



Прецизионные измерения характеристик $B_{(s)}$ -мезонов и их распадов в эксперименте ATLAS

Маевский Артём Сергеевич

МГУ имени М. В. Ломоносова
физический факультет

12 декабря 2016
Семинар Отдела физики высоких энергий ИЯИ РАН

Доклад по материалам кандидатской диссертации
http://sinp.msu.ru/ru/system/files/dissertations/maevskiy_dissertaciya.pdf



- ▶ Введение. Цели и задачи исследования
- ▶ Эксперимент ATLAS. Трековый детектор переходного излучения
- ▶ Сравнительный анализ спектров заряженных частиц при 8 и 13 ТэВ
- ▶ Измерение массы B^+ -мезона
- ▶ Измерение параметров CP-нарушения в распадах $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$
- ▶ Заключение. Положения, выносимые на защиту, список публикаций



Введение. Цели и задачи исследования



- ▶ Стандартная модель (СМ)
 - Сформулирована в $\sim 60-70$ -ые гг. XX века
 - Открыты векторные калибровочные бозоны, три поколения лептонов и кварков, бозон Хиггса
 - Немалое количество нерешенных вопросов: темная материя и энергия, массы нейтрино, проблема иерархии, квантовая гравитация, ...
- ▶ Поиск новой физики
 - Прямой
 - Косвенный: прецизионные измерения характеристик процессов СМ

В частности: В-физика

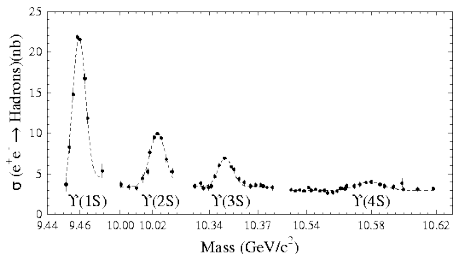
 - ▶ Процессы с нейтральными токами, меняющимися аромат: редкие распады, смешивание нейтральных мезонов, CP-нарушение



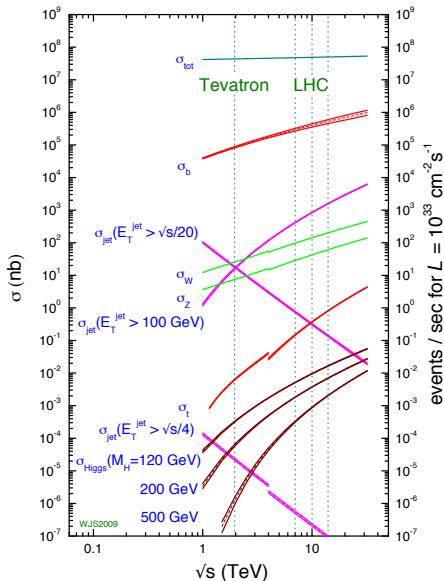
В-физика на адронных коллайдерах

По сравнению с В-фабриками:

- ✓ Большие сечения рождения b -адронов
- ✓ Рождение всех b -адронов (в т. ч. B_c^+ , b -барионов)
- ✗ Большой фон



proton - (anti)proton cross sections





- ▶ Присутствует в кварковом (распады нейтральных K и B -мезонов) и, вероятно, в нейтринном секторах
- ▶ Является ключевым элементом решения проблемы барионной асимметрии Вселенной (слишком мало в рамках СМ)
- ▶ Проявления новой физики могут увеличить степень CP-нарушения в распадах тяжелых адронов
- ▶ Один из чувствительных к таким проявлениям каналов:
 $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$



Основная физическая задача

Измерение характеристик распадов $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ и определение на их основе значений слабой фазы ϕ_s , характеризующей величину CP-нарушения в этих распадах, и разницы ширин легкого и тяжелого массовых состояний B_s^0 -мезона $\Delta\Gamma_s$ на полном наборе данных первого сеанса работы Большого адронного коллайдера (БАК) при энергиях pp -соударений в системе центра масс 7 и 8 ТэВ



- ▶ Измерение характеристик b -адронов требует стабильной работы трековой системы внутреннего детектора¹

⇒ Методические задачи:

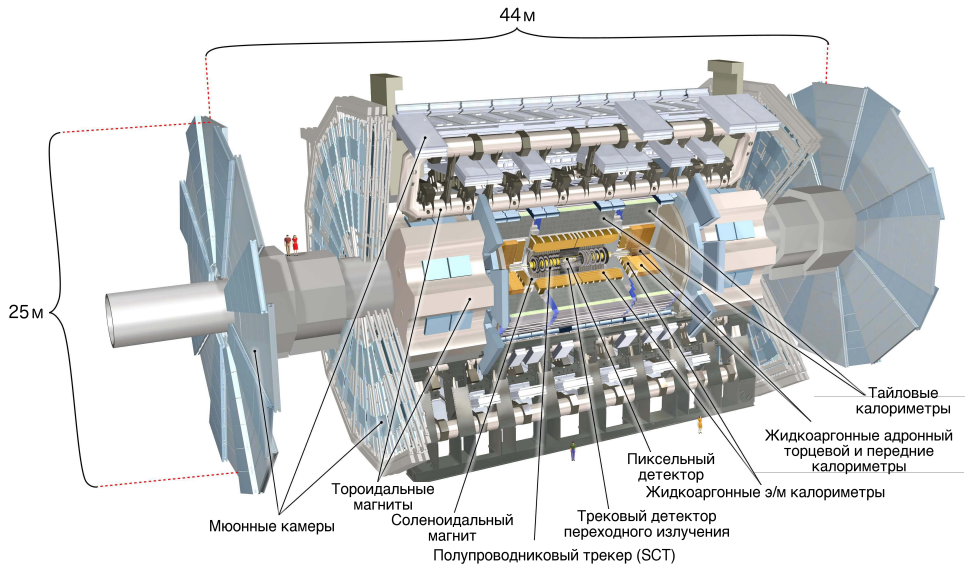
1. Усовершенствование математической модели Трекового детектора переходного излучения (TRT²) и **модификация стандартных пакетов программного обеспечения (ПО) эксперимента ATLAS (реализация возможности проведения моделирования детектора при заполнении отдельных модулей TRT новыми газовыми смесями)**
2. Проверка качества работы внутреннего детектора во втором сеансе набора данных с помощью **прецизионного измерения массы B^\pm -мезонов** по распадам $B^\pm \rightarrow J/\psi(\mu^+\mu^-)K^\pm$ при различных значениях их быстроты

¹Внутренний детектор — наиболее близко расположенная к пучку подсистема установки ATLAS.

²Одна из подсистем внутреннего детектора установки ATLAS.



Эксперимент ATLAS. Трековый детектор переходного излучения





Этапы работы эксперимента:

- ▶ Первый сеанс набора данных (до 2013 г.):
 - Энергия: 7 и 8 ТэВ
 - Максимальная светимость: $7.7 \times 10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
- ▶ Первый период длительной остановки («Long Shutdown 1», LS1, 2013–2015 гг.)
- ▶ Второй сеанс набора данных (с 2015 г.)
 - Энергия: 13 ТэВ
 - Максимальная светимость: более $10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

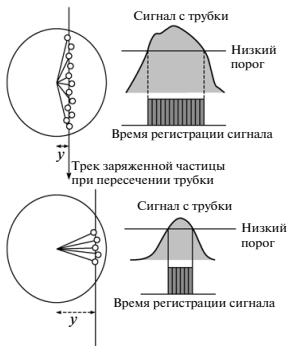


Основные модификации:

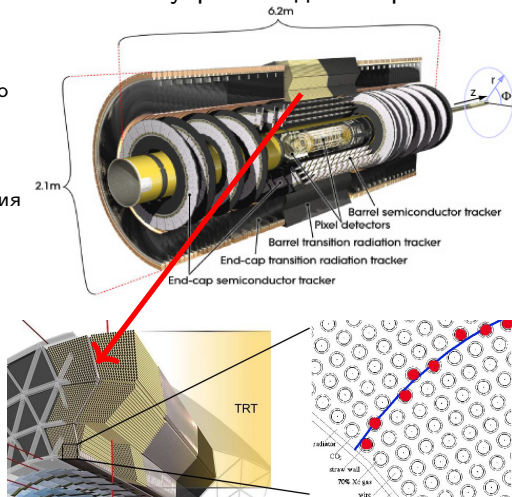
- ▶ Увеличение энергии (до 13 ТэВ) и светимости (до более чем $10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$)
- ▶ Внедрение дополнительного слоя прецизионных пиксельных детекторов (3.3 см от оси пучка)
- ▶ Уменьшение временного интервала между пересечениями сгустков (50 → 25 нс)
- ▶ Модификации триггера
 - Внедрение в триггер первого уровня (аппаратный триггер) топологического модуля (вычисление на этом уровне углов раствора, инвариантных масс, скалярных и векторных сумм поперечных импульсов и т. п. на частоте 40 МГц)
 - Объединение процессорных ферм триггеров второго и третьего уровней (динамическое распределение ресурсов между этими уровнями \implies оптимизация процесса отбора событий)
- ▶ Изменение активной газовой смеси в некоторых модулях детектора TRT

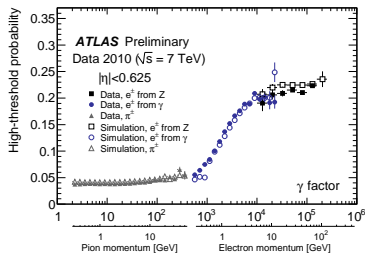
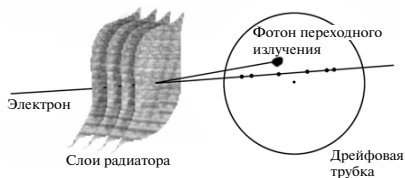


- ▶ Набор тонких ($d = 4$ мм) дрейфовых трубок
- ▶ Измерение координат треков по времени дрейфа (разрешение одной трубки — 130 мкм)
- ▶ Идентификация электронов с помощью переходного излучения



Внутренний детектор

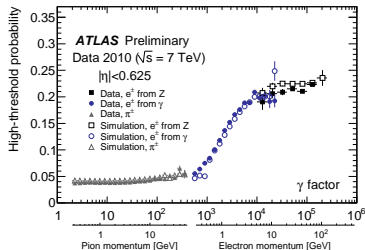
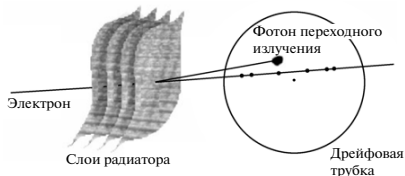




- ▶ Пространство между трубками заполнено радиатором — веществом с переменным показателем диэлектрической проницаемости
- ▶ Пролетая через радиатор, релятивистские заряженные частицы испускают рентгеновские фотоны переходного излучения (Transition Radiation, TR)
 - Интенсивность излучения пропорциональна лоренц-фактору γ
 - Угол испускания фотонов относительно направления движения пропорционален $1/\gamma$



Детектор TRT. Идентификация электронов



- ▶ $m(e) \ll m(\text{другие заряженные частицы}) \implies$ больше фотонов TR \implies идентификация путем регистрации TR
- ▶ Два порога дискриминатора сигнала трубок TRT:
 - низкий — порядка $\sim 300 \text{ эВ}$ — измерение координат треков;
 - высокий — порядка $\sim 5 - 6 \text{ кэВ}$ — регистрация TR.



- ▶ Для идентификации электронов важна эффективная регистрация переходного излучения (TR)
- ▶ Это определяет выбор активной газовой смеси: $\text{Xe}/\text{CO}_2/\text{O}_2$ — смесь на основе ксенона
- ▶ К концу первого сеанса образовались значительные утечки активной газовой смеси TRT

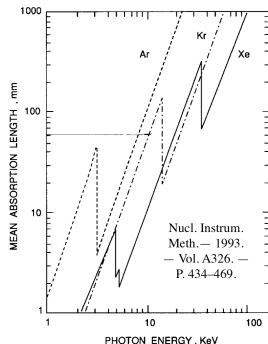


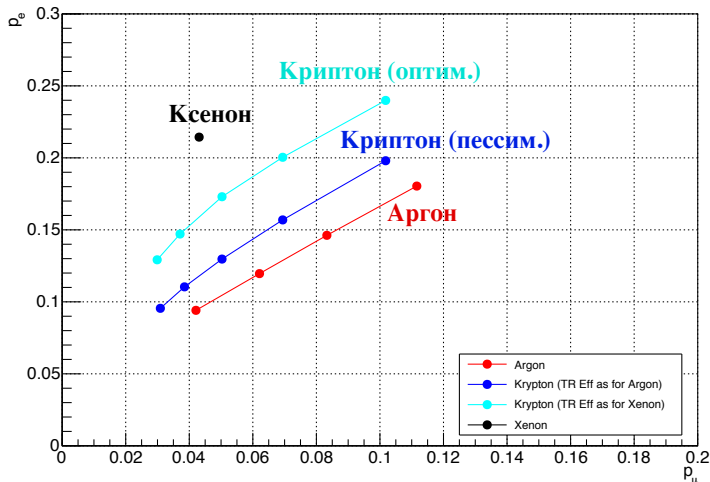
Fig. 23. Mean absorption length of Ar, Kr and Xe.

- ▶ Невозможность устранения утечек \implies замена в некоторых модулях дорогой смеси $\text{Xe}/\text{CO}_2/\text{O}_2$ на более дешевую $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{O}_2$ — смесь на основе аргона
 - Выбор модулей определялся минимизацией ухудшения эффективности идентификации электронов в ATLAS
- ▶ Также изучалась возможность использовать смесь на основе криптона



Результаты моделирования

- ▶ $E(e) = E(\mu) = 20$ ГэВ
- ▶ p — вероятность преодоления высокого порога

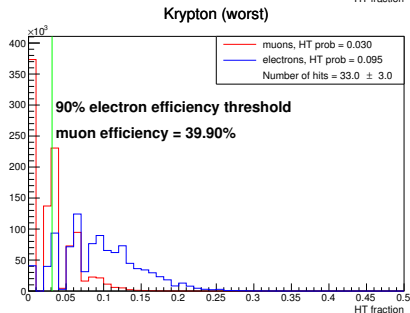
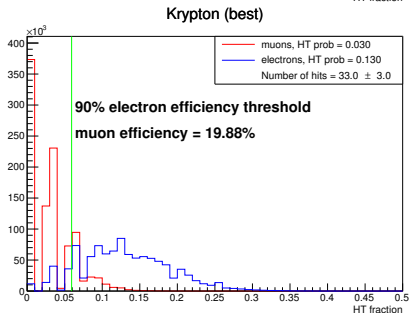
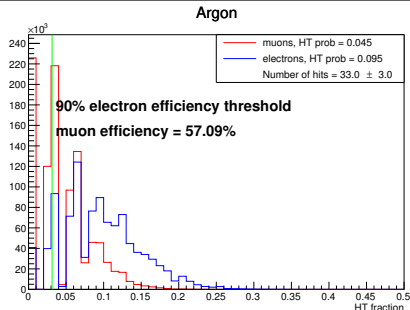
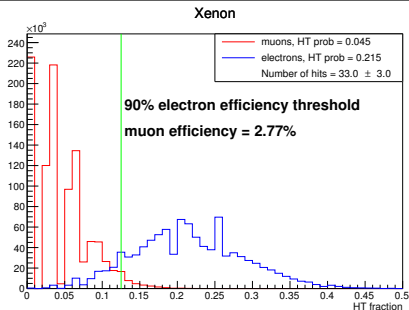




- ▶ Методом псевдоэкспериментов (моделируются наперед заданные распределения)
- ▶ TRT полностью заполнен одной газовой смесью (на основе Xe, Kr или Ar)
 - Для Kr в связи с отсутствием калибровки моделируются два случая: оптимистичный и пессимистичный
- ▶ Предполагается нормальное распределение числа сигналов TRT на треке (числа пересеченных треком дрейфовых трубок)
- ▶ Одинаковая вероятность преодоления высокого порога во всех трубках для одного и того же газа
- ▶ Изучается распределение доли сигналов с высоким порогом на треке



Оценка эффективности идентификации электронов





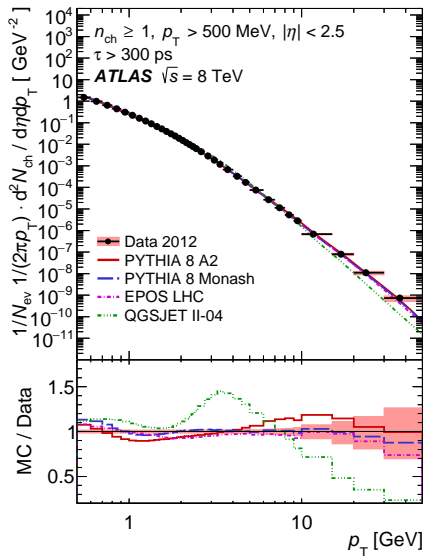
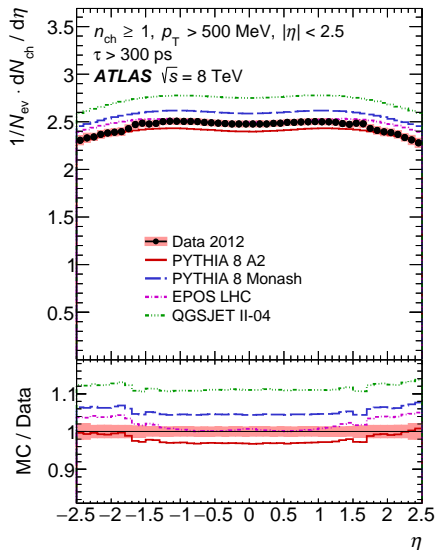
- ▶ Осуществлена модификация стандартных пакетов ПО эксперимента ATLAS
- ▶ Реализована возможность моделирования новых активных газовых смесей (на основе аргона и криптона) в TRT
- ▶ Определены калибровочные константы для регистрации переходного излучения смесью на основе аргона
- ▶ Произведено моделирование регистрации переходного излучения при использовании новых смесей, осуществлена количественная оценка ухудшения эффективности идентификации электронов



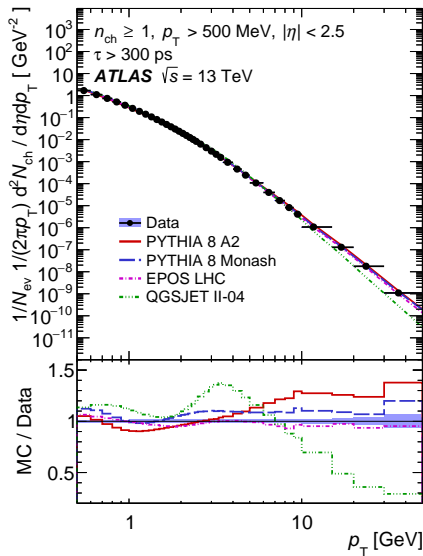
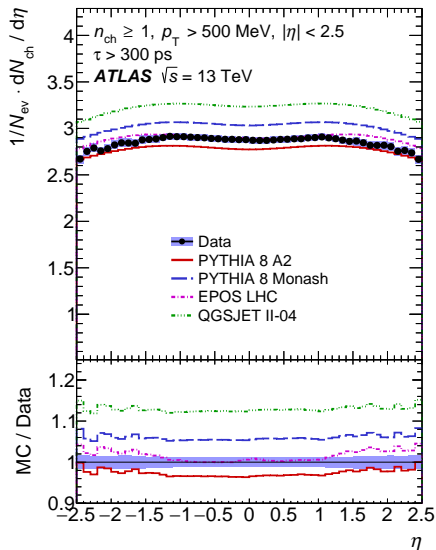
Сравнительный анализ спектров заряженных частиц при 8 и 13 ТэВ



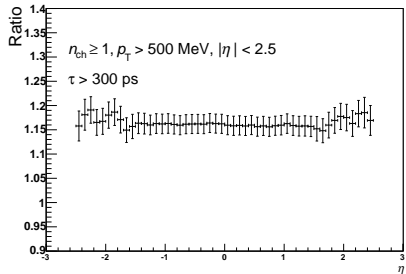
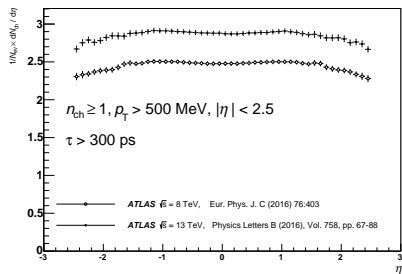
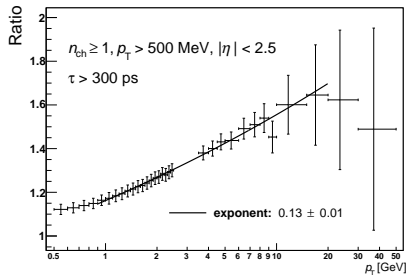
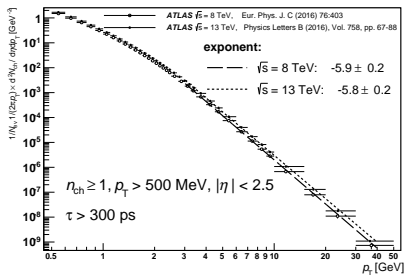
Распределения при 8 ТэВ



Eur. Phys. J. C (2016) 76:403



Physics Letters B (2016), Vol. 758, pp. 67-88





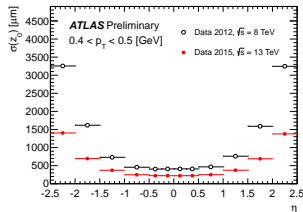
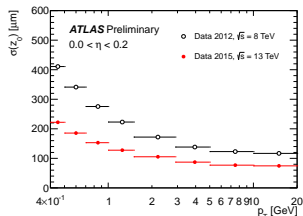
- ▶ Проведено сравнение распределений заряженных частиц по p_T и η при 8 и 13 ТэВ
- ▶ Спектр частиц по p_T становится более жестким при увеличении энергии
 - При аппроксимации степенной функцией показатель возрастает на 0.13 ± 0.01
- ▶ С ростом энергии характер распределений по η не меняется



Измерение массы B^+ -мезона

Мотивация

- ▶ Получение одного из первых физических результатов на новых данных, при новых условиях (проверка качества работы детектора во втором сеансе):
 - Новая энергия 13 TeV
 - Интервал между pp -соударениями 25 нс (в конце первого сеанса — 50 нс)
 - Новый слой пиксельного детектора во Внутреннем Детекторе ATLAS
- ▶ Подготовка к другим измерениям B -физики:
 - время жизни B^\pm ,
 - сечение рождения B^\pm ,
 - CP-нарушение в распаде $B_s \rightarrow J/\psi\phi$
 - и др. . .



Отбор кандидатов

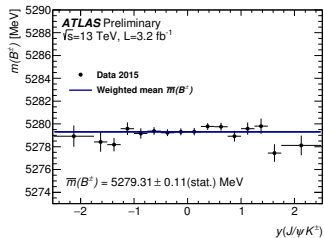
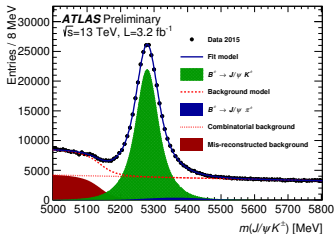
- ▶ Данные pp -соударений 2015 г., соответствующие интегральной светимости 3.2 fb^{-1}
- ▶ Отбор производился по критериям качества реконструкции треков, их кинематическим характеристикам и качеству $\chi^2/N_{\text{d.o.f.}}$ вершинных фитов ($\mu^+\mu^-$ и $\mu^+\mu^-K^\pm$)

Массовый фит

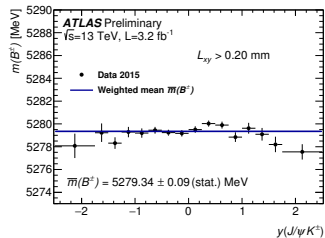
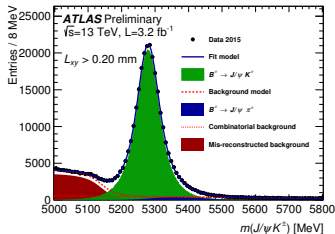
$$\ln \mathcal{L} = \sum_{i=1}^N \left\{ \ln(f_s \cdot \mathcal{F}_s(m_i)) + f_s \cdot f_{B_x} \cdot \mathcal{F}_{B_x}(m_i) + f_s \cdot f_{B_\pi} \cdot \mathcal{F}_{B_\pi}(m_i) + (1 - f_s \cdot (1 + f_{B_x} + f_{B_\pi})) \mathcal{F}_{\text{bkg}}(m_i) \right\}$$

- ▶ Сигнал - двойной Гаусс с общим средним
- ▶ Комбинаторный фон - линейная функция
- ▶ Частично реконструированные распады $B \rightarrow J/\psi X$ - гиперболический тангенс
- ▶ Резонансный фон от $B^\pm \rightarrow J/\psi \pi^\pm$ - Гаусс (с фиксированными параметрами, определенными моделированием данного канала методом Монте-Карло)

Обычный отбор событий



Доп. требование на поперечную длину пробега



- ▶ Результат фита стабилен с большой (статистической) точностью (отн. отклонения < 0.0005)

Сравнение с другими экспериментами

- ▶ Сравнение с мировым средним (PDG)
- ▶ Сравнение с результатом LHCb
- ▶ Самосогласованность результата (при наличии и отсутствии дополнительного требования на поперечную длину пробега)

Фит	Масса B^+ -мезона, МэВ	Погрешность, МэВ
Стандартный	5279.31	± 0.11
$L_{xy} > 0.2$ мм	5279.34	± 0.09
Мировое среднее	5279.29	± 0.15
LHCb	5279.38	$\pm 0.11 \pm 0.33$

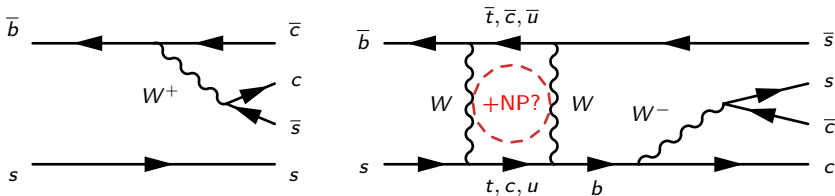
- ▶ Оцененная систематическая неопределенность (неполная) — 0.25 МэВ
- ▶ В оценку систематической погрешности не входит погрешность калибровки измерения координат и импульсов Внутреннего Детектора



Измерение параметров CP-нарушения в
распадах $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$



$$B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$$

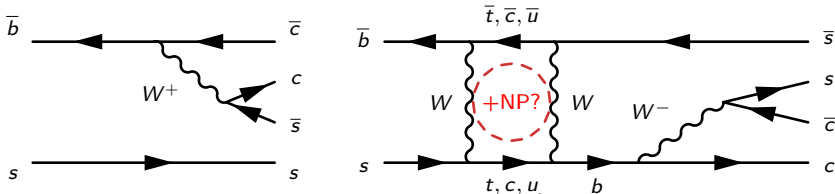


- ▶ Нейтральный B_s^0 -мезон смешивается со своей античастицей посредством петлевых диаграмм с двумя W -бозонами (аналогично нейтральным каонам)
- ▶ CP-нарушение происходит за счет интерференции между прямым распадом $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ и распадом посредством осцилляции:

$$\Gamma[B_s^0(\rightsquigarrow\bar{B}_s^0) \rightarrow J/\psi\phi](t) \neq \Gamma[\bar{B}_s^0(\rightsquigarrow B_s^0) \rightarrow J/\psi\phi](t)$$



$$B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$$



- ▶ Временная эволюция системы $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ определяется следующими параметрами:

- $\Delta m_s = m_s^H - m_s^L$
- $\Delta \Gamma_s = \Gamma_s^L - \Gamma_s^H$
- ϕ_s — разница слабых фаз между амплитудами смешивания $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ и распада $b \rightarrow c\bar{c}s$
 - ▶ характеризует величину CP-нарушения
 - ▶ связана с элементами CKM матрицы: $\phi_s \simeq -2\beta_s$;

$$\beta_s = \arg [-(V_{ts}V_{tb}^*) / (V_{cs}V_{cb}^*)]$$
 - ▶ $\phi_s^{\text{CM}} = -0.0376_{-0.0007}^{+0.0008}$ рад

- ▶ Вклады гипотетических частиц новой физики могут повлиять на значение ϕ_s
- ▶ Значительного влияния новой физики на $\Delta \Gamma_s$ не ожидается



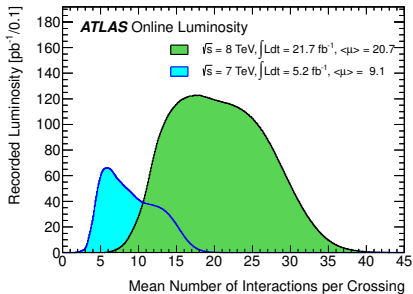
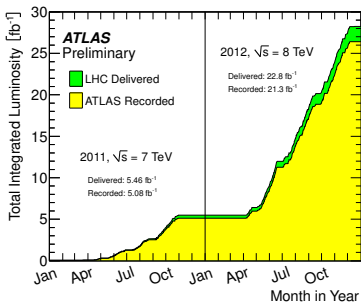
$$B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$$

► Распад псевдоскалярного B_s^0 -мезона на состояние с двумя векторными мезонами $J/\psi(\mu^+\mu^-)\phi(K^+K^-)$

⇒ Три конечных состояния с орбитальным моментом $L = 0, 2$ (CP-четные) и $L = 1$ (CP-нечетные)

+ Одно дополнительное CP-нечетное состояние с S -волновой конфигурацией K^+K^-

⇒ 4 амплитуды распада (A_{\parallel} , A_{\perp} , A_0 и A_S) и соответствующие интерференционные члены



- ▶ Измерение ϕ_s и $\Delta\Gamma_s$ осуществлено по данным pp -соударений при энергии 8 ТэВ, соответствующим интегральной светимости 14.3 fb^{-1}
- ▶ Результат статистически скомбинирован с аналогичным измерением на данных 7 ТэВ (4.9 fb^{-1} интегральной светимости)



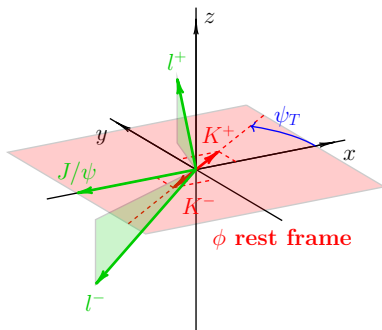
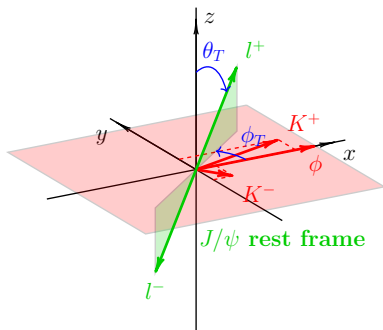
Отбор событий:

- ▶ Два мюона (триггер с $p_T > 4$ и 6 ГэВ) с общей вершиной $\chi^2/N_{\text{d.o.f.}}(\mu^+\mu^-) < 10$
- ▶ Вариации массового окна $m(\mu\mu)$ в зависимости от $\eta(\mu^+)$ и $\eta(\mu^-)$:
 - $(2.959 - 3.229)$ ГэВ, $|\eta(\mu_{1,2})| < 1.05$
 - $(2.913 - 3.273)$ ГэВ, $|\eta(\mu_1)| < 1.05 < |\eta(\mu_2)| < 2.5$
 - $(2.852 - 3.332)$ ГэВ, $1.05 < |\eta(\mu_{1,2})| < 2.5$
- ▶ Два трека, не идентифицированных как μ , с $p_T > 1$ ГэВ и $|\eta| < 2.5$
- ▶ Фитирование всех четырех треков в общую вершину с $\chi^2/N_{\text{d.o.f.}}(\mu^+\mu^-K^+K^-) < 3$
- ▶ 1.0085 ГэВ $< m(K^+K^-) < 1.0305$ ГэВ
- ▶ 5.150 ГэВ $< m(\mu^+\mu^-K^+K^-) < 5.650$ ГэВ
- ▶ Нет отбора по времени жизни/прицельному параметру



- ▶ Разделение вкладов от CP-четных и нечетных амплитуд и интерференционных членов с помощью углового анализа
- ▶ Фитирование событий методом наибольшего правдоподобия по инвариантной массе, собственному времени жизни и трем углам

Определение угловых переменных:





$\Gamma(t, \theta_T, \phi_T, \psi_T)$

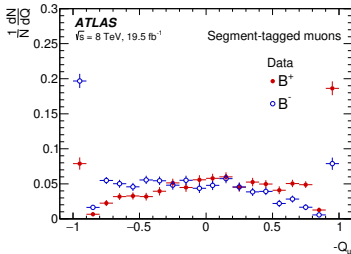
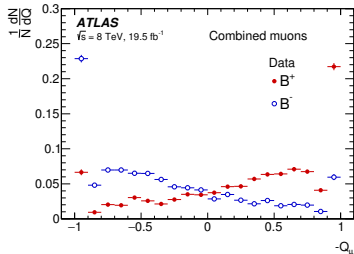
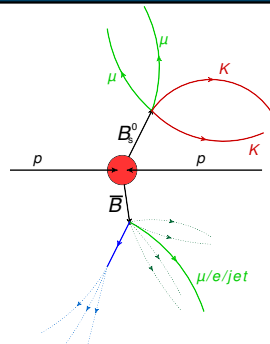
$$\frac{d^4\Gamma}{dt d\Omega} = \sum_{k=1}^{10} \mathcal{O}^{(k)}(t) g^{(k)}(\theta_T, \psi_T, \phi_T)$$

k	$\mathcal{O}^{(k)}(t)$	$g^{(k)}(\theta_T, \psi_T, \phi_T)$
1	$\frac{1}{2} A_0(0) ^2 \left[(1 + \cos \phi_s) e^{-\Gamma_L^{(s)} t} + (1 - \cos \phi_s) e^{-\Gamma_H^{(s)} t} \pm 2e^{-\Gamma_s t} \sin(\Delta m_s t) \sin \phi_s \right]$	$2 \cos^2 \psi_T (1 - \sin^2 \theta_T \cos^2 \phi_T)$
2	$\frac{1}{2} A_{\parallel}(0) ^2 \left[(1 + \cos \phi_s) e^{-\Gamma_L^{(s)} t} + (1 - \cos \phi_s) e^{-\Gamma_H^{(s)} t} \pm 2e^{-\Gamma_s t} \sin(\Delta m_s t) \sin \phi_s \right]$	$\sin^2 \psi_T (1 - \sin^2 \theta_T \sin^2 \phi_T)$
3	$\frac{1}{2} A_{\perp}(0) ^2 \left[(1 - \cos \phi_s) e^{-\Gamma_L^{(s)} t} + (1 + \cos \phi_s) e^{-\Gamma_H^{(s)} t} \mp 2e^{-\Gamma_s t} \sin(\Delta m_s t) \sin \phi_s \right]$	$\sin^2 \psi_T \sin^2 \theta_T$
4	$\frac{1}{2} A_0(0) A_{\parallel}(0) \cos \delta_{\parallel} \left[(1 + \cos \phi_s) e^{-\Gamma_L^{(s)} t} + (1 - \cos \phi_s) e^{-\Gamma_H^{(s)} t} \pm 2e^{-\Gamma_s t} \sin(\Delta m_s t) \sin \phi_s \right]$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \sin 2\psi_T \sin^2 \theta_T \sin 2\phi_T$
5	$ A_{\parallel}(0) A_{\perp}(0) \left[\frac{1}{2}(e^{-\Gamma_L^{(s)} t} - e^{-\Gamma_H^{(s)} t}) \cos(\delta_{\perp} - \delta_{\parallel}) \sin \phi_s \pm e^{-\Gamma_s t} (\sin(\delta_{\perp} - \delta_{\parallel}) \cos(\Delta m_s t) - \cos(\delta_{\perp} - \delta_{\parallel}) \cos \phi_s \sin(\Delta m_s t)) \right]$	$-\sin^2 \psi_T \sin 2\theta_T \sin \phi_T$
6	$ A_0(0) A_{\perp}(0) \left[\frac{1}{2}(e^{-\Gamma_L^{(s)} t} - e^{-\Gamma_H^{(s)} t}) \cos \delta_{\perp} \sin \phi_s \pm e^{-\Gamma_s t} (\sin \delta_{\perp} \cos(\Delta m_s t) - \cos \delta_{\perp} \cos \phi_s \sin(\Delta m_s t)) \right]$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \sin 2\psi_T \sin 2\theta_T \cos \phi_T$
7	$\frac{1}{2} A_S(0) ^2 \left[(1 - \cos \phi_s) e^{-\Gamma_L^{(s)} t} + (1 + \cos \phi_s) e^{-\Gamma_H^{(s)} t} \mp 2e^{-\Gamma_s t} \sin(\Delta m_s t) \sin \phi_s \right]$	$\frac{2}{3} (1 - \sin^2 \theta_T \cos^2 \phi_T)$
8	$ A_S(0) A_{\parallel}(0) \left[\frac{1}{2}(e^{-\Gamma_L^{(s)} t} - e^{-\Gamma_H^{(s)} t}) \sin(\delta_{\parallel} - \delta_S) \sin \phi_s \pm e^{-\Gamma_s t} (\cos(\delta_{\parallel} - \delta_S) \cos(\Delta m_s t) - \sin(\delta_{\parallel} - \delta_S) \cos \phi_s \sin(\Delta m_s t)) \right]$	$\frac{1}{3} \sqrt{6} \sin \psi_T \sin^2 \theta_T \sin 2\phi_T$
9	$\frac{1}{2} A_S(0) A_{\perp}(0) \sin(\delta_{\perp} - \delta_S) \left[(1 - \cos \phi_s) e^{-\Gamma_L^{(s)} t} + (1 + \cos \phi_s) e^{-\Gamma_H^{(s)} t} \mp 2e^{-\Gamma_s t} \sin(\Delta m_s t) \sin \phi_s \right]$	$\frac{1}{3} \sqrt{6} \sin \psi_T \sin 2\theta_T \cos \phi_T$
10	$ A_0(0) A_S(0) \left[\frac{1}{2}(e^{-\Gamma_H^{(s)} t} - e^{-\Gamma_L^{(s)} t}) \sin \delta_S \sin \phi_s \pm e^{-\Gamma_s t} (\cos \delta_S \cos(\Delta m_s t) + \sin \delta_S \cos \phi_s \sin(\Delta m_s t)) \right]$	$\frac{4}{3} \sqrt{3} \cos \psi_T (1 - \sin^2 \theta_T \cos^2 \phi_T)$



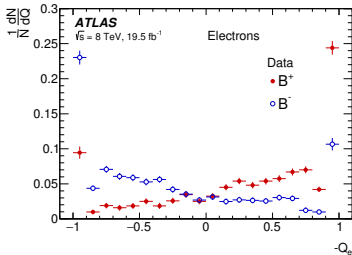
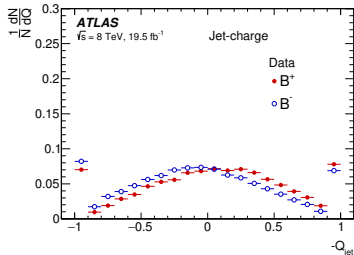
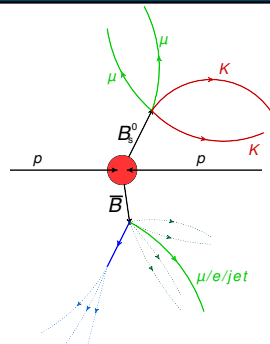
$B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$: тагирование аромата

- ▶ b -кварки рождаются парами. Аромат B_s^0 -мезона коррелирует с зарядом e/μ /струи от распада парного ему B -адрона
- ▶
$$Q_{e/\mu/\text{jet}} = \frac{\sum_i^N \text{tracks } q_i \cdot (p_{T_i})^\kappa}{\sum_i^N \text{tracks } (p_{T_i})^\kappa}$$
- ▶ $\kappa_{\mu/\text{jet}} = 1.1$; $\kappa_e = 1.0$. Суммирование по трекам в конусе $\Delta R = \sqrt{(\Delta\phi)^2 + (\Delta\eta)^2} < 0.5$ вокруг μ/e
- ▶ anti- k_t b -тагированные струи с параметром $R = 0.8$
- ▶ Калибровка метода с помощью распадов $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$, где аромат известен



$B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$: тагирование аромата

- ▶ b -кварки рождаются парами. Аромат B_s^0 -мезона коррелирует с зарядом e/μ /струи от распада парного ему B -адрона
- ▶
$$Q_{e/\mu/\text{jet}} = \frac{\sum_i^N \text{tracks } q_i \cdot (p_{T_i})^\kappa}{\sum_i^N \text{tracks } (p_{T_i})^\kappa}$$
- ▶ $\kappa_{\mu/\text{jet}} = 1.1$; $\kappa_e = 1.0$. Суммирование по трекам в конусе $\Delta R = \sqrt{(\Delta\phi)^2 + (\Delta\eta)^2} < 0.5$ вокруг μ/e
- ▶ anti- k_t b -тагированные струи с параметром $R = 0.8$
- ▶ Калибровка метода с помощью распадов $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$, где аромат известен





$$\ln \mathcal{L} = \sum_{i=1}^N \left\{ w_i \cdot \ln \left[f_s \cdot \mathcal{F}_s(m_i, t_i, \sigma_i, \Omega_i, P(B|Q), p_{Ti}) + f_s \cdot f_{B^0} \cdot \mathcal{F}_{B^0}(m_i, t_i, \sigma_i, \Omega_i, P(B|Q), p_{Ti}) + f_s \cdot f_{\Lambda_b^0} \cdot \mathcal{F}_{\Lambda_b^0}(m_i, t_i, \sigma_i, \Omega_i, P(B|Q), p_{Ti}) + (1 - f_s \cdot (1 + f_{B^0} + f_{\Lambda_b^0})) \cdot \mathcal{F}_{\text{bkg}}(m_i, t_i, \sigma_i, \Omega_i, P(B|Q), p_{Ti}) \right] \right\}$$

Веса для учета триггерной эффективности по времени жизни
 Сигнальное распределение
 Распределение фона от B_d
 Распределение фона от Λ_b^0
 Распределение остальных фонов

► Сигнальная компонента

- Масса: сумма 3 нормальных распределений с общим средним
- Время жизни и углы: показаны на слайде 36. Свертка (по времени) с нормальным распределением чтобы учесть разрешение
- Угловой акцептанс, рассчитанный с помощью сигнальных событий Монте-Карло



$$\ln \mathcal{L} = \sum_{i=1}^N \left\{ w_i \cdot \ln \left[f_s \cdot \mathcal{F}_s(m_i, t_i, \sigma_i, \Omega_i, P(B|Q), p_{Ti}) + f_s \cdot f_{B^0} \cdot \mathcal{F}_{B^0}(m_i, t_i, \sigma_i, \Omega_i, P(B|Q), p_{Ti}) \right. \right. \\ \left. \left. + f_s \cdot f_{\Lambda_b^0} \cdot \mathcal{F}_{\Lambda_b^0}(m_i, t_i, \sigma_i, \Omega_i, P(B|Q), p_{Ti}) + (1 - f_s \cdot (1 + f_{B^0} + f_{\Lambda_b^0})) \cdot \mathcal{F}_{\text{bkg}}(m_i, t_i, \sigma_i, \Omega_i, P(B|Q), p_{Ti}) \right] \right\}$$

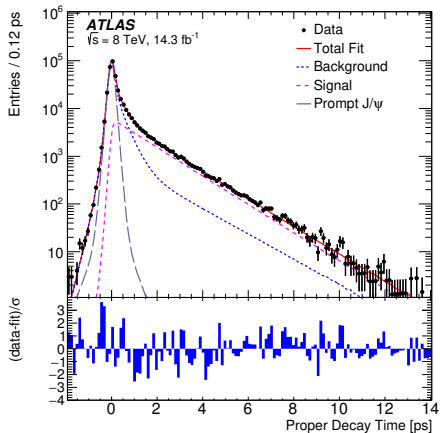
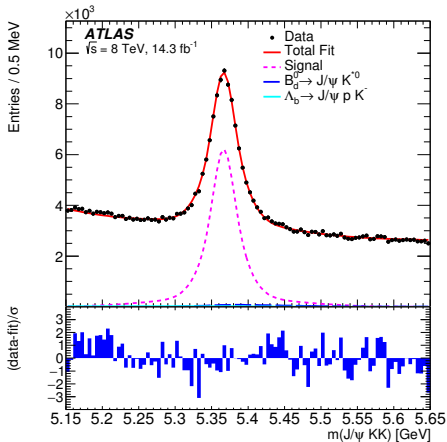
Веса для учета триггерной эффективности по времени жизни
 Сигнальное распределение
 Распределение фона от B_d
 Распределение фона от Λ_b^0
 Распределение остальных фонов

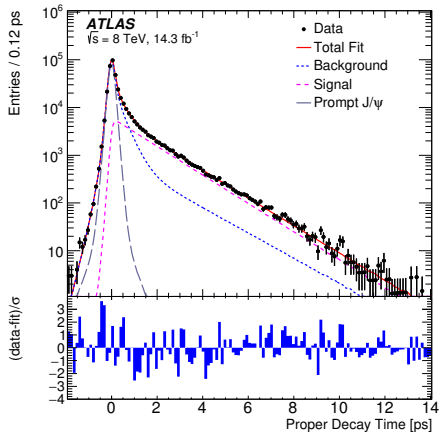
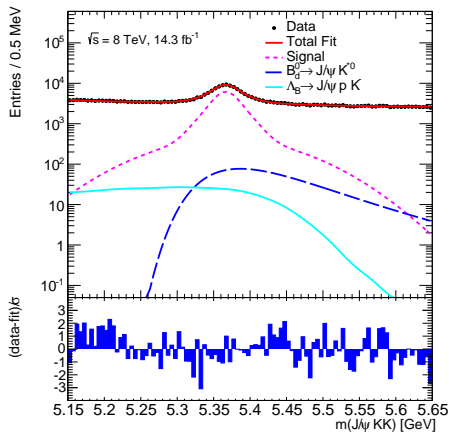
► Резонансный фон

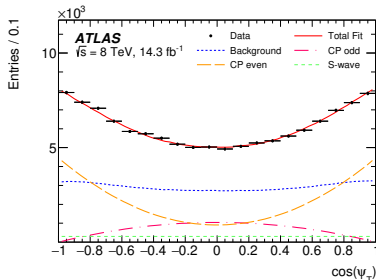
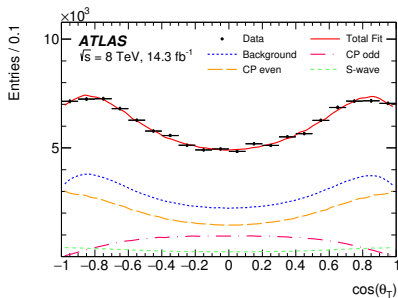
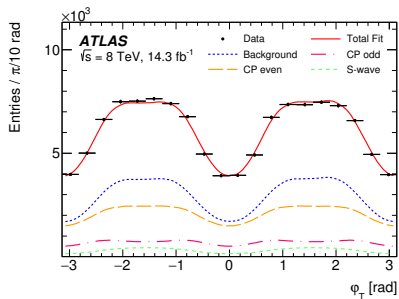
- Время жизни:
 - ▶ нормальное распределение (прямые J/ψ)
 - ▶ две экспоненты в положительной области (непрямые J/ψ)
 - ▶ экспонента в отрицательной области (события с плохим координатным разрешением)
- Масса: экспонента + константа
- Угловое распределение: сферические функции, фиксированные по несигнальной области масс (side-band)



- ▶ Резонансные фоновые каналы:
 - $B_d^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}(K\pi)$ — $(3.3 \pm 0.5)\%$ по отношению к сигналу
 - $B_d^0 \rightarrow J/\psi K\pi$ — $(0.7 \pm 0.5)\%$ по отношению к сигналу (не участвует в фите, учитывается в виде систематической неопределенности)
 - $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi pK$ — $(1.8 \pm 0.5)\%$ по отношению к сигналу
- ▶ Доли определены с помощью Монте-Карло моделирования эффективностей реконструкции данных каналов, а также с использованием измеренных относительных парциальных ширин соответствующих распадов и вероятностей фрагментации b -кварка в соответствующие адроны
- ▶ Для моделирования Λ_b^0 также учтен измеренный коллаборацией LHCb нетривиальный спектр инвариантной массы системы pK
- ▶ Массовые и угловые распределения определены из Монте-Карло после полной реконструкции событий







$$\phi_s = -0.090 \pm 0.078 \text{ (stat.)} \pm 0.041 \text{ (syst.) rad}$$

$$\Delta\Gamma_s = 0.085 \pm 0.011 \text{ (stat.)} \pm 0.007 \text{ (syst.) ps}^{-1}$$

$$\Gamma_s = 0.675 \pm 0.003 \text{ (stat.)} \pm 0.003 \text{ (syst.) ps}^{-1}$$

$$|A_{\parallel}(0)|^2 = 0.227 \pm 0.004 \text{ (stat.)} \pm 0.006 \text{ (syst.)}$$

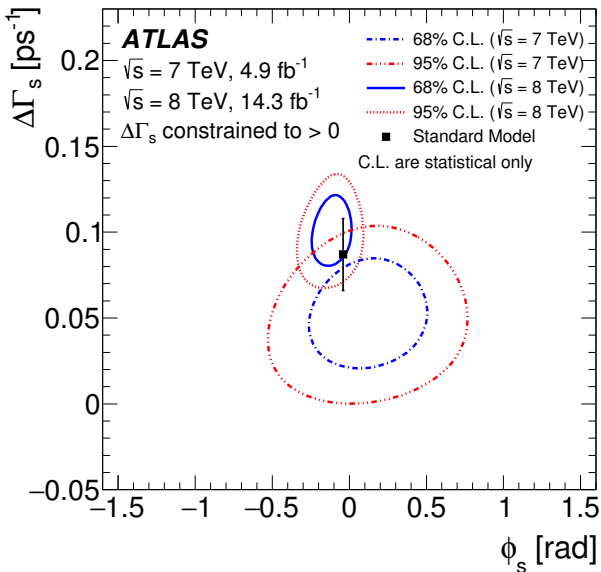
$$|A_0(0)|^2 = 0.522 \pm 0.003 \text{ (stat.)} \pm 0.007 \text{ (syst.)}$$

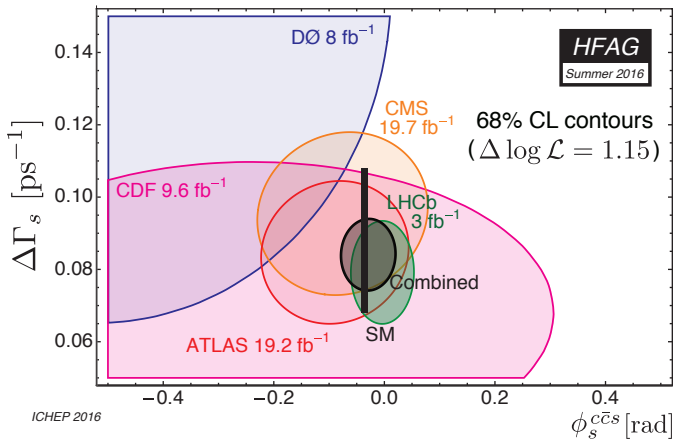
$$|A_S(0)|^2 = 0.072 \pm 0.007 \text{ (stat.)} \pm 0.018 \text{ (syst.)}$$

$$\delta_{\perp} = 4.15 \pm 0.32 \text{ (stat.)} \pm 0.16 \text{ (syst.) rad}$$

$$\delta_{\parallel} = 3.15 \pm 0.10 \text{ (stat.)} \pm 0.05 \text{ (syst.) rad}$$

$$\delta_{\perp} - \delta_S = -0.08 \pm 0.03 \text{ (stat.)} \pm 0.01 \text{ (syst.) rad.}$$





- ▶ Результат ATLAS согласуется с результатами других экспериментов и с предсказанием СМ
- ▶ Мировое среднее ($\phi_s = -0.030 \pm 0.033$) согласуется с СМ



Заключение. Положения, выносимые на защиту, список публикаций



- ▶ Осуществлена модификация стандартных пакетов ПО эксперимента ATLAS с целью моделирования новых активных газовых смесей (на основе аргона и криптона) в TRT. Определены калибровочные константы для регистрации переходного излучения смесью на основе аргона. Произведено моделирование регистрации переходного излучения при использовании новых смесей, осуществлена количественная оценка ухудшения эффективности идентификации электронов.
- ▶ Выполнено прецизионное измерение массы B^+ -мезона по данным второго сеанса работы БАК. Результаты данного измерения в различных областях детектора стабильны и не отклоняются от среднего более чем на 0.05%. Результаты согласуются с измерением эксперимента LHCb и с мировым средним.
- ▶ Измерены значения параметров CP-нарушения в распадах $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$, учтены фоновые процессы $B_d^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$, $B_d^0 \rightarrow J/\psi K^+\pi^-$ и $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p^+ K^-$. Результат измерения согласуется с другими экспериментами и с предсказанием СМ. Мировое средние измерений этих параметров также согласуется с СМ.



Автор защищает:

1. Моделирование условий регистрации переходного излучения при использовании смесей на основе аргона и криптона в подсистеме TRT ATLAS.
2. Результаты определения калибровочных констант для регистрации переходного излучения при использовании газовой смеси на основе аргона в TRT, используемых в стандартных пакетах ПО эксперимента ATLAS при полном математическом моделировании детектора методом Монте-Карло.
3. Прецизионное измерение массы B^+ мезона по первым данным pp -соударений в сеансе Run-2 при энергии 13 ТэВ, демонстрирующие стабильность работы внутреннего детектора ATLAS после проведенной модернизации.
4. Методику учета вкладов резонансного фона в анализе распада $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$.
5. Результаты измерения значений параметров ϕ_s и $\Delta\Gamma_s$ в канале $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ по данным сеанса Run-1.

- ▶ Принимает активное участие в работе группы TRT эксперимента ATLAS с 2013 г.
- ▶ Осуществил модификацию стандартных пакетов ПО эксперимента ATLAS для моделирования использования газовых смесей на основе аргона и криптона модулях TRT
 - В ходе данной работы диссертантом была обнаружена и решена при его участии проблема, связанная с двойным учетом вклада от дельта-электронов при моделировании сигналов TRT.
- ▶ Произвел определение калибровочных констант, используемых для описания регистрации переходного излучения в TRT с помощью активной газовой смеси на основе аргона
- ▶ Участвовал в 2015 и 2016 гг. в экспериментах на тестовых пучках SPS, посвященных изучению свойств переходного излучения и его регистрации в дрейфовых трубках при использовании различных радиаторов и газовых смесей
 - Был задействован в предварительной подготовке к этим экспериментам и в сменных дежурствах
 - Осуществил калибровку результатов эксперимента 2015 г.

- ▶ С 2014 г. участвует в работе группы B -физики
- ▶ Принимал участие в измерении параметров CP-нарушения по характеристикам распадов $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ по полному набору данных первого сеанса работы БАК
 - Провел оценку числа событий от фоновых процессов $B_d^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ и $B_d^0 \rightarrow J/\psi K^+\pi^-$
 - Осуществил моделирование, оценку вклада и определение систематических неопределенностей от распадов $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p^+ K^-$
- ▶ Участвовал в реконструкции массы B^+ -мезона по данным второго сеанса работы БАК
 - Провел моделирование, фитирование и оценку систематических неопределенностей от фонового процесса $B^+ \rightarrow J/\psi\pi^+$



Статьи, удовлетворяющие требованиям ВАК

1. Aad G., . . . , Maevskiy A. et al (ATLAS Collaboration).
Measurement of the CP-violating phase ϕ_s and the B_s^0 meson decay width difference with $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ decays in ATLAS // JHEP. — 2016. — Vol. 08. — P. 147. —
DOI:10.1007/JHEP08(2016)147. arXiv:1601.03297 [hep-ex].
2. Болдырев А. С., Маевский А. С. Моделирование условий регистрации переходного излучения при использовании Ar и Kr смесей в TRT ATLAS // Ядерная физика и инжиниринг. — 2014. — Т. 5, № 9-10. — С. 857–860. —
DOI:10.1134/S2079562914080065.
A. S. Boldyrev, A. S. Maevskiy. Simulation of the transition radiation detection conditions in the ATLAS TRT detector filled with argon and krypton gas mixtures // Physics of Atomic Nuclei. — 2015. — Vol. 78. — P. 1552-1555.



Прочие работы

3. ATLAS Collaboration. B^\pm mass reconstruction in $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$ decay at ATLAS at 13 TeV pp collisions at the LHC // ATLAS-CONF-2015-064. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2114830>.
4. Maevskiy A. Recent results on B-Physics and Quarkonia with the ATLAS detector // PoS. — 2016. — Vol. DIS2016. — P. 136.
5. Маевский А. С. Калибровка порогов регистрации переходного излучения в TRT ATLAS для аргоновой смеси // Труды XV межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». — 2014. — С. 28-32.
6. Lobanov S., Maevskiy A., Smirnova L. K/π ratio and strangeness suppression in pp collisions at the LHC // PoS. — 2011. — Vol. IHEP-LHC-2011. — P. 008.



Прочие работы

7. Boldyrev A. S., Lobanov S. Y., Maevsky A. S. et al. Measurements and simulations of b and c -quark production at hadron colliders // Proceedings of the Eighteenth Annual Seminar NPC'S'2011. — Minsk, Belarus, 2011. — Vol. 18. — P. 216-222.
8. М. И. Маликова, А. С. Маевский. Анализ вклада резонансных фононов в распаде $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ // Труды XVII межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». — 2016. — С. 115-117.
9. Ю. Ю. Овчаров, А. С. Маевский. Сравнительный анализ спектров заряженных частиц в соударениях протонов в эксперименте ATLAS // Труды XVII межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». — 2016. — С. 118-121.



Результаты неоднократно докладывались автором и обсуждались на научных конференциях «Ломоносовские чтения» (МГУ), на рабочих совещаниях групп TRT и В-физики эксперимента ATLAS и на совещаниях российских групп, являющихся участниками эксперимента. Автором были также сделаны доклады на следующих совещаниях, конференциях и школах:

1. TRT workshop (25–27 июня 2014 г., Краков, Польша);
2. Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (17–21 ноября 2014 г., МИФИ, Москва, Россия)
3. The Third Annual Large Hadron Collider Physics Conference (LHCP2015, 31 августа–5 сентября 2015 г., Санкт-Петербург, Россия)
4. 19th International Moscow School of Physics and 44th ITEP Winter School of Physics (16–22 февраля 2016 г., Москва, Россия)
5. 24th International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects (DIS 2016, 11–15 апреля 2016 г., DESY, Гамбург, Германия)
6. Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (12–15 апреля 2016 г., ОИЯИ, Дубна, Россия)
7. Hadron Structure and QCD: from Low to High Energies (HSQCD2016, 27 июня–1 июля 2016 г., ПИЯФ, Гатчина, Россия)
8. The 2nd International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2016, 10–14 октября 2016 г., Москва, Россия).



Спасибо за внимание!



Дополнительные слайды



Этапы моделирования в ATLAS

Изменения при переходе на аргон/криптон

Генерация событий



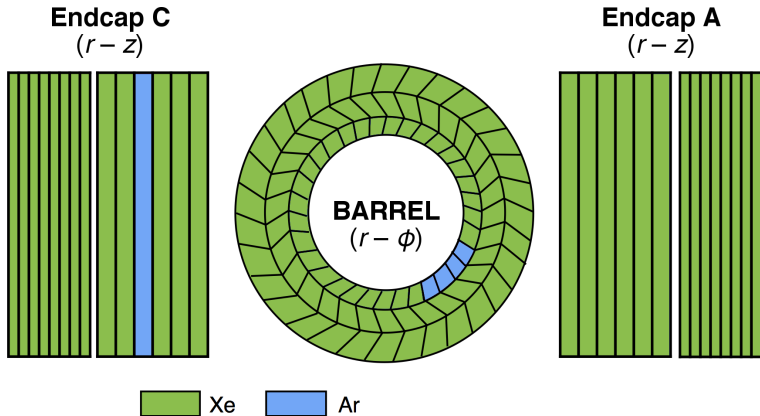
Оцифровка ("дигитизация",
моделирование отклика
детектора)

Симуляция прохождения
частиц через вещество
детектора (Geant 4)



Заполнение модулей TRT аргоном

Заполнение модулей TRT аргоном во время набора pPb данных в начале 2013 г.





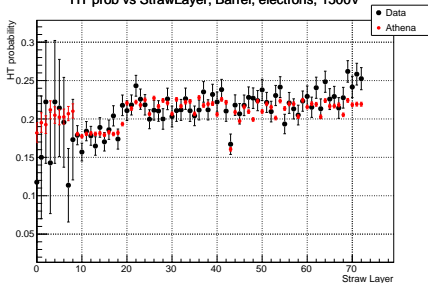
Результаты калибровки параметров Ar-смеси

Рабочее напряжение, В	Значение высокого порога в модуле, эВ		
	Центральная часть, короткие трубки (слои 0 – 8)	Центральная часть, длинные трубки (слои 9 – 18)	Торцевая часть
1500	1315	1171	1203
1490	1560	1356	1397
1470	1882	1590	1649
1449	2415	2028	2118
Модуль	Эффективность регистрации переходного излучения		
Центральный	55%		
Торцевой	80%		

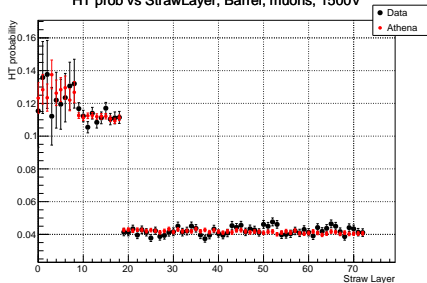


Результаты калибровки. 1500 В

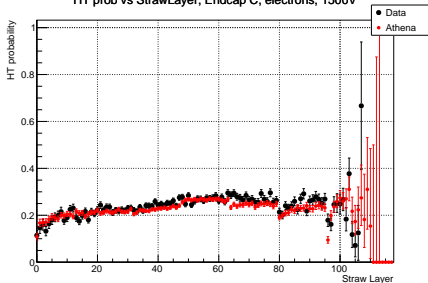
HT prob vs StrawLayer, Barrel, electrons, 1500V



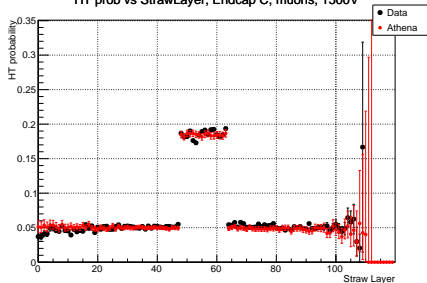
HT prob vs StrawLayer, Barrel, muons, 1500V



HT prob vs StrawLayer, Endcap C, electrons, 1500V



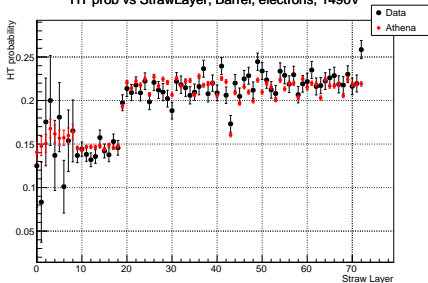
HT prob vs StrawLayer, Endcap C, muons, 1500V



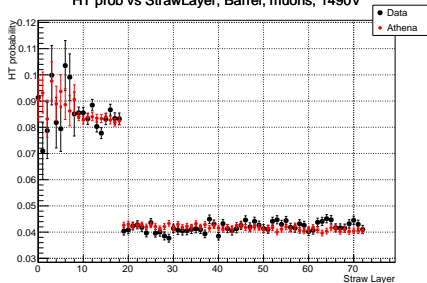


Результаты калибровки. 1490 В

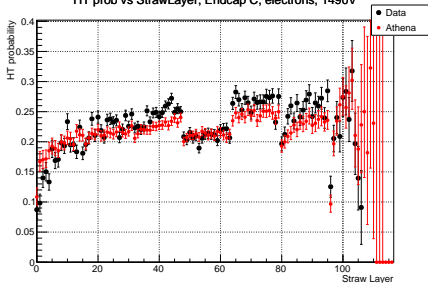
HT prob vs StrawLayer, Barrel, electrons, 1490V



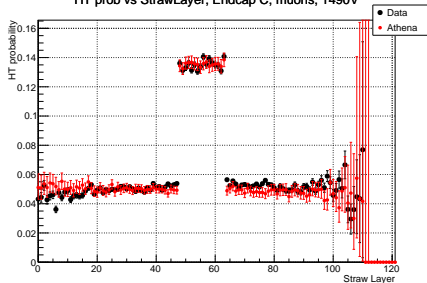
HT prob vs StrawLayer, Barrel, muons, 1490V



HT prob vs StrawLayer, Endcap C, electrons, 1490V



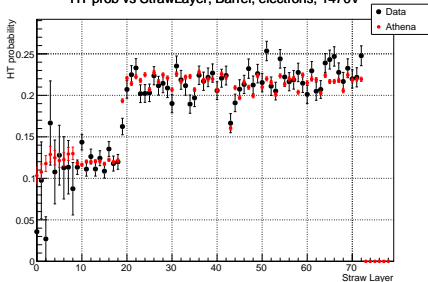
HT prob vs StrawLayer, Endcap C, muons, 1490V



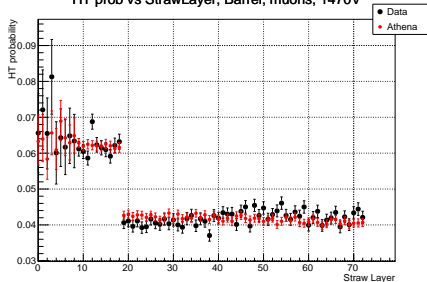


Результаты калибровки. 1470 В

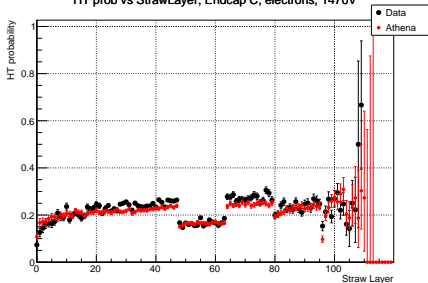
HT prob vs StrawLayer, Barrel, electrons, 1470V



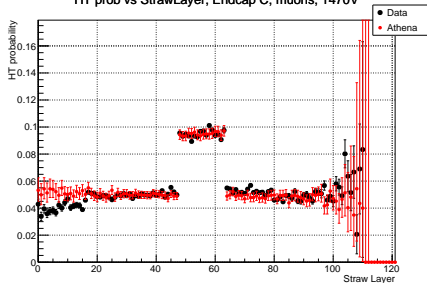
HT prob vs StrawLayer, Barrel, muons, 1470V



HT prob vs StrawLayer, Endcap C, electrons, 1470V



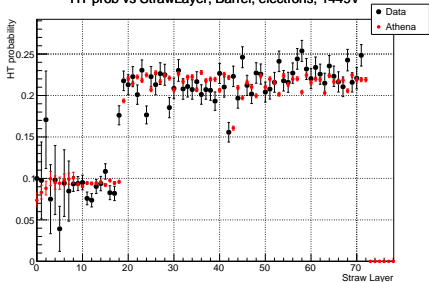
HT prob vs StrawLayer, Endcap C, muons, 1470V



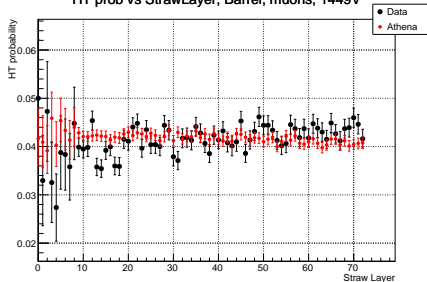


Результаты калибровки. 1449 В

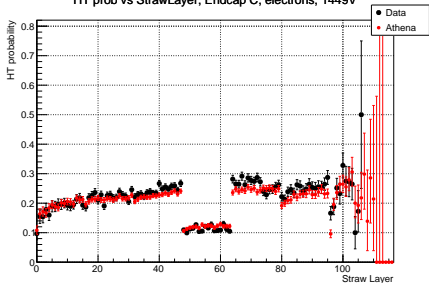
HT prob vs StrawLayer, Barrel, electrons, 1449V



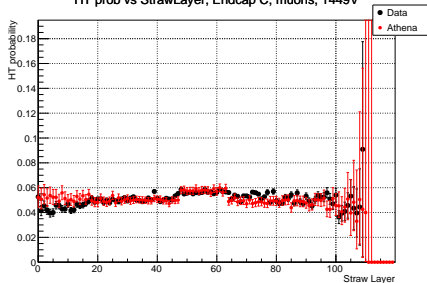
HT prob vs StrawLayer, Barrel, muons, 1449V



HT prob vs StrawLayer, Endcap C, electrons, 1449V

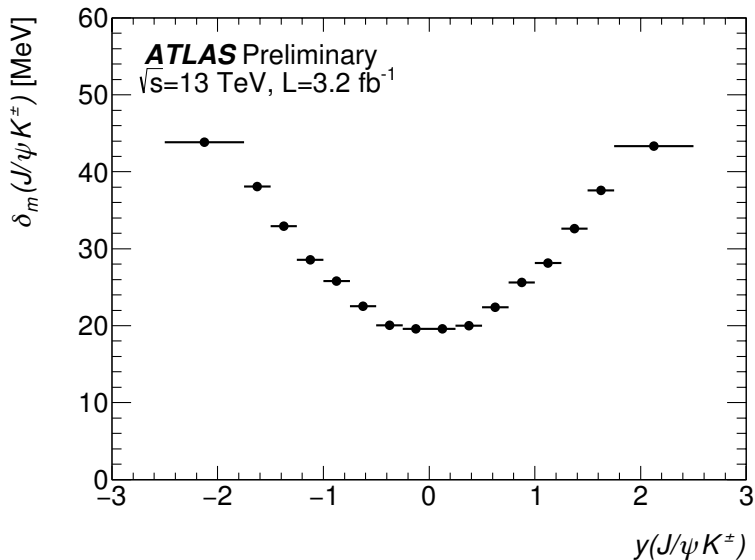


HT prob vs StrawLayer, Endcap C, muons, 1449V





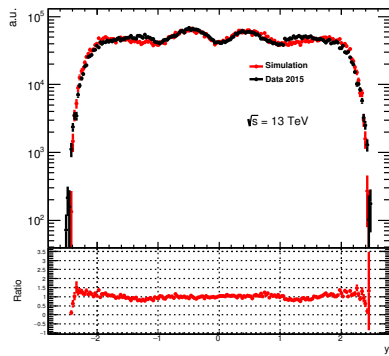
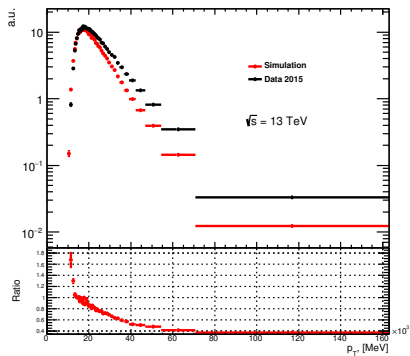
$B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$. Зависимость σ_m от y





Распределения $B^+ \rightarrow J/\psi\pi^+$ по p_T и y

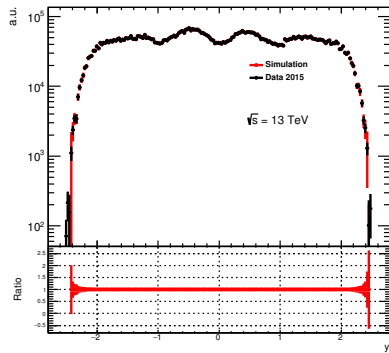
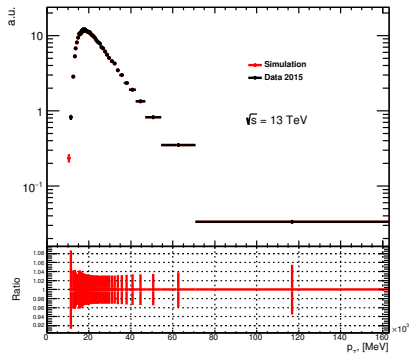
До взвешивания:





Распределения $B^+ \rightarrow J/\psi\pi^+$ по p_T и y

После взвешивания:



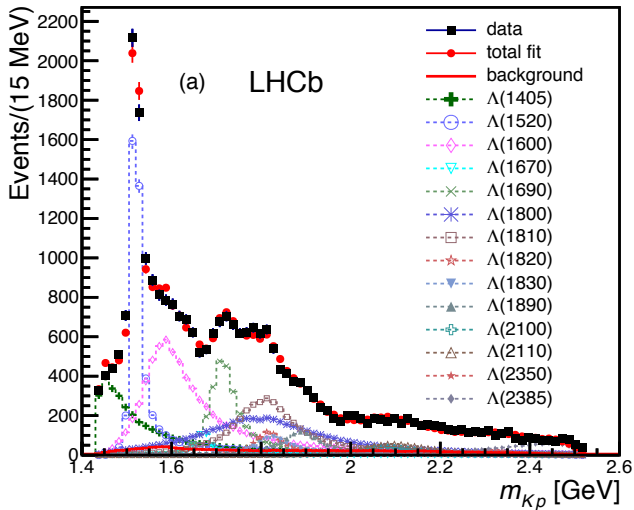


Источник	Систематическая неопределенность, МэВ
Зависимость разрешения от y	0.11
Модель сигнала	0.09
Модель фона	0.17
Выбор массового окна	0.14
Модель $B^+ \rightarrow J/\psi\pi^+$	
Неопределенность доли событий	0.02
Ошибки параметров $\mathcal{F}_{B\pi}$	0.04
Кинематические веса	0.04
Общая неопределенность	0.25



$$\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p^+ K^-$$

Спектр инвариантной массы системы pK по данным LHCb:

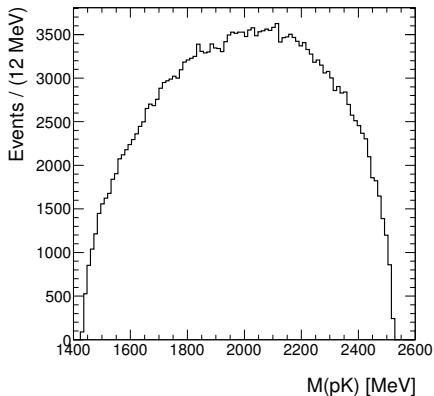


Phys. Rev.

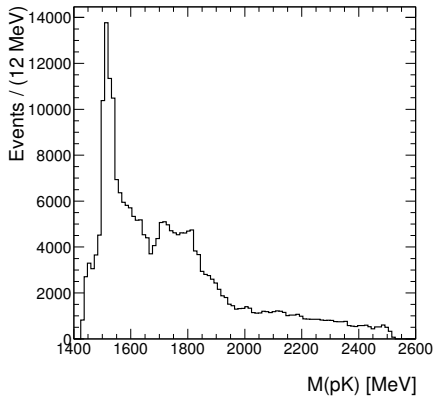
Lett. 115 (2015) 072001 [arXiv:1507.03414]

Спектр инвариантной массы системы pK :

До взвешивания



После взвешивания



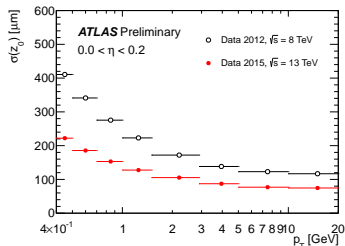
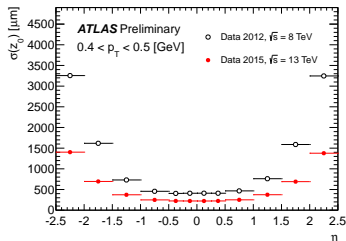


	2011	2012	2015-17		2019-21	2023-30+
Detector	current	current	IBL		IBL	ITK
Average interactions per BX $\langle\mu\rangle$	6-12	21	60		60	200
Luminosity, fb^{-1}	4.9	20	100		250	3 000
Di- μ trigger p_T thresholds, GeV	4 - 4(6)	4 - 6	6 - 6	11 - 11	11 - 11	11 - 11
Signal events per fb^{-1}	4 400	4 320	3 280	460	460	330
Signal events	22 000	86 400	327 900	45 500	114 000	810 000
Total events in analysis	130 000	550 000	1 874 000	284 000	758 000	6 461 000
MC $\sigma(\phi_s)$ (stat.), rad	0.25	0.12	0.054	0.10	0.064	0.022

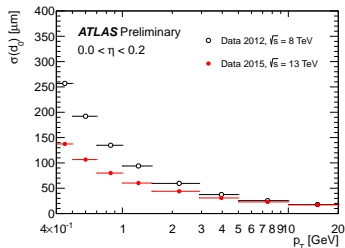
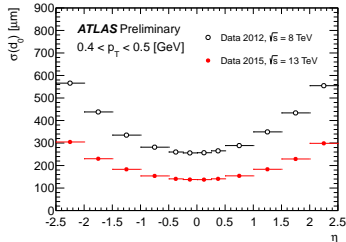
ATL-PHYS-PUB-2013-010



Продольное разрешение:



Поперечное разрешение:



<https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/IDTR-2015-007/>



	ϕ_s [rad]	$\Delta\Gamma_s$ [ps ⁻¹]	Γ_s [ps ⁻¹]	$ A_{ }(0) ^2$	$ A_0(0) ^2$	$ A_S(0) ^2$	δ_{\perp} [rad]	$\delta_{ }$ [rad]	$\delta_{\perp} - \delta_S$ [rad]
Tagging	0.025	0.003	<10 ⁻³	<10 ⁻³	<10 ⁻³	0.001	0.236	0.014	0.004
Acceptance	<10 ⁻³	<10 ⁻³	<10 ⁻³	0.003	<10 ⁻³	0.001	0.004	0.008	<10 ⁻³
Inner detector alignment	0.005	<10 ⁻³	0.002	<10 ⁻³	<10 ⁻³	<10 ⁻³	0.134	0.007	<10 ⁻³
Background angles model:									
Choice of p_T bins	0.020	0.006	0.003	0.003	<10 ⁻³	0.008	0.004	0.006	0.008
Choice of mass interval	0.008	0.001	0.001	<10 ⁻³	<10 ⁻³	0.002	0.021	0.005	0.003
B_d^0 background model	0.023	0.001	<10 ⁻³	0.002	0.002	0.017	0.090	0.011	0.009
Λ_b background model	0.011	0.002	0.001	0.001	0.007	0.009	0.045	0.006	0.007
Fit model:									
Mass signal model	0.004	<10 ⁻³	<10 ⁻³	0.002	<10 ⁻³	0.001	0.015	0.017	<10 ⁻³
Mass background model	<10 ⁻³	0.002	<10 ⁻³	0.002	<10 ⁻³	0.002	0.027	0.038	<10 ⁻³
Time resolution model	0.003	<10 ⁻³	0.001	0.002	<10 ⁻³	0.002	0.057	0.011	0.001
Default fit model	0.001	0.002	<10 ⁻³	0.002	<10 ⁻³	0.002	0.025	0.015	0.002
Total	0.042	0.007	0.004	0.006	0.007	0.022	0.30	0.05	0.01