Изучение распадов $B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+}$ и наблюдение B_c^{*+}-мезона в эксперименте ATLAS на Большом адронном коллайдере.

(По материалам кандидатской диссертации)

Соискатель: Любушкина Татьяна Вячеславовна

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Гладилин Леонид Константинович





Лаборатория ядерных проблем им. Джелепова

Объединенный институт ядерных исследований

Дубна

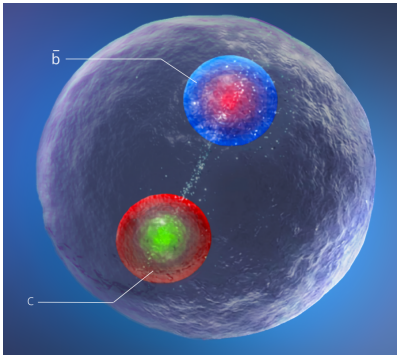
14 октября 2026

Содержание доклада

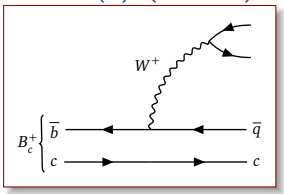
- Введение
- Эксперимент ATLAS
  - Триггерная система
- Измерение эффективности одно- и димюонных триггеров B-физики
- Изучение распадов $B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+}$
- Наблюдение B_c^{*+}-мезона
- Заключение
  - Основные положения, выносимые на защиту
  - Публикации
  - Апробация результатов

Введение: B_c^+ мезон

- Тяжелый кварконий: идеальная система для проверки QCD: теория и эксперимент
- B_c^+ мезон – промежуточное положение между чармонием и боттомонием:
  - состоит из двух тяжелых кварков с различными ароматами ($\bar{b}c$)
  - $m(B_c^+) \sim 6.27$ ГэВ, время жизни (~ 0.5 псек) в 3 раза меньше, чем у B^+
  - может распадаться только за счет слабого взаимодействия, однако обладает многообразием мод распада:

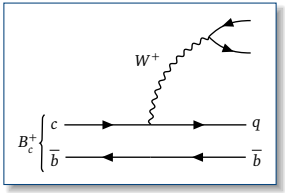


$\bar{b} \to \bar{c}(\bar{u})$, ($\sim 20$ %)



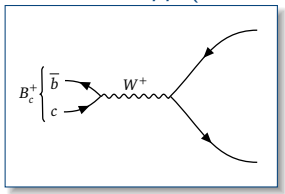
e.g. $B_c^+ \to J/\psi \ell^+ \nu_\ell$, $B_c^+ \to J/\psi \pi^+$

$c \to s(d)$, (~ 70 %)



e.g. $B_c^+ \to B_s^0 \ell^+ \nu_\ell$, $B_c^+ \to B_s^0 \pi^+$

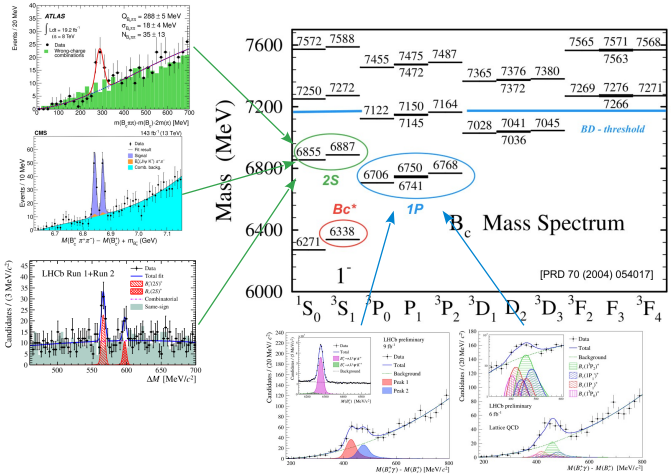
$\bar{b}c \to W^+ \to \bar{q}q$, ($\sim 10$ %)



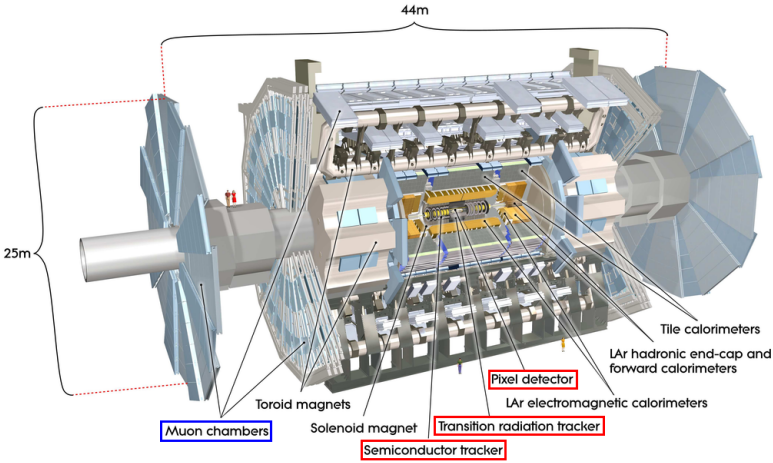
e.g. $B_c^+ \to K^* K^+$, $B_c^+ \to \tau \nu_\tau$

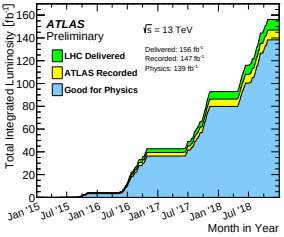
Введение: спектроскопия системы $\bar{b}c$

- Многочисленные предсказания для спектра возбуждений (решеточная КХД, различные потенциальные модели)
- Экспериментальные данные весьма ограничены:
  - $B_c(2S)^+ \to B_c^+(J/\psi\pi^+)\pi^+\pi^-$ (2 состояния):
    - ATLAS PRL 113 (2014) 212004 (расщепление не наблюдалось), CMS PRD 102 (2020) 092007, LHCb PRL 122 (2019) 232001
  - $B_c(1P)^+ \to B_c^+(J/\psi\pi^+)\gamma$:
    - LHCb Phys.Rev.Lett.135 (2025) 23, 231902, Phys.Rev.D 112 (2025) 11, 112003



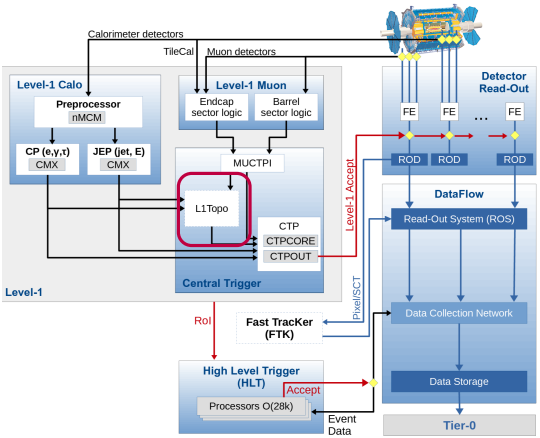
Эксперимент ATLAS





- Пиковая светимость $\sim 2 \times 10^{34}$ см$^{-2}$сек$^{-1}$
- Среднее число pp взаимодействий (pile-up) $\langle\mu\rangle$:
  - 2015г. – 13
  - 2016г. – 25
  - 2017г. – 38 (~ 60)
  - 2018г. – 36 (~ 80)

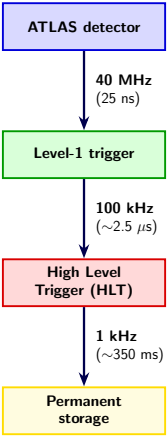
Триггерная система

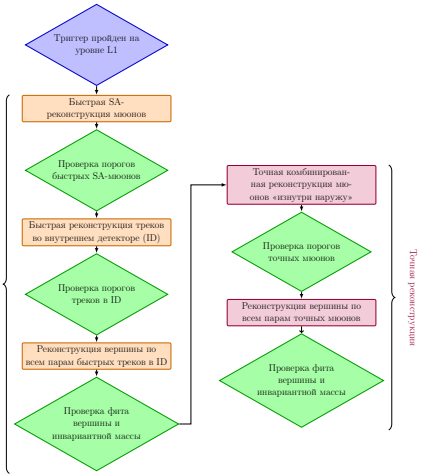


- Level-1 Topological Trigger – L1Calo + интерфейс центрального мюонного триггерного процессора (MUCTPI) $\Longrightarrow$ топологические, угловые и кинематические отборы

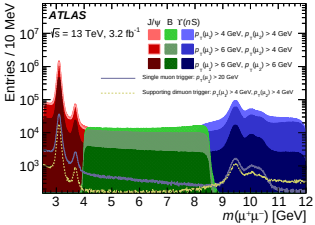
Мюонный триггер

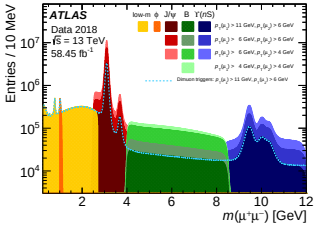
- Level-1 (L1) – быстрая система аппаратного уровня с грубым пространственным разрешением
  - Совпадения хитов в камерах RPC ($(|y| < 1.05)$, acc $\sim$ 80 %) или TGC ($(1.05 < |y| < 2.4)$, acc $\sim$ 99 %)
  - Определяет области интереса (RoI) для последующей обработки: $\eta \times \phi = 0.1 \times 0.1 (0.03 \times 0.03)$ в баррельной (торцевой) части
  - оценка p_T путем сравнения с ожидаемой траекторией мюона с бесконечным поперечным импульсом
  - Время задержки: 2.5 мкс
- HLT - программный триггер высшего уровня
  - Запускается на основе RoI, определенных на уровне L1
  - Информация из камер MDT
  - Два этапа реконструкции:
    - Быстрая: SA и Fast Tracking
    - Прецизионная: реконструкция с высоким разрешением





- Основой программы исследований BLS являются мюоны с низкими p_{T}
- Триггеры, нацеленные на конечные состояния в дилептонной, мультилептонной топологиях, а также в топологии «дилептон + трек(и)»
- Топологический отбор на уровне L1 (BLS L1Topo) – ограничение на $\Delta R_{\mu\mu}$ и $m^2_{\mu\mu} = 2p_{\mathrm{T}}(\mu_1)p_{\mathrm{T}}(\mu_2)(\cosh\Delta\eta - \cos\Delta\phi)$
- Быстрая реконструкция HLT – ID для реконструкции общей вторичной вершины распада и проверки геометрии.





Основная идея факторизации – для разноплечевого триггера muX_muY_bDimu ($\mathtt{X} \neq \mathtt{Y}$, $\mathtt{X} > \mathtt{Y}$):

$$\begin{aligned}\epsilon_{\mathtt{muX_muY_bDimu}} = [\epsilon_{\mathtt{muX}}(p_{\mathrm{T}}^{\mu_1}, q^{\mu_1}\cdot\eta^{\mu_1}) \times \epsilon_{\mathtt{muY}}(p_{\mathrm{T}}^{\mu_2}, q^{\mu_2}\cdot\eta^{\mu_2}) + \\ + \epsilon_{\mathtt{muY}}(p_{\mathrm{T}}^{\mu_1}, q^{\mu_1}\cdot\eta^{\mu_1}) \times \epsilon_{\mathtt{muX}}(p_{\mathrm{T}}^{\mu_2}, q^{\mu_2}\cdot\eta^{\mu_2}) - \\ - \epsilon_{\mathtt{muX}}(p_{\mathrm{T}}^{\mu_1}, q^{\mu_1}\cdot\eta^{\mu_1}) \times \epsilon_{\mathtt{muX}}(p_{\mathrm{T}}^{\mu_2}, q^{\mu_2}\cdot\eta^{\mu_2})] \times C_{\mu\mu}(\Delta R^{\mu\mu}, |y^{\mu\mu}|),\end{aligned}$$

- $\epsilon_{\mathtt{muX}}$ и $\epsilon_{\mathtt{muY}}$ – эффективности одномюонных триггеров
- $C_{\mu\mu}(\Delta R^{\mu\mu}, |y^{\mu\mu}|)$ – корреляционный член – эффекты отбора димюонного кандидата на триггерном уровне, не зависит от порогов

Если $\mathtt{X} = \mathtt{Y}$:

$$\epsilon_{\mathtt{2muX_bDimu}} = [\epsilon_{\mathtt{muX}}(p_{\mathrm{T}}^{\mu_1}, q^{\mu_1}\cdot\eta^{\mu_1}) \times \epsilon_{\mathtt{muX}}(p_{\mathrm{T}}^{\mu_2}, q^{\mu_2}\cdot\eta^{\mu_2})] \times C_{\mu\mu}(\Delta R^{\mu\mu}, |y^{\mu\mu}|).$$

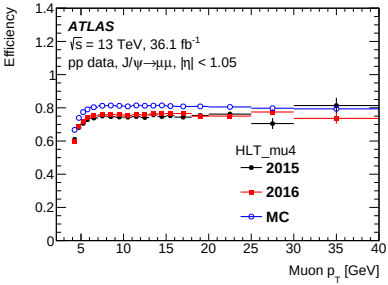
Измерение эффективности одномюонных триггеров

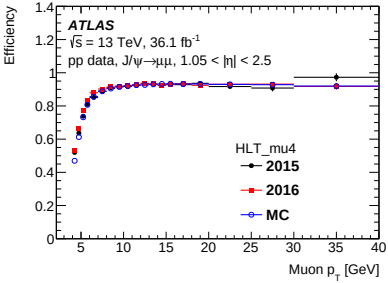
- Распад $J/\psi \to \mu^+\mu^-$ – область малых поперечных импульсов ($p_{\mathrm{T}}(\mu) \lesssim 10$ ГэВ), **метод «Tag-And-Probe»**:
  - Два офлайн-мюона противоположного знака, $p_T > 4$ ГэВ и $|\eta| < 2.3$
  - $2.7 < m(\mu^+\mu^-) < 3.4$ ГэВ, $\chi^2(\mu^+\mu^-) < 20$
- Tag-мюон
  - совпадение ($\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2} < 0.01$) с триггерным мюоном (`HLT_muX_bJpsi_Trkloose`), p_T выше порога триггера
  - совпадение с областью интереса (RoI) триггера первого уровня (L1) по критерию $\Delta R < \mathrm{L1Cut}(p_T^{\mu})$
- Пробный мюон (probe): аналогичное геометрическое соответствие триггерам по одиночным мюонам (mu4, mu6)
- $\Delta R(\mu^+, \mu^-) > 0.2$
- Различные L1 RoI для tag и probe:

$$\Delta R(\mu^+, \mu^-) > \Delta R(\mathrm{L1\ RoI}, \mu_{\mathrm{tag}}) + \Delta R(\mathrm{L1\ RoI}, \mu_{\mathrm{probe}})$$

- Фит методом максимального правдоподобия $m(\mu^+\mu^-)$:

$$\epsilon = \frac{N_{\mathrm{match\ \&\ probe}}}{N_{\mathrm{probe}}}$$





Учет корреляций, $C_{\mu\mu}(\Delta R^{\mu\mu}, |y^{\mu\mu}|)$

Корреляционный член для димюонной системы факторизуется:

$$C_{\mu\mu}(\Delta R^{\mu\mu}, |y^{\mu\mu}|) = c_a(|y^{\mu\mu}|) \times c_{\Delta R}(\Delta R^{\mu\mu}, |y^{\mu\mu}|).$$

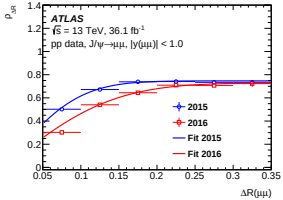
- $c_a(|y^{\mu\mu}|)$ – асимптотическая коррекция: эффект построения вершины, требования на заряды мюонов, применяемые на уровне триггерных алгоритмов BLS (фитируется константой при $\Delta R^{\mu\mu} > 0.3$)

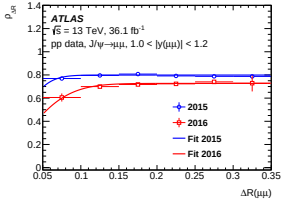
$$c_a(|y^{\mu\mu}|) = \frac{N_{J/\psi}(\texttt{HLT_2muX_bJpsimumu})}{N_{J/\psi}(\texttt{HLT_2muX_bDimumu_novtx_noos})}$$

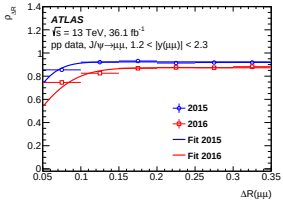
- $c_{\Delta R}(\Delta R^{\mu\mu}, |y^{\mu\mu}|)$ – поправка для учета потерь эффективности, вызванных перекрытием RoI мюонов

$$\rho_{\Delta R}(\Delta R^{\mu\mu}, |y^{\mu\mu}|) = \frac{N_{J/\psi}(\texttt{HLT_mu6_bJpsi_Trkloose\&\&HLT_2mu4_bJpsimumu})}{N_{J/\psi}(\texttt{HLT_mu6_bJpsi_Trkloose})}$$

  - $p_T(\mu) > 8(10)$ ГэВ для гарантированного выхода на плато эффективности триггера mu4 (mu6)
  - Предполагается насыщение при больших значениях ΔR – фитирование производится функцией ошибок, которая и дает итоговую поправку



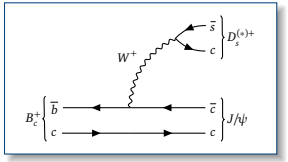




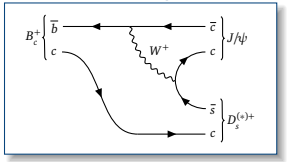
$B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+}$: мотивация

- Переход $\bar{b} \to \bar{c}c\bar{s}$, c – спектатор (+ аннигиляционная диаграмма)
- Наблюдались ранее коллаборациями LHCb (PRD 87 (2013) 112012) и ATLAS (EPJC 76 (2016) 4)
- Цель нового измерения – улучшить точность измеренных свойств этих распадов за счет использования большего набора данных (Run 2) и новых методов анализа.
- **Измеряемые величины**:
  1. $R_{D_s^+/\pi^+} = \frac{\mathcal{B}(B_c^+ \to J/\psi D_s^+)}{\mathcal{B}(B_c^+ \to J/\psi \pi^+)}$
  2. $R_{D_s^{*+}/\pi^+} = \frac{\mathcal{B}(B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+})}{\mathcal{B}(B_c^+ \to J/\psi \pi^+)}$
  3. $R_{D_s^{*+}/D_s^+} = \frac{\mathcal{B}(B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+})}{\mathcal{B}(B_c^+ \to J/\psi D_s^+)}$
  4. Поперечная поляризация в распаде $B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+}$: $\Gamma_{\pm\pm}/\Gamma = \frac{\Gamma_{\pm\pm}(B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+})}{\Gamma(B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+})}$

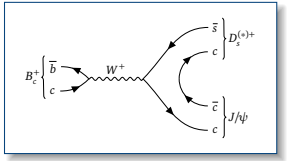
цвето-разрешенная спектаторная



цвето-подавленная спектаторная



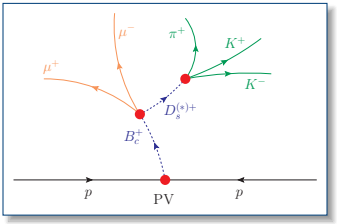
аннигиляционная



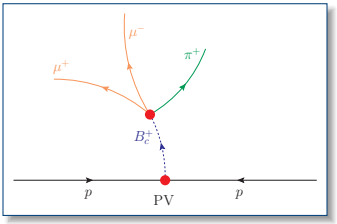
$B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+}$: стратегия анализа

Полный набор данных второго сеанса работы LHC ($\sqrt{s} = 13$ ТэВ, $\mathcal{L} = 139$ фб$^{-1}$)

1. **Сигнальные каналы распада** $B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+}$
   - Каскад: две раздельные вершины B_c^+ и D_s^+
   - Промежуточные резонансы $J/\psi \to \mu^+\mu^-$ и $D_s^+ \to \phi\pi^+$ с последующим распадом $\phi \to K^+K^-$.
   - Массы кандидатов J/ψ и D_s^+фиксируются в каскадном фите на их мировые средние
   - D_s^{*+} распадается на $D_s^+\gamma$ или $D_s^+\pi^0$ – частичная реконструкция



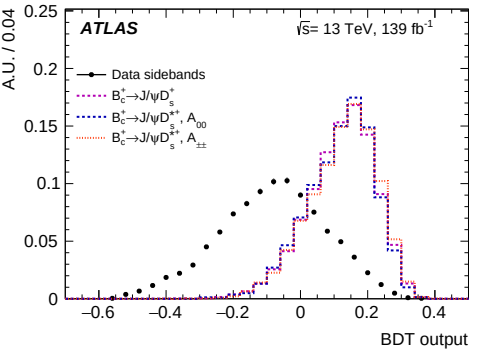
2. **Нормировочный распад** $B_c^+ \to J/\psi\pi^+$
   - Одна вторичная вершина распада B_c^+; масса кандидата в J/ψ зафиксирована в фите на мировое среднее
   - Достаточная статистика $\Longrightarrow$ используется для измерения $\mathcal{B}$



3. **Поляризация в распаде** $B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+}$**, измерение** $\Gamma_{\pm\pm}/\Gamma$
   - Псевдоскалярный мезон B_c^+ распадается на две векторные частицы $\to$ три спиральные амплитуды: A_{00}, A_{++}, A_{--}.
   - Продольная A_{00} и поперечные компоненты $A_{\pm\pm}$ обладают различной кинематикой: форма $m(J/\psi D_s^+)$ и $|\cos\theta'(\mu^+)|$– угол спиральности $J/\psi \Longrightarrow$ 2D фит

$B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+}$: реконструкция сигнальных распадов

1. Предварительный кинематический отбор
   - **Кандидаты $J/\psi \to \mu^+\mu^-$:**
     - $p_T^\mu > 4$ ГэВ, $|\eta^\mu| < 2.3$
   - **Кандидаты D_s^+:**
     - $p_T^{\rm trk} > 1$ ГэВ, $|\eta^{\rm trk}| < 2.5$
     - $0 < L_{xy}(D_s^+) < 10$ мм – по отношению к вершине B_c^+
     - $m(K^+K^-) \pm 7$ МэВ вокруг номинальной массы ϕ-мезона, $1.93 < m(K^+K^-\pi^+) < 2.01$ ГэВ
   - **Кандидаты B_c^+:**
     - $\chi^2/\text{n.d.f.}(B_c^+) < 2$ (n.d.f. $= 8$)
     - $L_{xy}(B_c^+) > 0.3$ мм, $|d_0^{\rm PV}(B_c^+)/\sigma_{d_0^{\rm PV}}(B_c^+)| < 5$ и $|z_0^{\rm PV}(B_c^+)/\sigma_{z_0^{\rm PV}}(B_c^+)| < 5$ по отношению к PV
     - $p_T(B_c^+)/\sum p_T(\text{trk}) > 0.1$
     - Область $5.34 < m(J/\psi\phi) < 5.40$ ГэВ исключена для подавления фона от распада $B_s^0 \to J/\psi\phi$
     - Кинематическая область измерения: $p_T(B_c^+) > 15$ ГэВ и $|\eta(B_c^+)| < 2.0$



2. BDT
   - Сигнал – MC-наборы
   - Фон – данные $m(J/\psi D_s^+) \in [5680, 5900] \cup [6400, 6800]$ МэВ
   - Входные переменные:
     $p_T(D_s^+)$, $L_{xy}(D_s^+)$, $\cos\theta^*(\pi^+)$, $|\cos^3\theta'(K^+)|$, $\cos\theta^*(D_s^+)$, $\cos\theta'(\pi^+)$
   - Эффективность отбора 81% (BDT output > 0.04)

$B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+}$: фит

- *Набор 1*: стандартные димюонные или трехмюонные триггеры без требований к дополнительным ID трекам $\Longrightarrow$ измерение $R_{D_s^+/\pi^+}$, $R_{D_s^{*+}/\pi^+}$
- *Набор 2*: только специальные $B_s^0 \to \mu^+\mu^-\phi$ триггеры $\Longrightarrow$ дополнительная статистика для измерения $R_{D_s^{*+}/D_s^+}$ и $\Gamma_{\pm\pm}$: *Набор 1*+*Набор 2*
- Одновременный 2D фит распределений $m(J/\psi D_s^+)$ и $|\cos\theta'(\mu^+)|$ методом небинированного максимального правдоподобия ($\theta'(\mu^+)$ - угол между импульсами μ^+ и D_s^+ в системе покоя $\mu^+\mu^-$-пары)

Массовая часть

- Сигнал $B_c^+ \to J/\psi D_s^+$ – модифицированная функция Гаусса

$$G_{mod} \propto \exp\left(-0.5 \times t^{1+1/(1+t/2)}\right),$$

$$t = |m(J/\psi D_s^+) - m_{B_c^+}|/\sigma_{B_c^+}$$

- Сигналы $B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+}$, компоненты $A_{\pm\pm}$ и A_{00} – шаблоны (темплейты) из MC
- Комбинаторный фон – экспоненциальная функция

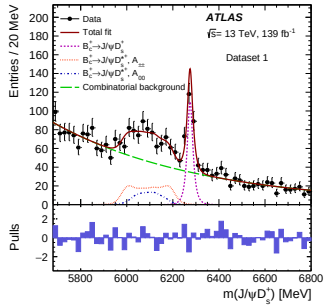
Угловая часть

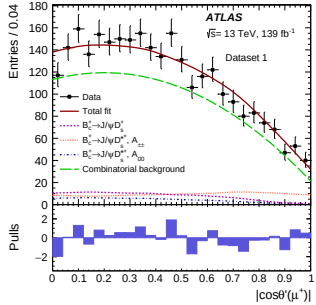
- Сигналы $B_c^+ \to J/\psi D_s^+$, $B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+}$, компоненты $A_{\pm\pm}$ и A_{00} – шаблоны из MC для учета детекторных эффектов
- Фон – полином 2й степени

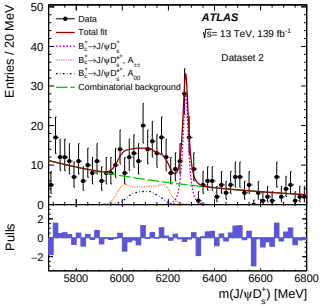
- Свободные параметры (14 шт.): $m_{B_c^+}$, $\sigma_{B_c^+}$, $r_{D_s^{*+}/D_s^+}$, $f_{\pm\pm}$, $N^{\mathrm{DS1}}_{B_c^+\to J/\psi D_s^+}$ $N^{\mathrm{DS2}}_{B_c^+\to J/\psi D_s^+}$, параметры фона

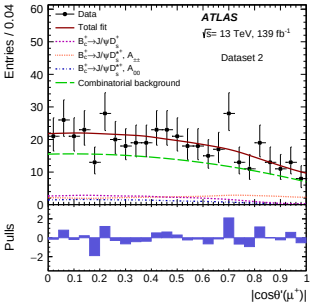
$B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+}$: сигнал

Параметр	Значение
$m_{B_c^+}$ [МэВ]	6274.8 ± 1.4
$\sigma_{B_c^+}$ [МэВ]	11.5 ± 1.5
$r_{D_s^{*+}/D_s^+}$	1.76 ± 0.22
$f_{\pm\pm}$	0.70 ± 0.10
$N^{\mathrm{DS1}}_{B_c^+ \to J/\psi D_s^+}$	193 ± 20
$N^{\mathrm{DS2}}_{B_c^+ \to J/\psi D_s^+}$	49 ± 10
$N^{\mathrm{DS1}}_{B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+}}$	338 ± 32
$N^{\mathrm{DS1\&2}}_{B_c^+ \to J/\psi D_s^+}$	241 ± 28
$N^{\mathrm{DS1\&2}}_{B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+}}$	424 ± 46



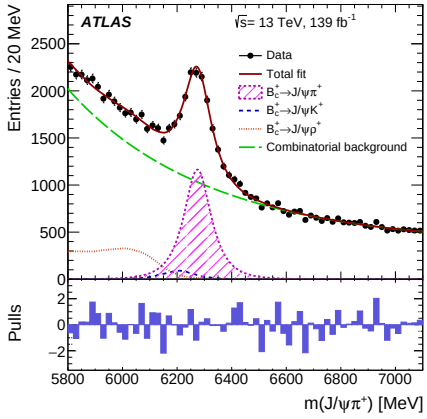






$B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+}$: нормировочный распад $B_c^+ \to J/\psi\pi^+$

- Отбор событий
  - общий с $B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+}$:
    - $p_T(\mu)$, $|\eta(\mu)|$, $|\eta(\mathrm{trk})|$
    - $p_T(B_c^+)/\sum p_T(\mathrm{trk})$, $L_{xy}(B_c^+)$
  - дополнительный
    - $|d_0^{PV}(B_c^+)/\sigma_{d_0^{PV}}(B_c^+)| < 3$, $|z_0^{PV}(B_c^+)/\sigma_{z_0^{PV}}(B_c^+)| < 3$
    - $\chi^2/n.d.f.(B_c^+) < 1.8$
    - $p_T(\pi^+) > 3.5$ ГэВ
    - Вето: π^+-треки исключаются, если они идентифицированы как *low-p_T* мюоны
- Фит
  - Signal: модифицированная функция Гаусса
  - $B_c^+ \to J/\psi K^+$: MC темплейт (выход по отношению к сигналу фиксирован на отношение $\mathcal{B} \times$ efficiency ratio)
  - Комбинаторный фон: 2-параметрическая экспонента
  - PRD:
    - Доминирующий вклад $B_c^+ \to J/\psi\rho^+$
    - Две компоненты $A_{\pm\pm}$ и A_{00} с разной формой в спектре инв. масс
    - Сумма 2-х MC темплейтов f_{00} свободный параметр



Параметр	Значение
$m_{B_c^+}$ [МэВ]	6274.5 ± 1.5
$\sigma_{B_c^+}$ [МэВ]	47.5 ± 2.5
$N_{B_c^+ \to J/\psi\pi^+}$	8440^{+550}_{-470}

$B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+}$: систематические неопределенности

Источник	Погрешность [%]			
	$R_{D_s^+/\pi^+}$	$R_{D_s^{*+}/\pi^+}$	$R_{D_s^{*+}/D_s^+}$	$\Gamma_{\pm\pm}/\Gamma$
Моделированный спектр $p_T(B_c^+)$	1.5	1.9	0.4	0.1
Моделированный спектр $\lvert\eta(B_c^+)\rvert$	0.7	0.7	0.1	0.2
Время жизни B_c^+-мезона	0.1	< 0.1	–	–
Время жизни D_s^+-мезона	0.4	0.4	–	–
Эффективность трекинга	1.0	1.0	< 0.1	< 0.1
Pile-up эффекты	1.0	1.0	–	–
Эффективность отбора $\chi^2/\text{n.d.f.}$	3.2	3.2	–	–
Эффективность отбора прицельного параметра	0.2	0.2	–	–
Эффективность отбора BDT	1.3	1.3	–	–
Эффективность триггера	0.6	0.6	–	–
Распады D_s^+-мезона	1.6	1.6	–	–
$B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+}$ сигнальный фит:				
Моделирование массы сигнала D_s^+	1.8	0.5	1.3	0.8
Моделирование массы сигнала D_s^{*+}	0.6	1.2	1.7	2.7
Моделирование угловых распределений сигнала	0.4	< 0.1	0.4	0.6
Моделирование массы фона	6.0	9.0	3.2	1.0
Моделирование угловых распределений фона	0.9	1.3	2.1	2.4
Триггера $B_s^0 \to \mu^+\mu^-\phi$	0.8	0.5	1.3	4.0
Относительная парциальная ширина распада D_s^{*+}	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.7
$B_c^+ \to J/\psi\pi^+$ сигнальный фит:				
Моделирование сигнала	4.2	4.2	–	–
Моделирование PRD/comb. компоненты фона	5.8	5.8	–	–
Моделирование CKM-suppr. компоненты фона	1.0	1.0	–	–
Статистика наборов Монте-Карло	1.5	1.5	1.7	1.5
Итого	10.7	12.6	4.9	5.8
$\mathcal{B}(D_s^+ \to \phi(K^+K^-)\pi^+)$	5.9	5.9	–	–

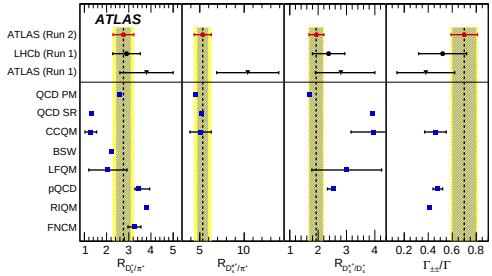
$B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+}$: результаты

$$R_{D_s^+/\pi^+} = 2.76 \pm 0.33(\text{стат.}) \pm 0.29(\text{сист.}) \pm 0.16$$

$$R_{D_s^{*+}/\pi^+} = 5.33 \pm 0.61(\text{стат.}) \pm 0.67(\text{сист.}) \pm 0.32$$

$$R_{D_s^{*+}/D_s^+} = 1.93 \pm 0.24(\text{стат.}) \pm 0.09(\text{сист.})$$

$$\Gamma_{\pm\pm} = 0.70 \pm 0.10(\text{стат.}) \pm 0.04(\text{сист.})$$



- Все результаты согласуются с более ранними измерениями ATLAS and LHCb.
  - $R_{D_s^{*+}/D_s^+}$ и $\Gamma_{\pm\pm}$ согласуются с последними результатами LHCb Run1 + Run2 + Run 3
- $R_{D_s^{*+}/\pi^+}$ хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями
- Предсказания для $R_{D_s^+/\pi^+}$ и $R_{D_s^{*+}/D_s^+}$ систематически отклоняются от экспериментальных данных, за исключением модели QCD PM (PRD 61 (2000) 034012W), которая демонстрирует идеальное согласие
- $\Gamma_{\pm\pm}$ согласуется с наивной оценкой 2/3, основанной на подсчете спиновых состояний, и превышает теоретические предсказания
- Точность измерения $R_{D_s^+/\pi^+}$ и $R_{D_s^{*+}/\pi^+}$ превосходит точность всех предыдущих исследований этих распадов

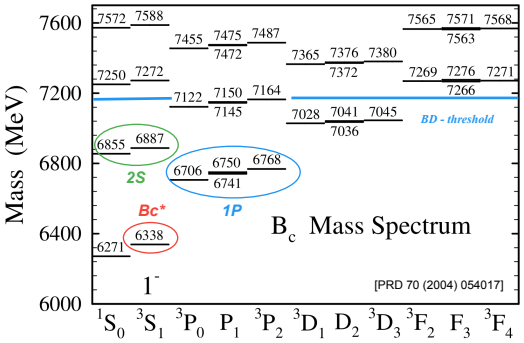
Поиск B_c^{*+}: мотивация

- Наиболее легкое возбужденное состояние B_c^{*+}-мезон, (1^3S_1), характеризуется большим сечением рождения, однако представляет значительную сложность для экспериментального обнаружения.
- $M(B_c^{*+}) - M(B_c^+) \sim 50$–$70$ МэВ $\Longrightarrow$ регистрация очень мягкого фотона из распада $B_c^{*+} \to B_c^+\gamma$
- Эффективный порог по максимальному поперечному импульсу фотона:

$$p_{\mathrm{T}}^{\max}(\gamma) \approx \frac{\Delta M}{M_{B_c^*}} \left(\sqrt{M_{B_c^*}^2 + p_{\mathrm{T}}^2} + p_{\mathrm{T}}\right)$$

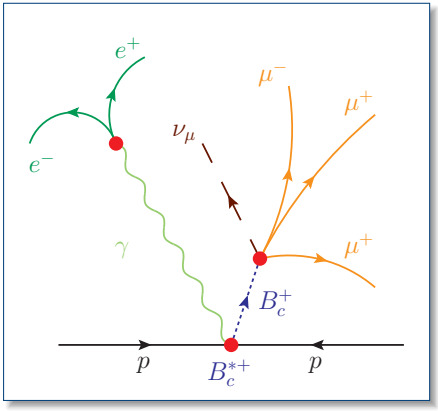
$$\approx \frac{2 p_{\mathrm{T}} \Delta M}{M_{B_c^*}} = 0.02 \times p_{\mathrm{T}}$$

- Конверсия $\gamma \to e^+e^-$: порог 500 МэВ $\Longrightarrow$ эффективный вклад вносят только события с $p_{\mathrm{T}}(B_c^{*+}) \gtrsim 50$ ГэВ



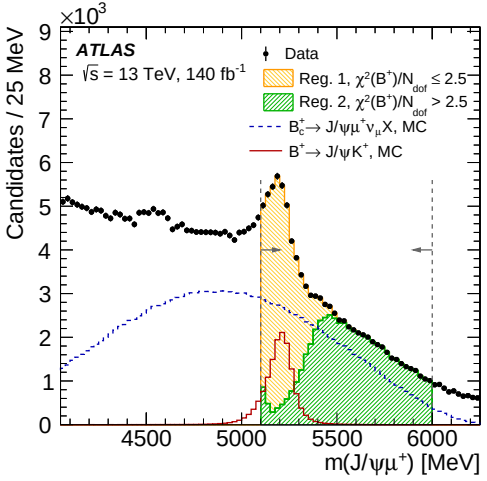
Поиск B_c^{*+}: стратегия анализа

- Полный набор данных второго сеанса работы LHC ($\sqrt{s} = 13$ ТэВ, $\mathcal{L} = 140$ фб$^{-1}$)
- Поиск радиационного перехода $B_c^{*+} \to B_c^+\gamma$ ($\mathcal{B} \approx 100\%$)
  1. Основное состояние B_c^+ реконструированно через полулептонный распад $B_c^+ \to J/\psi\mu^+\nu_\mu X$:
     - Вероятность распада ($\mathcal{B}$) в 20 раз больше по сравнению с $B_c^+ \to J/\psi\pi^+$
  2. Мягкий конверсионный фотон реконструируются по двум разноименно заряженным трекам во внутреннем детекторе (ID) из вершины с большим радиальным смещением
     - Единая вторичная вершина распада ($\gamma \to e^+e^-$)
     - Алгоритмы реконструкции треков: стандартный ($p_{\mathrm{T}}^{\mathrm{trk}} > 500$ МэВ) + специальный Low-p_{T} ($p_{\mathrm{T}}^{\mathrm{trk}} > 100$ МэВ)
- Сигнал B_c^{*+}-мезона может быть зарегистрирован в распределении $\Delta m = m(J/\psi\mu^+\gamma) - m(J/\psi\mu^+)$
- Валидационный канал $B^{*+} \to B^+(J/\psi K^+)\gamma$ (данные 2015–2016 гг., $\mathcal{L} = 36.2$ фб$^{-1}$)
  - $p_{\mathrm{T}}(\gamma)$ находится практически в том же диапазоне, что и для сигнала от B_c^{*+}: $\Delta m(B^{*+}) \sim 45$ МэВ



Поиск B_c^{*+}: реконструкция распада $B_c^+ \to J/\psi\mu^+\nu_\mu X$

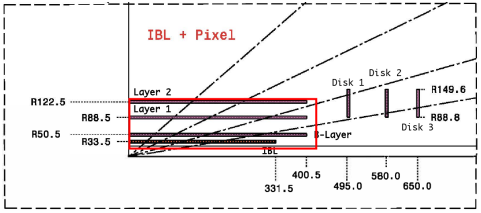
- Кандидат B_c^+ = трехмюонная вершина с ограничением по массе J/ψ для пары $\mu^+\mu^-$ ($J/\psi \to \mu^+\mu^-$)
- Частичная реконструкция → сигнал распределен по $m(J/\psi\mu^+)$ в области ∼3–6 ГэВ без пиков
- Основные критерии отбора:
  - $\chi^2/\text{n.d.f.} < 2$ ($\text{n.d.f.} = 4$), $\chi^2(\mu_3) < 4$ – вклад третьего трека в $\chi^2(J/\psi\mu^+)$;
  - $p_T > 25$ ГэВ, $|\eta| < 2.4$, $L_{xy} > 0$ мм;
  - $p_T(B_c^+)/\sum p_T(\text{track}) > 0.2$;
- Массовая область ниже 5.1 ГэВ – большой фон от распадов $B \to J/\psi X$ (ложная идентификация мюонов)
- Выше вносит вклад только распад $B^+ \to J/\psi K^+$ (пик ∼ 5.2 ГэВ)
- Интервал $5.1 < m(J/\psi\mu^+) < 6.0$ ГэВ → 2 непересекающиеся массовые области на основе модифицированного фита $\chi^2(B^+)/\text{n.d.f.}$ – ограничения на массу пары $\mu^+\mu^-$, массу триплета, указание на первичную вершину
  - Массовая область 1: ($\chi^2(B^+)/\text{n.d.f.} \leqslant 2.5$): B_c^+, $B^+ \to J/\psi K^+$, комбинаторный фон;
  - Массовая область 2: ($\chi^2(B^+)/\text{n.d.f.} > 2.5$): B_c^+, комбинаторный фон;

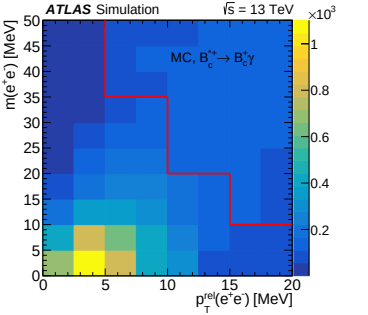


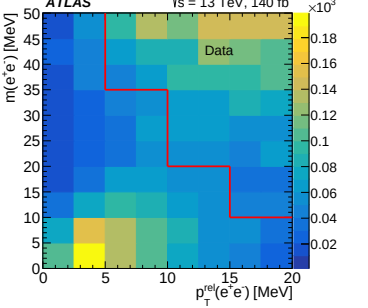
Геометрические и кинематические ограничения (аксептанс):
$p_T(\mu_{1,2,3}) > 4, 4, 3$ ГэВ,
$|\eta(\mu_{1,2,3})| < 2.4, 2.4, 2.5$

Поиск B_c^{*+}: реконструкция конверсионных фотонов $\gamma \to e^+e^-$

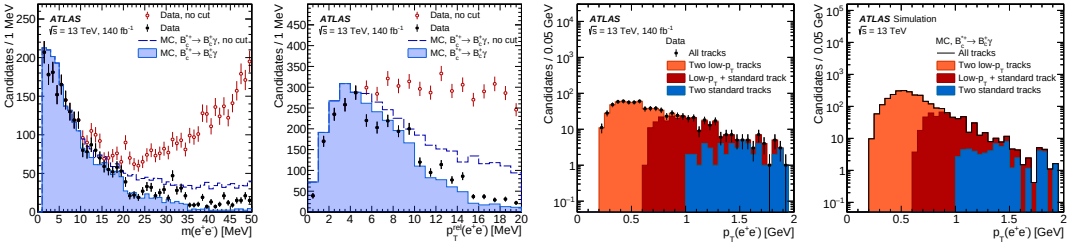
- Двухтрековые вершины внутри объема вакуумной камеры и пиксельного баррельного слоя
- Специальный алгоритм трекинга частиц с малыми p_T (low-p_T) для предварительно отобранных событий (B_c^+):
  - $p_{T_{trk}} > 100$ МэВ, $\chi^2(e^+e^-) < 3$
  - комбинированный 2D отбор [$m(e^+e^-)$, p_T^{rel} (*)]
    - (*) p_T в плоскости $x-y$ относительно направления от PV к вершине конверсии
- Кандидаты (e^+e^-) объединяются с B_c^+ для формирования B_c^{*+}
  - $m(J/\psi K^+e^+e^-) < 6050$ МэВ – для подавления $B_c^+ \to J/\psi\pi^+(K^+)$ с фотонами FSR



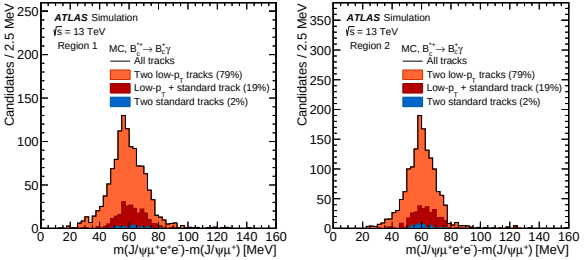




Поиск B_c^{*+}: реконструкция конверсионных фотонов $\gamma \to e^+e^-$

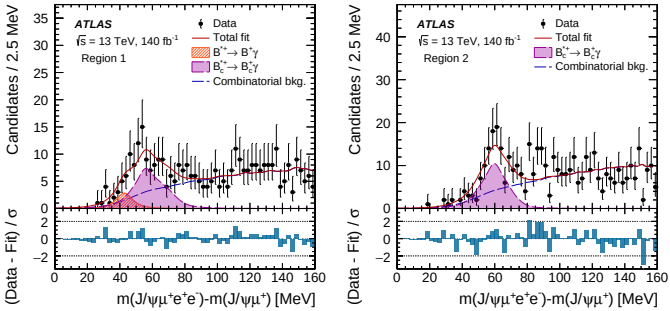


Отобранные кандидаты $\gamma \to e^+e^-$ из Массовой области 1 и Массовой области 2 используются для построения распределения $\Delta m(B_c^{*+}) = m(J/\psi\mu^+\gamma) - m(J/\psi\mu^+)$:



Сигнал B_c^{*+}

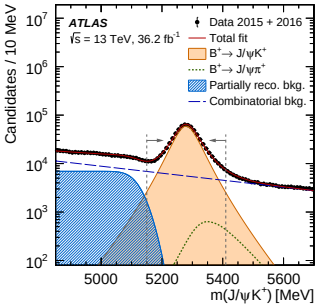
- Одновременный фит распределений Δm методом небинированного максимального правдоподобия – Массовая область 1 и 2:
- Сигнал:
  - MC-шаблоны (KDE) сдвигаются и масштабируются $\propto \Delta m(B_c^{*+})$
  - Отношение $(N^{R1}_{B_c^{*+}}/N^{R2}_{B_c^{*+}})$ зафиксировано на значение из MC
- Фон $B^{*+} \to B^+\gamma$, Массовая область 1:
  - модифицированная функция Гаусса, параметры $\Delta m^{\text{rec}}_{B^{*+}}$ и $\sigma_{B^{*+}}$ зафиксированы на значение из MC ($\Delta m^{\text{true}}_{B^{*+}} \approx 45$ МэВ)
- Комбинаторный фон:
  - Метод смешивания (event mixing): B_c^+ и γ из разных событий
  - Поправки на систематическое искажение спектра $p_{\text{T}}(\gamma)$
  - Нормировка – свободный параметр

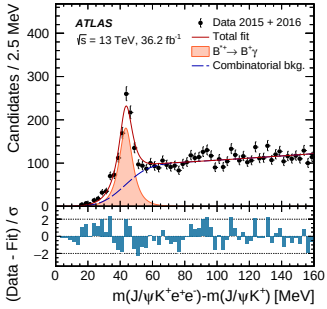


Параметр	Значение
$\Delta m_{B_c^{*+}}$ [МэВ]	64.5 ± 1.4
$N_{B_c^{*+}}$	163 ± 19
$N_{B^{*+}}$	17 ± 8

Поиск B_c^{*+}: валидационный распад $B^{*+} \to B^+(J/\psi K^+)\gamma$

- $B^+ \to J/\psi K^+$:
  - Набор данных 2015-2016 гг. (36.2 фб$^{-1}$)
  - Отбор, наиболее близкий к $B_c^+ \to J/\psi \mu^+ \nu_\mu X$ за исключением 3-го трека: ID с массовой гипотезой K^+
  - $\sim$ 600 тыс. реконструированных кандидатов $B^+ \to J/\psi K^+$
- $B^{*+} \to B^+\gamma$:
  - $5150 < m(J/\psi K^+) < 5410$ МэВ
  - Аналогичная реконструкция фотонов, как для $B_c^{*+} \to B_c^+\gamma$
  - Распределение $\Delta m = m(J/\psi K^+ e^+ e^-) - m(J/\psi K^+)$
  - Фит:
    - сигнал: модифицированная функция Гаусса ($\Delta m_{B^{*+}}$ & σ свободные параметры)
    - комбинаторный фон: $f_{BG}(x') = (\mathrm{erf}[(x'-a)/b]+1) \times e^{cx'}$
- Практически идентичная процедура анализа и отбора была применена к возбужденному состоянию B^{*+}, при этом значимых систематических смещений обнаружено не было



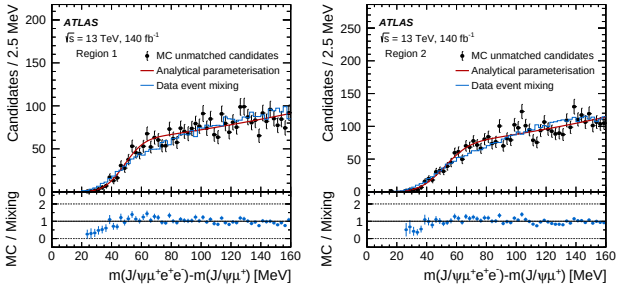


Поиск B_c^{*+}: систематические неопределенности

Источник	Погрешность [МэВ]
Моделирование вещества, а также масштаба и разрешения импульса фотонов	$^{+0.44}_{-1.13}$
Моделирование рождения B_c^+	± 0.19
Моделирование распада $B_c^+ \to J/\psi\mu^+\nu_\mu X$	± 0.05
Моделирование отношения $N^{R1}_{B_c^{*+}}/N^{R2}_{B_c^{*+}}$	± 0.12
Реконструкция мюонов и триггерный отбор	± 0.16
Моделирование формы фона	± 0.79
Итого	$^{+0.95}_{-1.41}$

- Вариация распределения вещества в объеме трекера в MC
- Моделирование масштаба и разрешения импульса фотонов
  - использовался валидационный канал $B^{*+} \to B^+(J/\psi K^+)\gamma$
  - систематика из-за расхождения данных и MC
- Коррелированные эффекты $\to$ максимальный разброс

- Вариация процедуры смешивания событий
- Форма распределения из MC для несовпавших кандидатов B_c^{*+}
- Остальные источники – исследование на псевдоданных (toy study), сгенерированных на основе альтернативных шаблонов



Поиск B_c^{*+}: результаты

- В данных ATLAS Run-2 обнаружено новое состояние, распадающееся на B_c^+ и фотон
  - Статистическая значимость сигнала превышает 8σ (с учетом всех систематических вариаций)
- Измеренное значение разности масс между новым состоянием и основным состоянием B_c^+-мезона составляет

$$\Delta m(B_c^{*+}) = 64.5 \pm 1.4(\text{стат.}) \, {}^{+1.0}_{-1.4}(\text{сист.}) \text{ МэВ}$$

- Это соответствует массе наблюдаемого состояния, равной

$$m(B_c^{*+}) = 6338.96 \pm 1.4(\text{стат.}) \, {}^{+1.0}_{-1.4}(\text{сист.}) \pm 0.3(m_{B_c^+}) \text{ МэВ}$$

- Согласуется с теоретическими ожиданиями для легчайшего возбужденного состояния ($\bar{b}c$) мезона B_c^{*+}, которые в основном лежат в пределах 50–70 МэВ
- Измеренное значение $\Delta m(B_c^{*+})$ находится чуть выше недавних точных предсказаний решеточной КХД, которые лежат ниже 60 МэВ
  - ➢ HPQCD: Phys. Rev. Lett. 104(2010), 022001, Phys. Rev. D 86, 094510
  - ➢ Mathur et al. Phys. Rev. Lett. 121, 202002
- Это открытие стало возможным благодаря
  - инновационному использованию моды распада $B_c^+ \to J/\psi\mu^+\nu_\mu X$ для исследований спектроскопии системы ($\bar{b}c$)
  - специальному трекингу частиц с малыми p_T для реконструкции конверсии мягких фотонов в предварительно отобранной выборке

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработан алгоритм для измерения эффективностей одно- и димюонных триггеров B-физики в области малых поперечных импульсов в наборе данных эксперимента ATLAS сеанса 2 в 2015–2016 гг.
2. Оптимизирована методика реконструкции и отбора сигнальных распадов $B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+}$ в данных эксперимента ATLAS сеанса 2. Для эффективного выделения сигнальных распадов использованы алгоритмы многомерного анализа на базе деревьев решений с градиентным бустом (BDT).
3. Получены прецизионные результаты измерений относительных парциальных ширин для каналов распада $B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+}$, а также экспериментально установлена величина (доля) поперечной поляризации для конечного состояния с векторным очарованно-странным мезоном (D_s^{*+}) в эксперименте ATLAS (сеанс 2).
4. Разработана методика реконструкции мягких конверсионных фотонов в условиях эксперимента с большой светимостью.
5. Реализован алгоритм восстановления распада $B_c^{*+} \to B_c^+\gamma$, впервые для поиска возбужденного состояния была использована полулептонная мода распада B_c^+-мезона.
6. Проведено первое в мире наблюдение легчайшего векторного $\bar{b}c$ состояния, B_c^{*+}-мезона, в данных эксперимента ATLAS в сеансе 2, измерена его масса.

Публикации

1. Aad G. [et al.] «Performance of the ATLAS muon triggers in Run 2» // Journal of Instrumentation. – 2020. – Vol. 15, no. 09. – Art. P09015. – arXiv: 2004.13447 [physics.ins-det].

2. Aad G. [et al.] «Study of $B_c^+ \to J/\psi D_s^+$ and $B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+}$ decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector» // Journal of High Energy Physics. – 2022. – Vol. 2022, no. 08. – Art. 087. – arXiv: 2203.01808 [hep-ex].

3. Aad G. [et al.] «Observation of a B_c^{*+} meson with the ATLAS detector» // Phys. Rev. Lett. – 2026. – Vol. 137, no. 14. – P. 141901 – arXiv: 2605.16228 [hep-ex].

4. Lyubushkina T. «ATLAS Results on B_c^+ Production and Decays» // Physics of Atomic Nuclei. — 2023. — Vol. 86, no. 5. — P. 747–751. / T. Lyubushkina.

5. Lyubushkina T. «ATLAS results on charmonium production and B_c^+ meson production and decays» // Revista Mexicana de Física Suplemento. — 2022. — Vol. 3, no. 3. — Art. 0308054. / T. Lyubushkina.

6. Lyubushkina T. «ATLAS results on charmonium production and B_c^+ meson production and decays» // PoS. – 2022 – Vol. EPS-HEP2021 – P. 548. / T. Lyubushkina.

Апробация результатов исследования

1. «European Physical Society conference on high energy physics 2021» (EPS-HEP 2021), 26 – 30 июля, 2021 г., онлайн-конференция.

2. «19th International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure» (HADRON 2021), 26 – 31 июля, 2021 г., онлайн-конференция.

3. «148th Large Hadron Collider Experiments Committee Meeting - OPEN Session» (148th LHCC 2021), 17 – 18 ноября, 2021 г., онлайн-конференция.

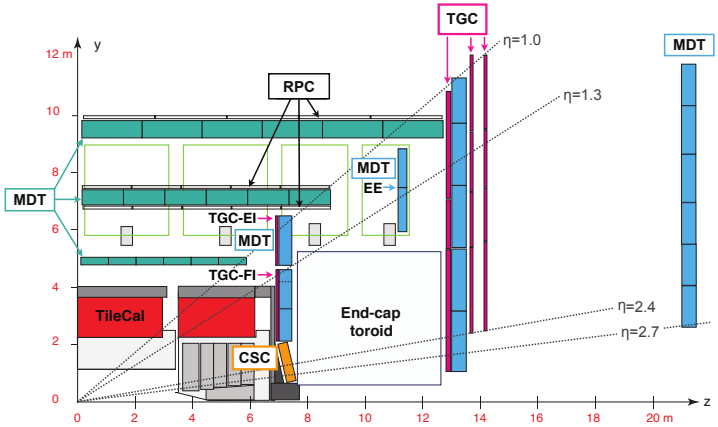
4. «6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics» (ICPPA-2022), 29 ноября – 2 декабря 2022 г., Москва, Россия.

5. «8th International Conference on Particle Physics and Astrophysics», (ICPPA-2026), 27 – 30 октября 2026 г., Москва, Россия.

Спасибо за внимание!

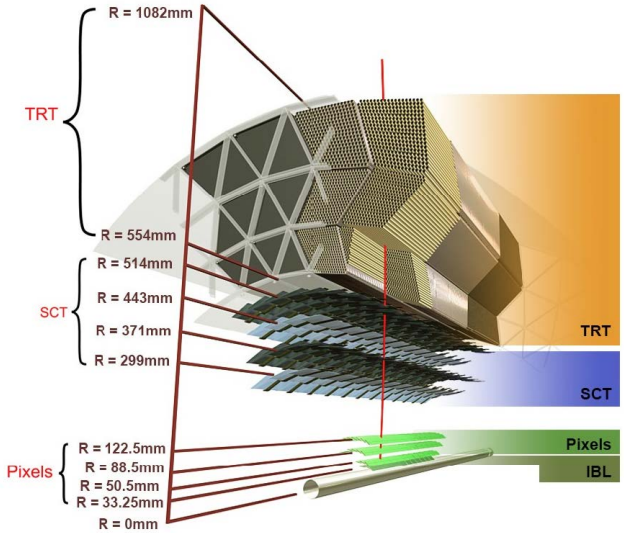
Дополнительные слайды

Мюонный спектрометр



- Мониторируемые дрейфовые трубки: Monitored Drift Tube – MDT
- Катодно-стриповые камеры: Cathode-Strip Chambers – CSC
- Камеры с резистивными пластинами: Resistive-Plate Chambers – RPCs
- Узкозазорные камеры: Thin-Gap-Chambers – TGC

Внутренний трекер



- Insertable B-Layer, IBL
- Пиксельный детектор (Pixel B-Layer)
- Полупроводниковый микростриповый детектор (SCT)
- Трекер переходного излучения (TRT)

$B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+}$: список переменных

- $\cos\theta^*(\pi^+)$: угол между импульсом пиона в системе покоя $K^+K^-\pi^+$ и моментом $K^+K^-\pi^+$ в лабораторной системе.
- $|\cos^3\theta'(K^+)|$: угол между импульсами каона и пиона в системе покоя K^+K^-.
- $\cos\theta^*(D_s^+)$: угол между импульсом кандидата D_s^+ в системе покоя B_c^+, и направлением движения B_c^+ кандидата в лабораторной системе.
- $\cos\theta'(\pi^+)$: угол между импульсом J/ψ кандидата и импульсом пиона в системе покоя $K^+K^-\pi^+$.
- $\theta'(\mu^+)$ - спиральный угол, определяемый как угол между импульсами μ^+ и D_s^+-кандидата в системе покоя $\mu^+\mu^-$-пары.

Триггерный отбор

- для событий, прошедших предварительный отбор анализа, выполняется сортировка всех триггерных цепочек по количеству зарегистрированных ими событий;
- первая цепочка, собравшая наибольшее число событий, включается в список; данные события считаются отобранными и исключаются из оставшегося набора данных;
- предыдущие два шага итеративно повторяются для событий, оставшихся в выборке;
- если на очередном шаге итерации цепочка с наибольшим числом событий не имеет под собой физического обоснования (например, некоторые варианты триггера bBmumux, способные исказить массовый спектр, или триггеры, отличные от мюонных) либо не может быть добавлена (например, если она запускается тем же элементом триггера первого уровня L1), то вместо неё используется вторая или третья по счету цепочка;
- итерации продолжаются до тех пор, пока включение последующих цепочек не начнет приводить к пренебрежимо малому приросту числа событий.

$$w = \frac{1}{\mathcal{L}} \sum_j \mathcal{L}_j \left(1 - \prod_i \left(1 - \frac{1}{P_j^i} \right) \right), \tag{1}$$

где P_j^i – коэффициент подавления частоты триггера i в блоке светимости j, $\mathcal{L}_j$ – светимость блока светимости j, а $\mathcal{L}$ – полная светимость всех рассматриваемых блоков.

Ratios calculation

$$R_{D_s^{(*)+}/\pi^+} = \frac{\mathcal{B}(B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+})}{\mathcal{B}(B_c^+ \to J/\psi \pi^+)} = \frac{N^{\mathrm{DS1}}_{B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+}}}{N_{B_c^+ \to J/\psi \pi^+}} \times \frac{\varepsilon_{B_c^+ \to J/\psi \pi^+}}{\varepsilon^{\mathrm{DS1}}_{B_c^+ \to J/\psi D_s^{(*)+}}} \times \frac{1}{\mathcal{B}(D_s^+ \to \phi(K^+K^-)\pi^+)} \quad (2)$$

$\mathcal{B}(D_s^+ \to \phi(K^+K^-)\pi^+)$ taken as $m(K^+K^-)$-dependent, using CLEO measurement, recalculated to ± 7 MeV

$$R_{D_s^{*+}/D_s^+} = \frac{\mathcal{B}(B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+})}{\mathcal{B}(B_c^+ \to J/\psi D_s^+)} = \frac{N^{\mathrm{DS1\&2}}_{B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+}}}{N^{\mathrm{DS1\&2}}_{B_c^+ \to J/\psi D_s^+}} \times \frac{\varepsilon^{\mathrm{DS1\&2}}_{B_c^+ \to J/\psi D_s^+}}{\varepsilon^{\mathrm{DS1\&2}}_{B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+}}} = r_{D_s^{*+}/D_s^+} \times \frac{\varepsilon^{\mathrm{DS1\&2}}_{B_c^+ \to J/\psi D_s^+}}{\varepsilon^{\mathrm{DS1\&2}}_{B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+}}}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+}} = \frac{1}{f_{\pm\pm}/\varepsilon_{B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+}, A_{++}} + (1 - f_{\pm\pm})/\varepsilon_{B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+}, A_{\mathbf{00}}}}, \quad (4)$$

$$\Gamma_{\pm\pm} = f_{\pm\pm} \times \frac{\varepsilon^{\mathrm{DS1\&2}}_{B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+}}}{\varepsilon^{\mathrm{DS1\&2}}_{B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+}, A_{++}}}. \quad (5)$$

Mode	$\epsilon^{\mathrm{DS1}}_{B_c^+ \to J/\psi X}$ [%]	$\epsilon^{\mathrm{DS1\&2}}_{B_c^+ \to J/\psi X}$ [%]
$B_c^+ \to J/\psi D_s^+$	0.971 ± 0.012	1.163 ± 0.013
$B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+}$, A_{00}	0.916 ± 0.012	1.088 ± 0.012
$B_c^+ \to J/\psi D_s^{*+}$, A_{++}	0.868 ± 0.010	1.049 ± 0.011
$B_c^+ \to J/\psi \pi^+$	2.169 ± 0.018	–

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

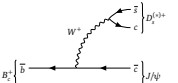
- Измеренные отношения парциальных ширин распадов и долю поперечной поляризации можно сравнить с соответствующими величинами для легких B-мезонов.

$$R_{D_s^+/\pi^+} \approx \frac{\Gamma(B \to \bar{D}^* D_s^+)}{\Gamma(B \to \bar{D}^* \pi^+)}$$

$$R_{D_s^{*+}/\pi^+} \approx \frac{\Gamma(B \to \bar{D}^* D_s^{*+})}{\Gamma(B \to \bar{D}^* \pi^+)}$$

$$R_{D_s^{*+}/D_s^+} \approx \frac{\Gamma(B \to \bar{D}^* D_s^+)}{\Gamma(B \to \bar{D}^* D_s^{*+})}$$

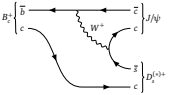
В предположении – доминирует разрешенная по цвету спектаторная диаграмма



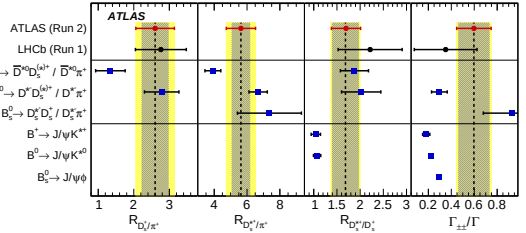
- B обозначает B^0, B^+, или B_s^0 и $\bar{D}^* - \bar{D}^{*0}$, D^{*-} или D_s^{*-}

$$R_{D_s^{*+}/D_s^+} \sim \frac{\Gamma(B \to J/\psi K^*)}{\Gamma(B \to J/\psi K)}$$

В предположении – доминирует подавленная по цвету спектаторная диаграмма

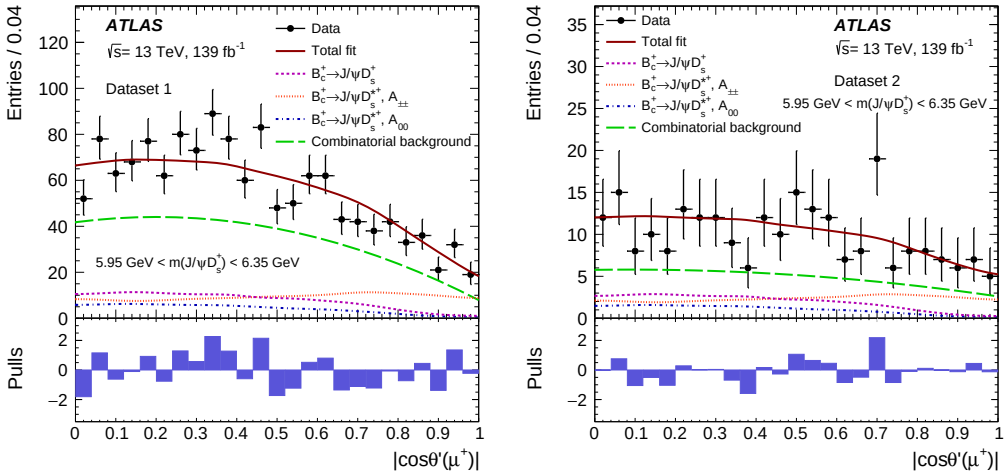


- B обозначает B^+ или B^0 и $K^{(*)} - K^{(*)+}$ или $K^{(*)0}$



- Подтверждает предположение о том, что в амплитудах распада доминирует разрешенная по цвету спектаторная диаграмма

5900 МэВ $< m(J/\psi D_s^+) <$ 6350 МэВ:



- A_{00} (нулевая спиральность) – $\theta' \sim \sin^2\theta'$
- $A_{\pm\pm}$ (спиральность ± 1) – $\theta' \sim 1 + \cos^2\theta'$

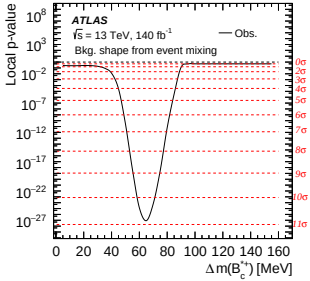
Поиск B_c^{*+}: статистическая значимость

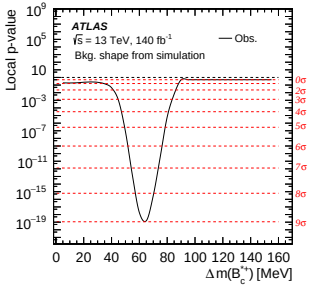
- Сканирование значений p-value как функции $\Delta m(B_c^{*+})$ выполняется с помощью `AsymptoticCalculator` из пакета `RooStats` (Look-elsewhere effect [1], Eur.Phys.J.C 70 (2010) 525, report by Eilam Gross)

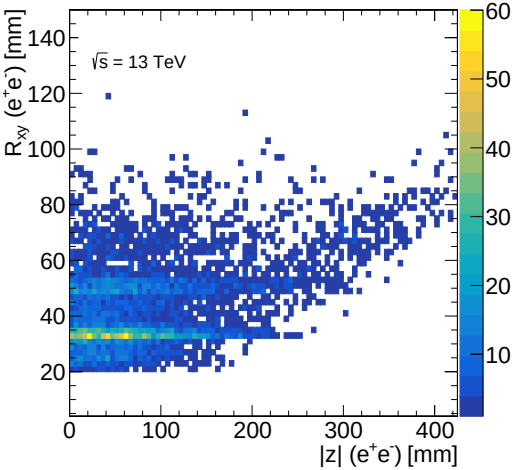
  [1] L. «Lista Statistical Methods for Data Analysis» – Springer, 2016
- Локальная статистическая значимость может быть рассчитана на основе p-value в точке минимума ($Z_0 \sim 10.9\sigma$).
- Глобальное значение p-value:

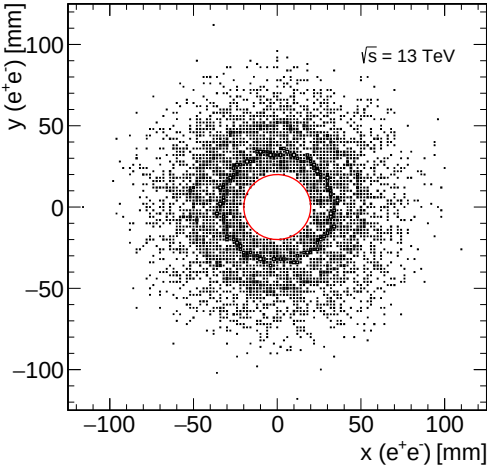
$$p_{\text{global}} \backsimeq p_{\text{local}} + \langle N_{u_0} \rangle \exp\left(\frac{u_0 - u}{2}\right),$$

- $\langle N_{u_0} \rangle$ число пересечений уровня u_0 ($u_0 = 0$, $p = 0.5$) снизу вверх (upcrossings);
- $u = Z_0^2$
- Центральный фит: $P_{\text{local}} \sim 8.5 \cdot 10^{-28}$, $Z_0 \sim 10.9\sigma$, $n_{u_0} = 1 \Longrightarrow Z_{\text{global}} \sim 10.5\sigma$
- Альтернативная модель комбинаторного фона: $P_{\text{local}} \sim 1.5 \cdot 10^{-19}$, $Z_0 \sim 9.0\sigma$, $n_{u_0} = 1 \Longrightarrow Z_{\text{global}} \sim 8.5\sigma$






√s = 13 TeV
R_{xy} (e^+e^-) [mm]
|z| (e^+e^-) [mm]
0
100
200
300
400
20
40
60
80
100
120
140
10
20
30
40
50
60


√s = 13 TeV
y (e^+e^-) [mm]
x (e^+e^-) [mm]
−100
−50
0
50
100