согласуются с результатами 1D массового фита
- ▶ Поведение фита проверялось с помощью псевдоэкспериментов
 - ▶ Чувствительность 2D фита к $f_{\pm\pm}$ значительно выше 1D
- ▶ Статистическая значимость сигнала 4.9σ



Параметр	Значение
$m_{B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+}$ [МэВ]	6279.9 ± 3.5
$N_{B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+}$	36 ± 10
$N_{B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}}$	95 ± 27
$f_{\pm\pm}$	0.37 ± 0.22

$B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{(*)+}$: результаты

Отношения парциальных ширин:

$$\mathcal{R}_{D_s^+/\pi^+} = \mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+)/\mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+) = 3.8 \pm 1.1 \text{ (stat.)} \pm 0.4 \text{ (syst.)} \pm 0.2 \text{ (bran.)}$$

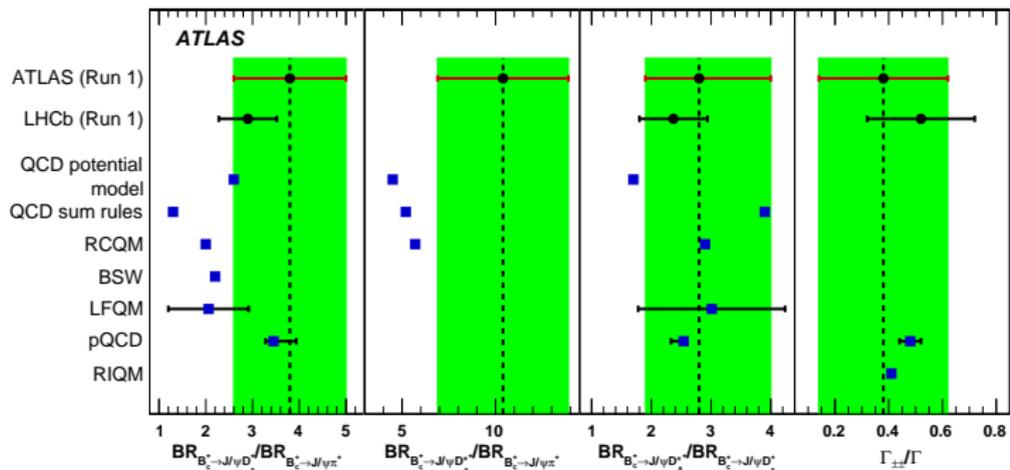
$$\mathcal{R}_{D_s^{*+}/\pi^+} = \mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+})/\mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+) = 10.4 \pm 3.1 \text{ (stat.)} \pm 1.5 \text{ (syst.)} \pm 0.6 \text{ (bran.)}$$

$$\mathcal{R}_{D_s^{*+}/D_s^+} = \mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+})/\mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+) = 2.8_{-0.8}^{+1.2} \text{ (stat.)} \pm 0.3 \text{ (syst.)}$$

Поперечная поляризация в $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$:

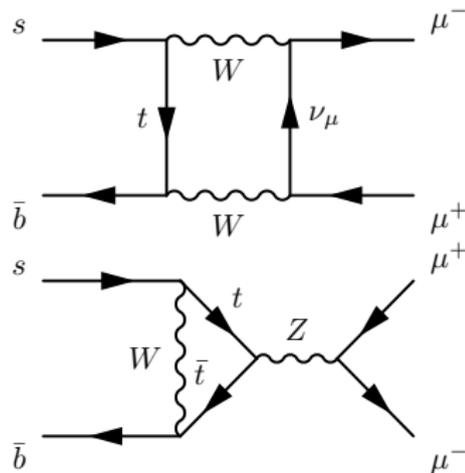
$$\Gamma_{\perp\pm}/\Gamma = 0.38 \pm 0.23 \text{ (stat.)} \pm 0.07 \text{ (syst.)}$$

(В систематике доминируют эффекты модели фитирования)



$B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$: мотивация

- ▶ Распад $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ **запрещён на древесном уровне** в Стандартной Модели (FCNC)
- ▶ Происходит через диаграммы **“боксы”** и **“пингвин”** в СМ:
- ▶ СМ предсказывает относительные парциальные ширины
 $B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.56 \pm 0.30) \times 10^{-9}$,
 $B(B_d^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (1.07 \pm 0.10) \times 10^{-10}$
- ▶ Эти величины чувствительны к **вкладам Новой Физики**
- ▶ в ряде суперсимметричных моделей с расширенным хиггсовским сектором, эффект пропорционален $\text{tg}^6 \beta$



- ▶ Используется **нормировочный канал** $B^+ \rightarrow J/\psi(\mu^+\mu^-)K^+$

$$\mathcal{B}(B_s \rightarrow \mu^+\mu^-) = \mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi K^+ \rightarrow \mu^+\mu^- K^+) \times \frac{f_u}{f_s} \times \frac{N_{\mu^+\mu^-}}{N_{J/\psi K^+}} \times \frac{A_{J/\psi K^+}}{A_{\mu^+\mu^-}} \frac{\epsilon_{J/\psi K^+}}{\epsilon_{\mu^+\mu^-}}$$

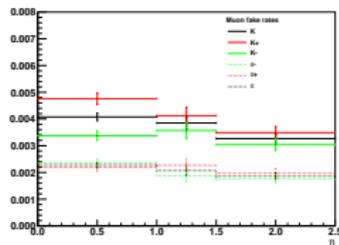
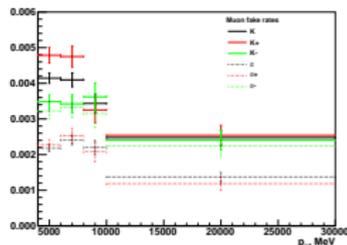
- ▶ Анализ данных pp столкновений при 7 ТэВ (**4,9 фб⁻¹**)
- ▶ Отбор сигнала с использованием **мультивариативной техники (BDT)** с 13-ю входными переменными
- ▶ Верхний предел на $\mathcal{B}(B_s \rightarrow \mu^+\mu^-)$ получен методом CL_s
- ▶ **“Слепой” анализ**: область масс сигнала [5066, 5666] МэВ не используется до завершения

Источники фона:

- ▶ *Комбинаторный фон* — не связанные пары мюонов
- ▶ *Резонансный фон* от распадов $B_{(s)}^0 \rightarrow hh$ при ложной идентификации обоих адронов (π , K) как мюонов

Определение вклада распадов $B_{(s)}^0 \rightarrow hh$

- ▶ K и π могут ошибочно идентифицироваться как мюоны из-за распадов ($\sim 95\%$) или прохождений сквозь калориметры
- ▶ Вероятности ложной идентификации оцениваются из моделирования МК $B \rightarrow hh$ на уровне $(2 - 4) \cdot 10^{-3}$.
- ▶ Неустраняемый источник фона \rightarrow оценивается ожидаемое число таких событий

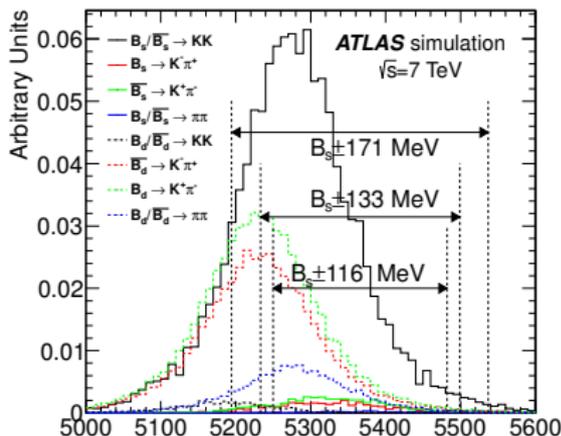


Распад	$\mathcal{B}, 10^{-6}$
$B_s \rightarrow K^+ K^-$	$(24,5 \pm 1,8)$
$B_s \rightarrow K^- \pi^+$	$(5,10 \pm 0,19)$
$B_s \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$(0,73 \pm 0,14)$
$B_d \rightarrow K^+ K^-$	$(0,12 \pm 0,06)$
$B_d \rightarrow K^+ \pi^-$	$(19,55 \pm 0,54)$
$B_d \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$(5,13 \pm 0,24)$

	μ mis-ID, 10^{-3}
K	$3,78 \pm 0,12$
K^+	$4,24 \pm 0,18$
K^-	$3,31 \pm 0,16$
π	$2,11 \pm 0,08$
π^+	$2,14 \pm 0,12$
π^-	$2,08 \pm 0,12$

Определение вклада распадов $B_{(s)}^0 \rightarrow hh$

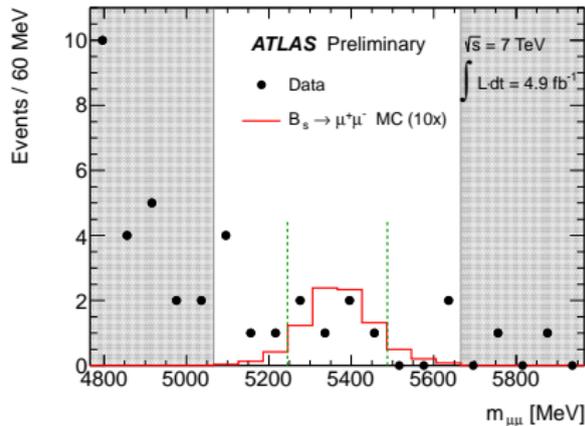
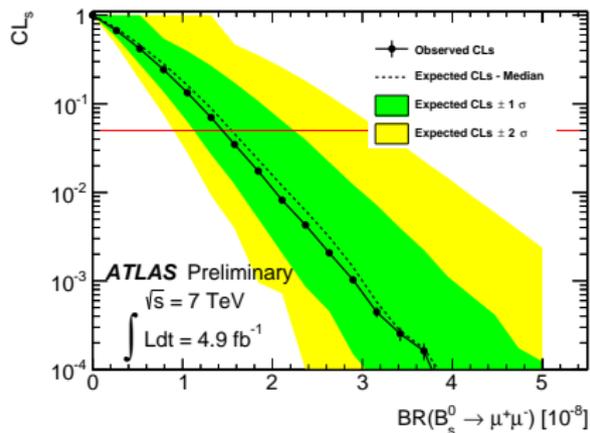
- ▶ Ожидаемое число событий в каждом канале $N_{B_x \rightarrow hh'}$ определяется с помощью нормировки на канал $B^+ \rightarrow J/\psi(\mu^+\mu^-)K^+$, используя **известные** $B(B_x \rightarrow hh')$ и полученные **вероятности ложной идентификации**
 - ▶ В случае ошибочной идентификации обоих дочерних адронов, **эффективность отбора таких распадов совпадает с эффективностью отбора сигнала**
 - ▶ Различаются только акцептансы массового окна, в котором ищется сигнал \rightarrow учёт вклада $B_{(s)}^0 \rightarrow hh$ включён в процедуру оптимизации ширины окна
- ▶ Ожидаемое число $B_{(s)}^0 \rightarrow hh$ после оптимизации отбора: $0,30 \pm 0,12$ события в сигнальной области $|\Delta m| < 121$ МэВ
- ▶ ожидаемый комбинаторный фон: 6,75 события
- ▶ ожидаемый сигнал СМ: 1,5 события
- ▶ наблюдалось 6 событий



$B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$: результаты

- Установлен верхний предел

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 15(12) \cdot 10^{-9} @ 95 (90) \% \text{ C.L.}$$



- Текущий лучший результат — комбинация LHCb и CMS по анализам всех данных Run 1:
 $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (2,8_{-0,6}^{+0,9}) \cdot 10^{-9}$
- Анализ этого распада в ATLAS по 25 fb^{-1} близок к завершению

Заключение

- ▶ Для эксперимента ATLAS создан алгоритм триггерного отбора событий, содержащих распады $B \rightarrow \mu^+ \mu^- X$, с полной реконструкцией отдельных распадных топологий с использованием информации о треках системы X во внутреннем детекторе ATLAS.
- ▶ Разработана методика реконструкции и отбора распадов $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ и $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$, а также нормировочного распада $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$ в данных эксперимента ATLAS.
- ▶ В ходе анализа данных pp -соударений при энергиях 7 и 8 ТэВ, набранных в эксперименте ATLAS в течение сеанса Run 1, измерены отношения парциальных ширин распадов $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ и $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ к ширине нормировочного распада $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$ и доля поперечной поляризации в распаде $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$. Результаты измерений согласуются с аналогичным измерением, выполненном в эксперименте LHCb и обладают сравнимой точностью. Доступные теоретические предсказания указанных величин находятся в согласии с результатами измерения.
- ▶ В рамках анализа по поиску редкого распада $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ в эксперименте ATLAS разработана методика оценки вклада фоновых событий с распадами $B_{(s)}^0 \rightarrow hh$ при ложной идентификации дочерних адронов как мюонов в детекторе.
- ▶ В результате анализа данных pp -соударений при энергии 7 ТэВ, набранных в эксперименте ATLAS в 2011 г. и соответствующих интегральной светимости $4,9 \text{ фб}^{-1}$, установлен верхний предел на величину относительной парциальной ширины распада $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$. Полученное ограничение $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 1,8 \cdot 10^{-8}$ для доверительного интервала 95% согласуется с предсказаниями Стандартной Модели и результатами других экспериментов.

Автор защищает:

1. Методику триггерного отбора событий, содержащих распады $B \rightarrow \mu^+ \mu^- X$, с полной реконструкцией отдельных распадных топологий с использованием информации об адронных треках во внутреннем детекторе ATLAS.
2. Метод реконструкции и отбора распадов $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ и $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$, а также нормировочного распада $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$ в данных эксперимента ATLAS.
3. Измерение отношений парциальных ширин распадов $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ и $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ к ширине нормировочного распада $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$ и доли поперечной поляризации в распаде $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$.
4. Методику оценки вклада фоновых событий с распадами $B_{(s)}^0 \rightarrow hh$ при поиске распада $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$.
5. Верхний предел на величину относительной парциальной ширины распада $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$, установленный в результате анализа данных эксперимента ATLAS, соответствующих интегральной светимости $4,9 \text{ фб}^{-1}$.

Личный вклад диссертанта

Диссертант принимал активное участие в работе группы В-триггера эксперимента ATLAS. В частности, им был разработан программный алгоритм триггерного отбора топологий распадов $B \rightarrow \mu^+ \mu^- X$ с полной реконструкцией конечного состояния. Он занимался текущей поддержкой ПО триггера В-физики и сопутствующей инфраструктуры во время сеанса Run 1 в 2012–2013 гг., а также в процессе подготовки и во время сеанса Run 2 в 2014–2015 гг. С октября 2014 г. диссертант занимает позицию заместителя координатора группы В-триггера.

Диссертантом был проведён физический анализ данных по измерению парциальных ширин распадов $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ и $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$. Им непосредственно выполнены все этапы работы: разработка методики реконструкции распадов, подготовка наборов данных Монте-Карло, поиск оптимальных критериев отбора событий, фитирование отобранных кандидатов и измерение парциальных ширин с использованием нормировочного распада $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$, оценка систематических неопределённостей.

Диссертант активно участвовал в работе над анализом по поиску редкого распада $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$. В частности, он провёл оценку вклада резонансных источников фона от распадов $B_{(s)}^0 \rightarrow hh$, которая затем была использована при оптимизации критериев отбора сигнальных событий и установлении верхнего предела на относительную парциальную ширину распада.

Кроме того диссертант участвовал в сменных дежурствах по обеспечению функционирования детектора ATLAS: дежурствах по общему мониторингу качества данных и контролю функционирования триггера В-физики.

Публикации, удовлетворяющие требованиям ВАК:

1. Процессы рождения и корреляции b -кварков при энергиях LHC / А. С. Болдырев, ..., С. М. Турчихин и др. // Ядерная физика. — 2011. — Т. 74, No 12. — С. 1712—1720.
2. Мюонный триггер эксперимента ATLAS для pp соударений при 7 ТэВ / А. С. Болдырев, ..., С. М. Турчихин и др. // Ядерная физика и инжиниринг. — 2013. — Т. 4, 9-10. — С. 894—902.
3. Результаты эксперимента ATLAS по поиску редкого распада $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ / А. С. Болдырев, ..., С. М. Турчихин и др. // Ядерная физика и инжиниринг. — 2013. — Т. 4, 9-10. — С. 826—831.
4. Aad G., ..., Turchikhin S. et al. (ATLAS Collaboration). Performance of the ATLAS muon trigger in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Eur. Phys. J. C. — 2015. — Vol. 75, No 3. — P. 120. — DOI: [10.1140/epjc/s10052-015-3325-9](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3325-9). — arXiv: [1408.3179](https://arxiv.org/abs/1408.3179) [hep-ex].
5. Aad G., ..., Turchikhin S. et al. (ATLAS Collaboration). Study of the $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ and $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ decays with the ATLAS detector // accepted by Eur. Phys. J. C. — 2015. — arXiv: [1507.07099](https://arxiv.org/abs/1507.07099) [hep-ex].

Прочие публикации:

6. Smirnova L., Turchikhin S. Expected b -production at the LHC // Новости и проблемы фундаментальной физики. — 2011. — Т. 1, No 10. — С. 50—52.
7. Measurements and simulations of b and c -quark production at hadron colliders / A. Boldyrev, ..., S. Turchikhin S. et al. // Proceedings of the Eighteenth Annual Seminar NPC'S'2011. Vol. 18. — Minsk, Belarus, 2011. — P. 216—222.
8. Recent results of the search of $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ rare decay from the ATLAS experiment / A. Boldyrev, ..., S. Turchikhin et al. // Nonlinear dynamics and applications: Proceeding of the Nineteenth Annual Seminar NPC'S'2012. Vol. 19. — Minsk, Belarus, 2012. — P. 26—36.
9. ATLAS Collaboration. Limit on $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ branching fraction based on 4.9 fb^{-1} of integrated luminosity. // ATLAS-CONF-2013-076

Апробация работы

Текущие результаты работы многократно обсуждались на рабочих совещаниях коллаборации ATLAS и совещаниях российских групп — участников эксперимента. Результаты докладывались автором на следующих конференциях и школах:

1. 19-й международный семинар «Нелинейные явления в сложных системах» (17—20 апреля 2012 г., Минск, Белоруссия);
2. Международная сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (12—16 ноября 2012 г., МИФИ, Москва, Россия; 5—8 ноября 2013 г., ИФВЭ, Протвино, Московская обл., Россия);
3. XXI International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects (DIS 2013; 22—26 апреля 2013 г., Марсель, Франция);
4. The 2014 European School of High-Energy Physics (ESHEP 2014; 18 июня — 1 июля 2014 г., Гардерен, Нидерланды);
5. 10th International Workshop on Heavy Quarkonium (Quarkonium 2014; 10—14 ноября 2014 г., CERN, Женева, Швейцария);
6. The Third Annual Large Hadron Collider Physics Conference (LHCP 2015; 31 августа — 5 сентября 2015 г., С.-Петербург, Россия),

а также на научном семинаре ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ. Полученные результаты докладывались другими участниками коллаборации ATLAS на различных международных конференциях.

Дополнительные слайды

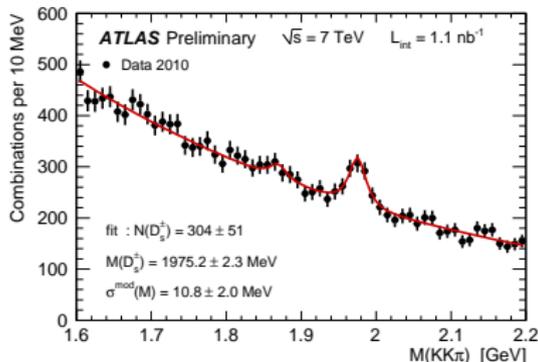
Отбор кандидатов $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{(*)+}$ (1)

Кандидаты J/ψ

Отбор аналогичный большинству анализов В-физики в ATLAS

- ▶ $p_T(\mu) > 3$ ГэВ, $|\eta(\mu)| < 2.3$
- ▶ один мюон *комбинированный*
- ▶ стандартные требования на количество хитов в Pixel, SCT, TRT
- ▶ вершина $\chi^2/\text{n.d.f.} < 15$

- ▶ $2.8 < m(\mu^+\mu^-) < 3.4$ МэВ



Кандидаты D_s^+

Отбор основан на наработках в измерении сечений рождения

D -мезонов, [ATLAS-CONF-2011-017](#)

- ▶ $p_T(\text{trk}) > 1$ ГэВ, $|\eta(\text{trk})| < 2.5$
- ▶ 2 хита Pix, 6 SCT
- ▶ вершина $\chi^2/\text{n.d.f.} < 8$
- ▶ $m(\phi)$ в окне ± 7 МэВ

- ▶ $\cos \theta^*(\pi) < 0.8$, $\theta^*(\pi) = \angle(\vec{p}_{D_s^+ \text{ frame}}(\pi), \vec{p}_{\text{lab. frame}}(D_s^+))$
- ▶ $|\cos^3 \theta'(K)| > 0.15$, $\theta'(K) = \angle(\vec{p}_{\phi \text{ frame}}(K), \vec{p}_{\phi \text{ frame}}(\pi^+))$

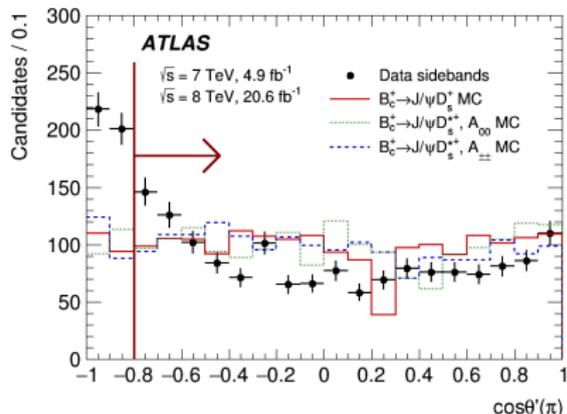
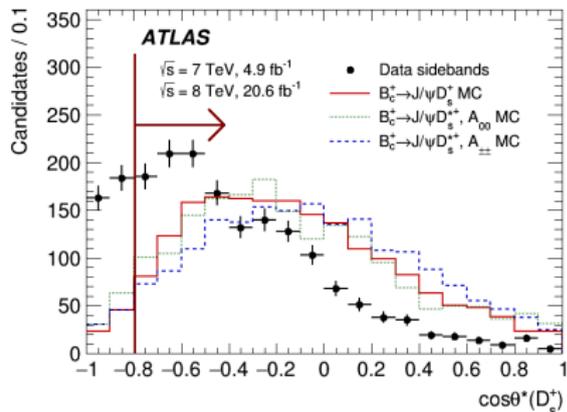
- ▶ $1.93 < m(K^+K^-\pi^+) < 2.01$ ГэВ

Отбор кандидатов $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{(*)+}$ (2)

Кандидаты B_c^+

- ▶ **Кинематическая область:**
 $p_T(B_c^+) > 15$ ГэВ, $|\eta(B_c^+)| < 2.1$
- ▶ $d_0^{PV} < 0.1$ мм, $z_0^{PV} \sin \theta < 0.5$ мм
- ▶ вершина $\chi^2/\text{n.d.f.} < 3$
- ▶ $L_{xy}(B_c^+) > 0.1$ мм, $L_{xy}(D_s^+) > 0.15$ мм
- ▶ Оба $L_{xy} < 10$ мм
- ▶ исключаем $5.34 < m(J/\psi\phi) < 5.40$ ГэВ для подавления $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$
- ▶ $\cos \theta^*(D_s^+) > -0.8$, $\theta^*(D_s^+) = \angle(\vec{p}_{B_c^+ \text{ frame}}(D_s^+), \vec{p}_{\text{lab. frame}}(B_c^+))$
- ▶ $\cos \theta'(\pi) > -0.8$, $\theta'(\pi) = \angle(\vec{p}_{D_s^+ \text{ frame}}(J/\psi), \vec{p}_{D_s^+ \text{ frame}}(\pi^+))$
- ▶ $p_T(B_c^+)/\sum p_T(\text{trk}) > 0.1$ (сумма по всем трекам из PV)

Если более одной первичной вершины проходят отбор по прицельным параметрам, берётся с $\max \sum p_T^2(\text{trk})$ ($< 1\%$ событий)



Фитирование кандидатов $J/\psi D_s^+$

- ▶ 2-мерный фит распределений $m(J/\psi D_s^+)$ и $\cos \theta'(\mu^+)$ методом максимального правдоподобия
 - ▶ Угол спиральности $\theta'(\mu^+)$ – угол между импульсами μ^+ и D_s^+ в системе покоя J/ψ

Массовая часть

- ▶ Сигнал $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$: модифицированная функция Гаусса

$$\text{Gauss}^{\text{mod}} \sim \exp \left[-\frac{x^{1+\frac{1}{1+x/2}}}{2} \right],$$
$$x = |M_0 - m(J/\psi D_s^+)|/\sigma,$$

ширина σ зафиксирована на значение в Монте-Карло

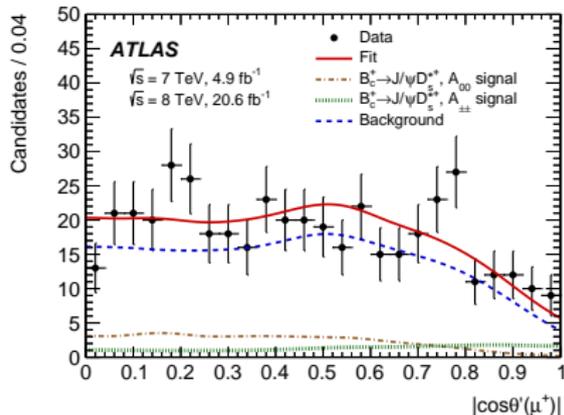
- ▶ Сигналы $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+} A_{00}$ и $A_{\pm\pm}$: темплейты из Монте-Карло
- ▶ Фон: 2-параметрическая экспонента

$$\exp \left[a \cdot m(J/\psi D_s^+) + b \cdot m(J/\psi D_s^+)^2 \right]$$

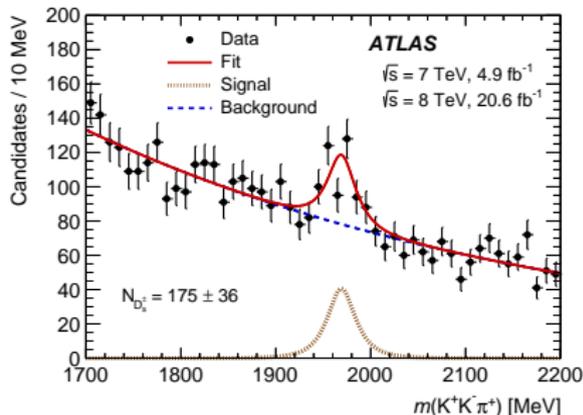
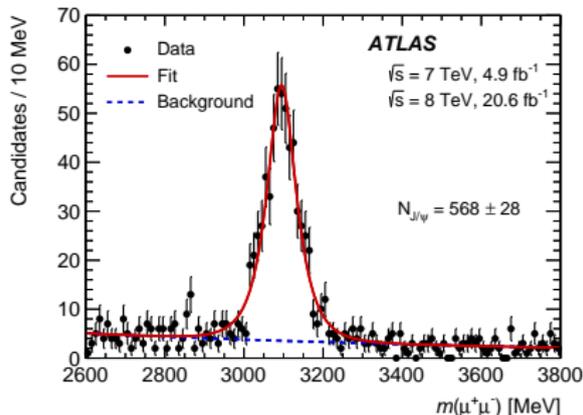
Угловая часть

- ▶ Сигналы: темплейты из Монте-Карло для учёта детекторных эффектов
 - ▶ В теории:
 - ▶ $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$:
 $\cos \theta' \sim \sin^2 \theta'$
 - ▶ $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+} A_{00}$:
 $\cos \theta' \sim \sin^2 \theta'$
 - ▶ $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+} A_{\pm\pm}$:
 $\cos \theta' \sim 1 + \cos^2 \theta'$
- ▶ Фон: темплейты из боковых областей массового спектра $m(J/\psi D_s^+)$
 - ▶ Левая: $m(J/\psi D_s^+) < 5900$ МэВ
 - ▶ Правая: $m(J/\psi D_s^+) > 6360$ МэВ
 - ▶ Между ними: линейная интерполяция двух темплейтов

Фитирование $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{(*)+}$ (3)



- ▶ Слева: проекция угловой части фита для области масс сигнала $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$, $5950 < m(J/\psi D_s^+) < 6250$ МэВ
- ▶ Внизу: сигналы $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ и $D_s^+ \rightarrow \phi(K^+ K^-) \pi^+$ для отобранных кандидатов $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$
 - ▶ Тот же отбор, но *фит без ограничений на массы J/ψ и D_s^+* , кандидаты B_c^+ в окне $5900 < m(J/\psi D_s^+) < 6400$ МэВ



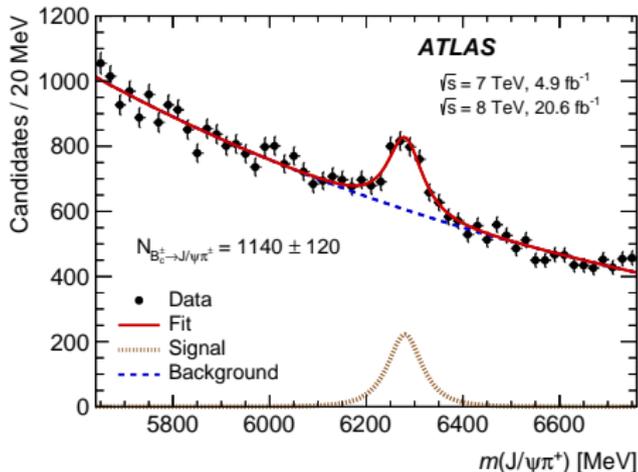
Отбор и фитирование кандидатов $B_c^+ \rightarrow J/\psi\pi^+$

Отбор кандидатов

- ▶ тот же отбор кандидатов J/ψ
- ▶ та же область $p_T(B_c^+)$, $|\eta(B_c^+)|$
- ▶ тот же отбор по d_0^{PV} , $z_0^{\text{PV}} \sin \theta$
- ▶ каскадный фит $\chi^2/\text{n.d.f.} < 3$
- ▶ $L_{xy}(B_c^+) > 0.2$ мм
- ▶ $p_T(\pi^+) > 5$ ГэВ, $|\eta(\pi^+)| < 2.5$
- ▶ $\cos \theta^*(\pi) > -0.8$, $\theta^*(\pi) = \angle(\vec{p}_{B_c^+ \text{ frame}}(\pi), \vec{p}_{\text{lab. frame}}(B_c^+))$
- ▶ $|\cos \theta'(\mu^+)| > -0.8$, $\theta'(\mu^+) = \angle(\vec{p}_{J/\psi \text{ frame}}(\mu^+), \vec{p}_{J/\psi \text{ frame}}(\pi^+))$
- ▶ отбрасываются треки пионов, идентифицированные как мюоны, для подавления $B_c^+ \rightarrow J/\psi\mu^+\nu_\mu X$
- ▶ тот же отбор $p_T(B_c^+)/\sum p_T(\text{trk}) > 0.1$

Фитирование распределения массы

- ▶ **Сигнал:** модифицированная функция Гаусса
- ▶ **Фон:** экспонента



Parameter	Value
$m_{B_c^+ \rightarrow J/\psi\pi^+}$ [MeV]	6279.9 ± 3.9
$\sigma_{B_c^+ \rightarrow J/\psi\pi^+}$ [MeV]	33.9 ± 4.2
$N_{B_c^+ \rightarrow J/\psi\pi^+}$	1140 ± 120

Измерение характеристик распадов

Отношения парциальных ширин:

$$\mathcal{R}_{D_s^{(*)+}/\pi^+} = \frac{1}{\mathcal{B}_{D_s^+ \rightarrow \phi(K^+K^-)\pi^+}} \times \frac{\mathcal{A}_{B_c^+ \rightarrow J/\psi\pi^+}}{\mathcal{A}_{B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{(*)+}}} \times \frac{N_{B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{(*)+}}}{N_{B_c^+ \rightarrow J/\psi\pi^+}}$$

$$\mathcal{R}_{D_s^{*+}/D_s^+} = \frac{N_{B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}}}{N_{B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+}} \times \frac{\mathcal{A}_{B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+}}{\mathcal{A}_{B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}}}$$

- ▶ $\mathcal{B}_{D_s^+ \rightarrow \phi(K^+K^-)\pi^+}$ — берётся из измерения CLEO как функция $m(K^+K^-)$
- ▶ Акцептансы $\mathcal{A}_{B_c^+ \rightarrow X}$ — из Монте-Карло

Mode	$\mathcal{A}_{B_c^+ \rightarrow X}$ [%]
$B_c^+ \rightarrow J/\psi\pi^+$	4.106 ± 0.056
$B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$	1.849 ± 0.034
$B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}, A_{00}$	1.829 ± 0.053
$B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}, A_{\pm\pm}$	1.712 ± 0.035

- ▶ Различие компонент A_{00} и $A_{\pm\pm}$ из-за различной кинематики

$$\mathcal{A}_{B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}} = \left(\frac{f_{\pm\pm}}{\mathcal{A}_{B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}, A_{\pm\pm}}} + \frac{1 - f_{\pm\pm}}{\mathcal{A}_{B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}, A_{00}}} \right)^{-1}$$

Доля поперечной поляризации:

- ▶ значение $f_{\pm\pm}$ из фита корректируется на различие акцептансов

$$\Gamma_{\pm\pm}/\Gamma = f_{\pm\pm} \times \frac{\mathcal{A}_{B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}}}{\mathcal{A}_{B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}, A_{\pm\pm}}}$$

Систематика

Доминирующий вклад в систематику от **фитирования сигналов** $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{(*)+}$ и $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$.

- ▶ Отношения парциальных ширин \mathcal{R} : **описание формы массы сигнала и фона**
- ▶ $\Gamma_{\pm\pm}/\Gamma$: **описание формы $\cos\theta'(\mu^+)$ для фона**

Source	Uncertainty [%]			
	$R_{D_s^+/\pi^+}$	$R_{D_s^{*+}/\pi^+}$	$R_{D_s^{*+}/D_s^+}$	$\Gamma_{\pm\pm}/\Gamma$
Simulated $p_T(B_c^+)$ spectrum	0.4	0.9	0.5	0.4
Simulated $ \eta(B_c^+) $ spectrum	1.9	2.4	0.6	0.2
Tracking efficiency	0.5	0.5	< 0.1	< 0.1
B_c^+ lifetime	1.2	1.3	< 0.1	< 0.1
D_s^+ lifetime	0.3	0.3	< 0.1	< 0.1
$B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{(*)+}$ signal extraction	4.4	10.5	10.7	17.4
$B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$ signal extraction	8.5	8.5	–	–
D_s^{*+} branching fractions	< 0.1	< 0.1	< 0.1	1.1
MC sample sizes	2.3	2.4	2.7	2.2
Total	10.3	14.2	11.0	17.6
$\mathcal{B}_{D_s^+ \rightarrow \phi(K^+K^-)\pi^+}$	5.9	5.9	–	–

- ▶ QCD potential model – P. Colangelo and F. De Fazio, Phys. Rev. D 61 (2000) 034012
- ▶ QCD sum rules – V. Kiselev, hep-ph/0211021
- ▶ Relativistic Constituent Quark Model (RCQM) – M. Ivanov, J. Korner and P. Santorelli, Phys. Rev. D 73 (2006) 054024
- ▶ BSW framework – R. Dhir and R. Verma., Phys. Rev. D 79 (2009) 034004
- ▶ Light Front Quark Model (LFQM) – H.-W. Ke, T. Liu and X.-Q. Li, Phys. Rev. D 89 (2014) 017501
- ▶ Perturbative QCD (pQCD) – Z. Rui and Z.-T. Zou, Phys. Rev. D 90 (2014) 114030
- ▶ Relativistic Independent Quark Model (RIQM) – S. Kar et al., Phys. Rev. D 88 (2013) 094014

Resonant background analysis (cont.)

$$\mathcal{B}(B_s \rightarrow \mu\mu) = N(B_s \rightarrow \mu\mu) \cdot \text{SES}$$

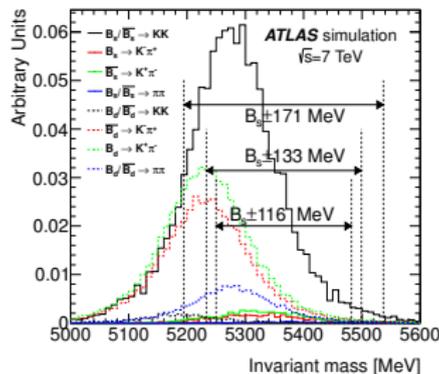
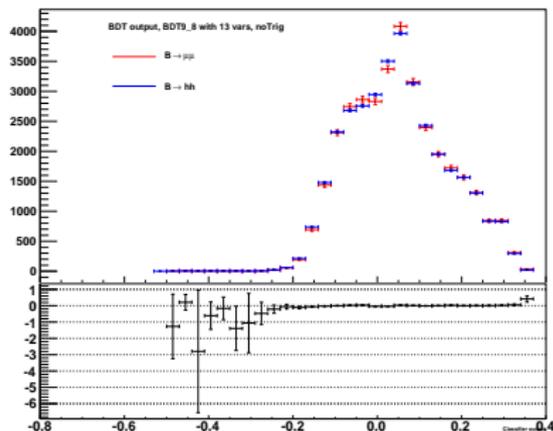
$$\text{SES} = \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi(\mu\mu)K^+)}{N(B^+ \rightarrow J/\psi(\mu\mu)K^+)} \cdot \frac{(\alpha\epsilon)_{B^+}}{(\alpha\epsilon)_{B_s}} \cdot \frac{f_u}{f_s}$$

- For $B \rightarrow hh$ decays

$$\frac{\mathcal{B}(B_x \rightarrow hh')}{\mathcal{B}(B_s \rightarrow \mu\mu)} = \frac{N(B_x \rightarrow hh')}{N(B_s \rightarrow \mu\mu)} \frac{(\alpha\epsilon)_{B_s}}{(\alpha\epsilon)_{B_x}} \frac{f_s}{f_x}$$

- Factorize $(\alpha\epsilon) \rightarrow$ the most of ingredients reduced – $\alpha, \epsilon_{trk}, \epsilon_{vtx}$ are the same:

$$\begin{aligned} N(B_x \rightarrow hh') &= \\ &= \frac{1}{\text{SES}} \times \mathcal{B}(B_x \rightarrow hh') \times \frac{f_x}{f_s} \times \frac{(\alpha\epsilon)_{B_x}}{(\alpha\epsilon)_{B_s}} = \\ &= \frac{1}{\text{SES}} \times \mathcal{B}(B_x \rightarrow hh') \times \frac{f_x}{f_s} \times \\ &\quad \times \frac{(\epsilon_{mass})_{B_x}}{(\epsilon_{mass})_{B_s}} \times \epsilon_{\mu_1 \text{ fake}} \epsilon_{\mu_2 \text{ fake}} \end{aligned}$$



Likelihood and numbers

$$\mathcal{L} = \text{Poisson}(N_{SR}^{obs} | \epsilon \mathcal{B} + N_{bkg} + N_{B \rightarrow hh}) \text{Poisson}(N_{bkg, SB}^{obs} | R_{bkg} N_{bkg}) \times \text{Gauss}(\epsilon^{obs} | \epsilon, \sigma_\epsilon) \text{Gauss}(R_{bkg}^{obs} | R_{bkg}, \sigma_{R_{bkg}})$$

Channel	$A \times \epsilon$	$R_{A\epsilon}$
B^+	$1.317 \pm 0.008\%$ (stat)	$0.267 \pm 1.8\%$ (stat) $\pm 6.9\%$ (syst)
B_s^0	$4.929 \pm 0.084\%$ (stat)	

quantity	value
$N_{J/\psi K^\pm}$	$15\,214 \pm 1.10\% \pm 2.39\%$
$R_{A\epsilon}$	$0.267 \pm 1.8\% \pm 6.9\%$
SES	$(2.07 \pm 0.26) \cdot 10^{-9}$
R_{bkg}^{obs}	1.240 ± 0.050
$N_{SR}^{exp} N_{SR}^{obs}$	$6.75 6$
$N_{bkg, SB}^{obs}$	8
$N_{B \rightarrow hh}$	0.30