

Измерение параметров CP-нарушений в распадах $B(s)$ мезонов в эксперименте ATLAS



Мешков Олег Васильевич

*Семинар ОЭПВАЯ
3.06.2021*

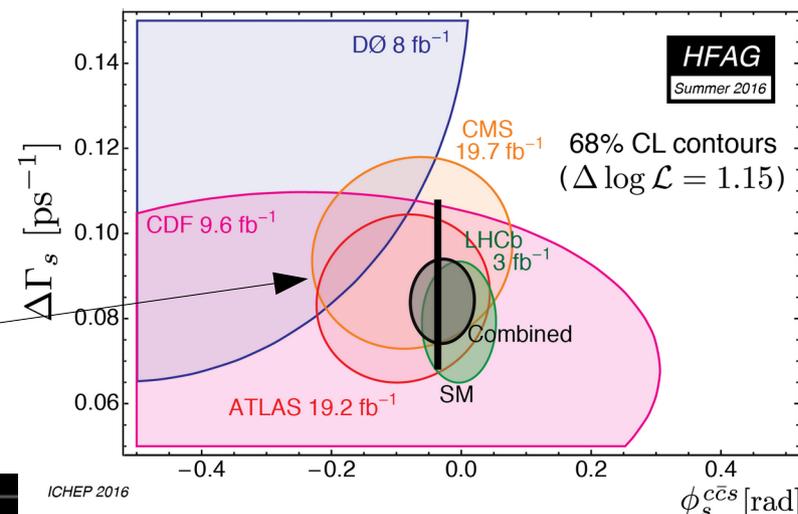
*Научный руководитель:
профессор Смирнова Л.Н.*

Цель работы

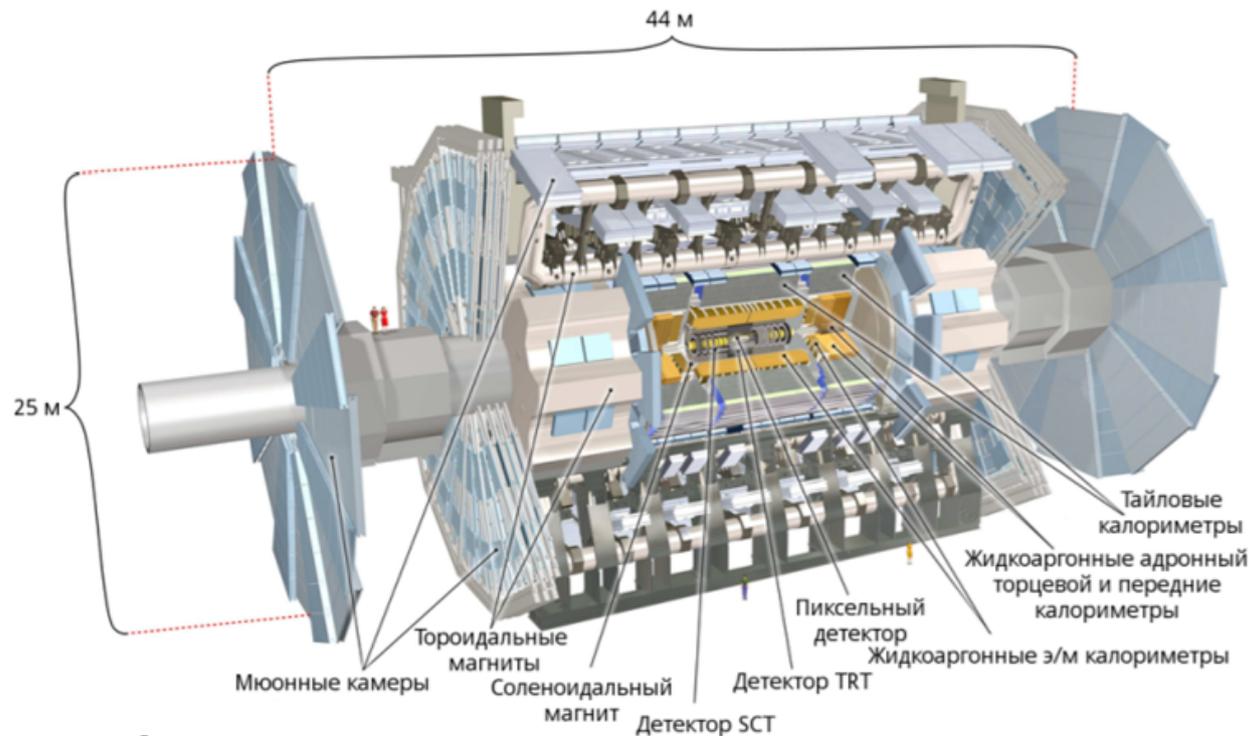
- Измерение параметров CP-нарушений в распаде $B_s \rightarrow J/\psi\phi$, зарегистрированных в эксперименте ATLAS в pp-взаимодействиях при 13 ТэВ (инт. свет. 80.5 фб⁻¹)
- Измеряемые параметры: ϕ_s и $\Delta\Gamma_s$
- Предыдущий анализ был проведен при энергиях pp-взаимодействий 7 и 8 ТэВ (инт. свет. 19.2 фб⁻¹)

JHEP 08 (2016) 147

Результаты предыдущих измерений на Теватроне и Большом адронном коллайдере(БАК)

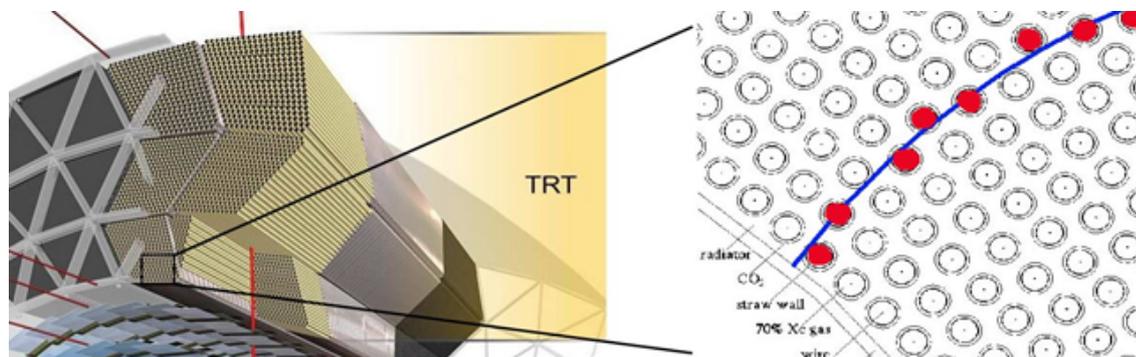
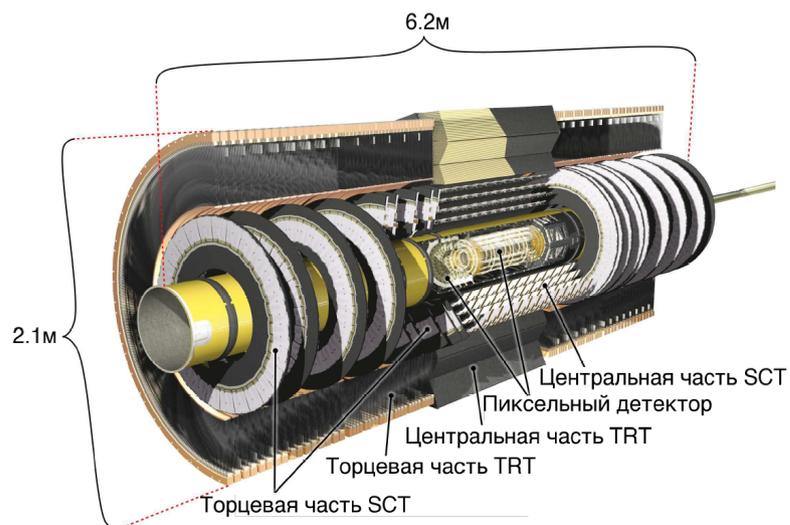


Детектор ATLAS



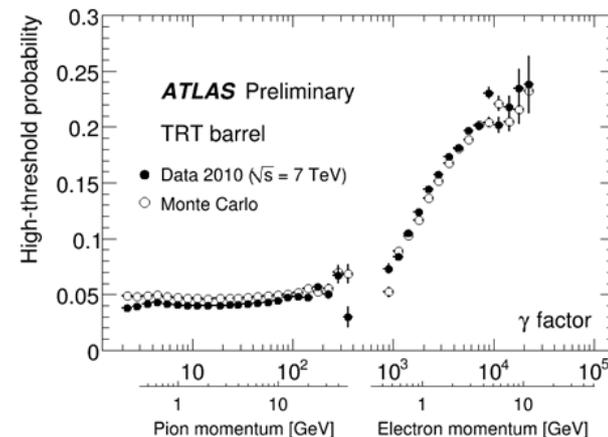
- Детектор ATLAS:
- **Внутренний детектор**
 - Пиксельный (pixel), микростриповый (SCT), трековый детектор переходного излучения (TRT)
- Калориметры (электромагнитный и адронный)
- **Мюонный спектрометр**

Детектор переходного излучения

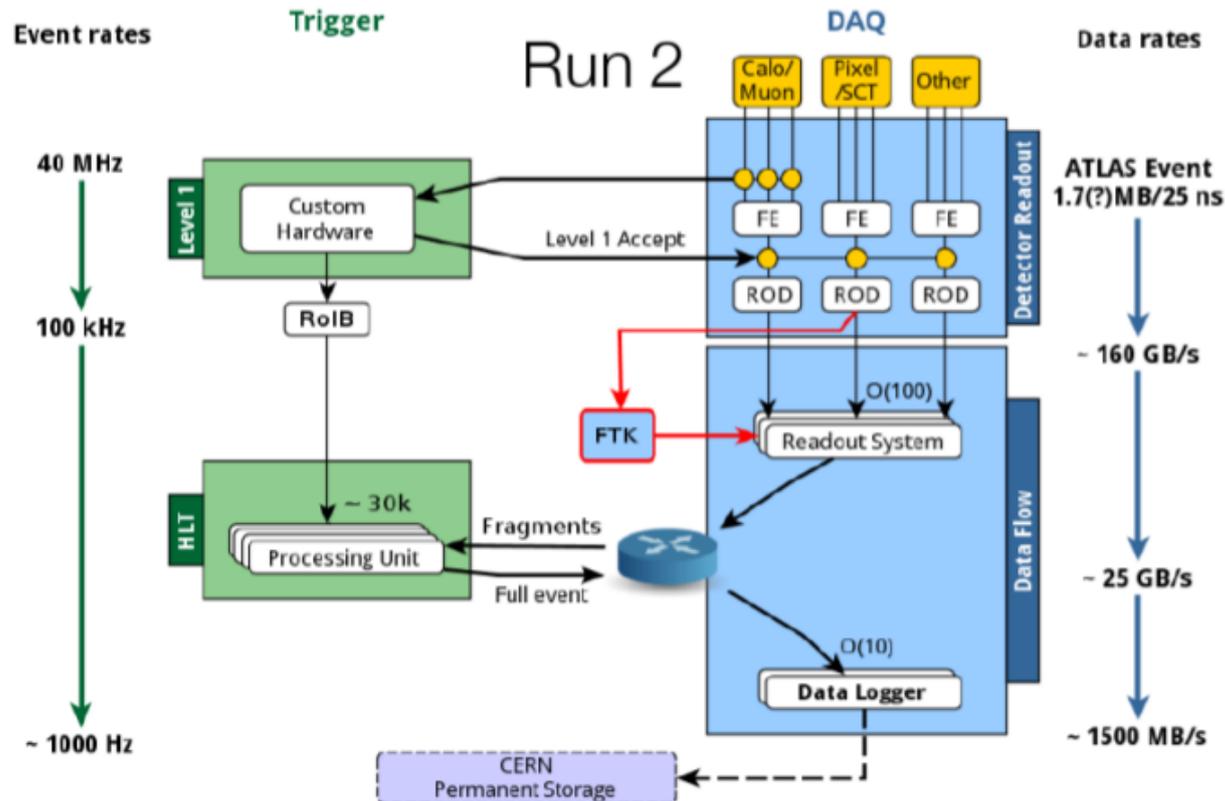


- Рабочий элемент — трубка диаметром 4 мм
- В центре анодная проволока
- Газовые смеси на основе Ar и Xe в отдельных модулях
- Измерение расстояния по времени дрейфа
- Разрешение ~130 мкм

Принимал участие в тестовых испытаниях на прототипах детектора TRT с целью его подготовки к работе во время Run-2 (2016 г.)



Триггер детектора ATLAS



ATLAS работает с большими потоками данных, соответствующих 10^9 соударений протонов в секунду. Только некоторые из этих событий содержат интересную информацию, поэтому нужен триггер.

Триггер детектора ATLAS во время второго сеанса работы:

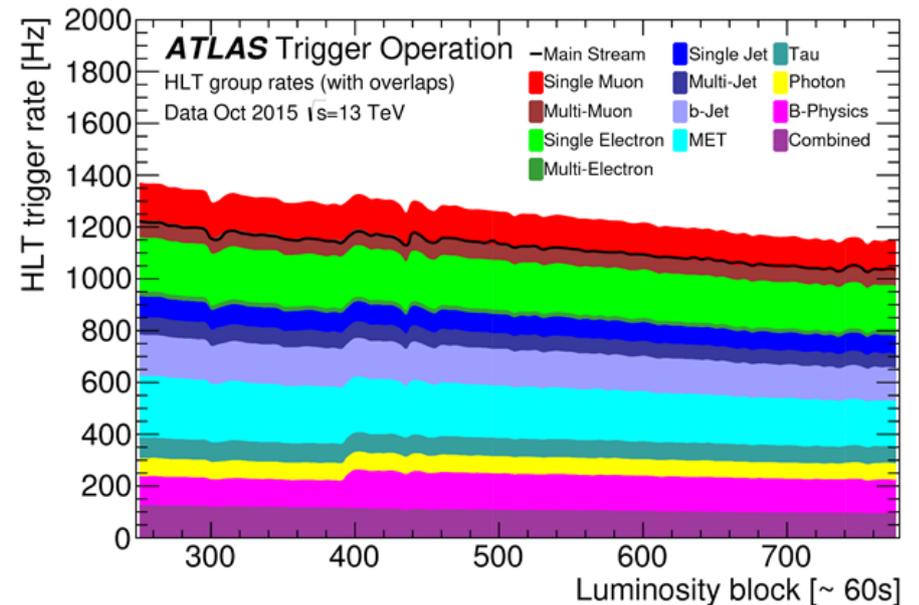
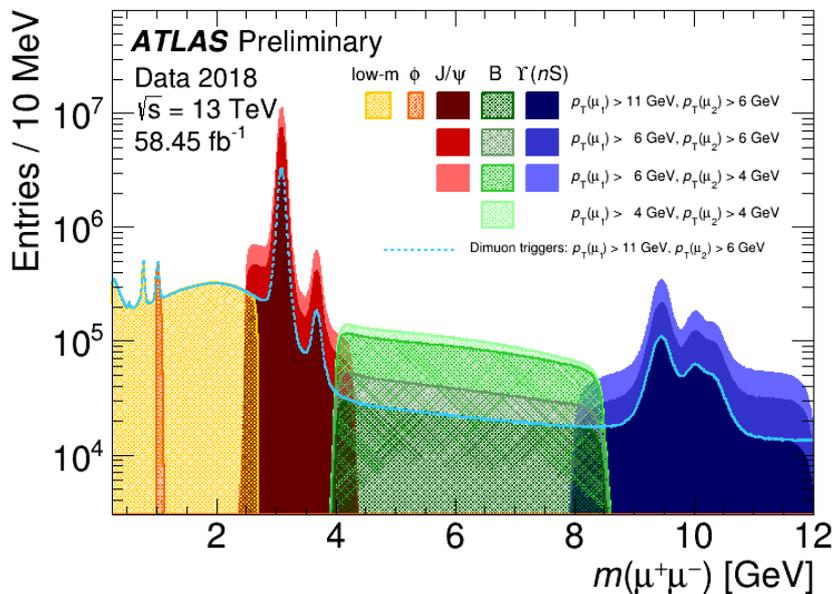
- Триггер первого уровня (L1) снижает поток событий до 100 кГц
- Триггер высокого уровня (HLT) снижает до 1 кГц (поток В-физики ~ 200 Гц)

Триггер В-физики

Основные триггерные алгоритмы триггера В-физики:

- J/ψ и $\psi(2S)$ — 2.5 – 4.3 ГэВ; (Jpsimumu)
- $\Upsilon(nS)$ — 8 – 12 ГэВ;(Upsimumu)
- Редкие распады $B(s)$ — 4 – 8.5 ГэВ; (Bmimumu)
- $B \rightarrow \mu\mu X$ (BМуМуХ) – 1.5 – 14 ГэВ (использует трековую информацию внутреннего детектора)

1. $B^0 \rightarrow \mu\mu K^{*0}$
2. $B_s^0 \rightarrow \mu\mu\phi$
3. $B_c^+ \rightarrow \mu\mu D_s^{*+}(K^+K^-\pi^+)$



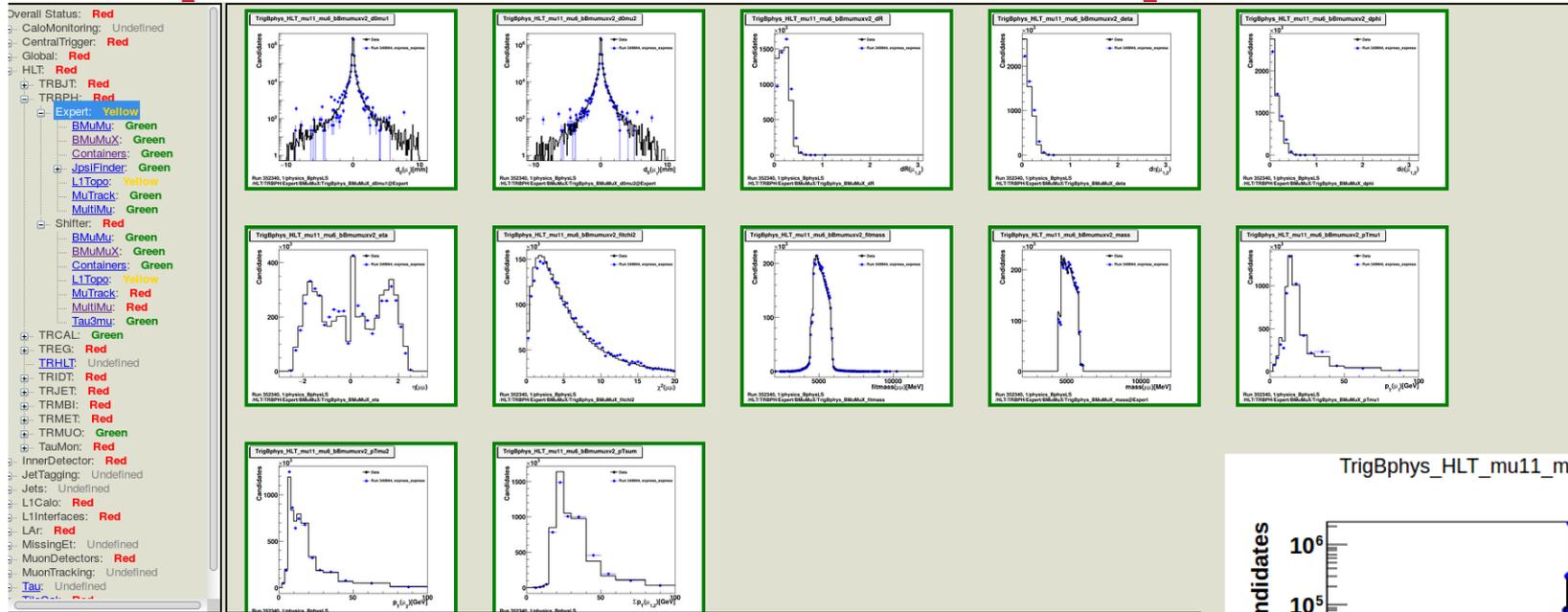
Для регистрации распадов $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ используется триггер J/ψ

Системы мониторинга триггера В-физики

В процессе эксплуатации детектора ATLAS проводится мониторинг систем триггера:

- онлайн мониторинг
 - количество ядер центрального процессора
 - среднее время обработки событий
 - гистограммы кинематических переменных
- Офлайн мониторинг
 - отслеживаются следующие переменные: прицельные параметров треков d_0 и z_0 , координаты вершины рождения В-адрона, η , φ , p_T , как для отдельного мюона, так и для реконструированного кандидата в В-адрон и др.

Офлайн мониторинг

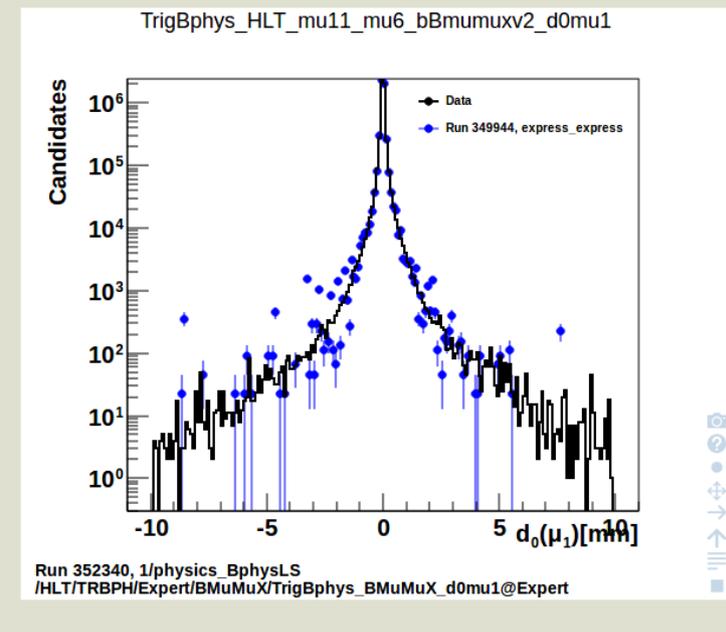


Две группы в Веб Дисплее:

- Эксперт (expert)
- Наблюдатель (shifter)

Используется два теста контроля:

- Сравнение с предыдущим запуском
- Уровень заполнения гистограмм

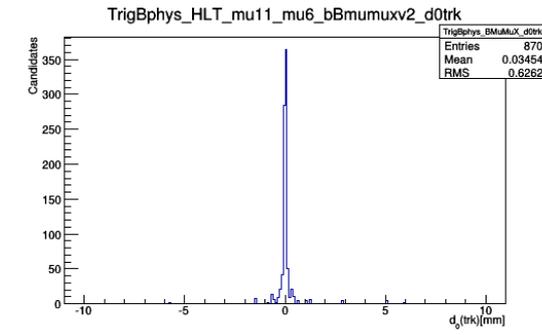
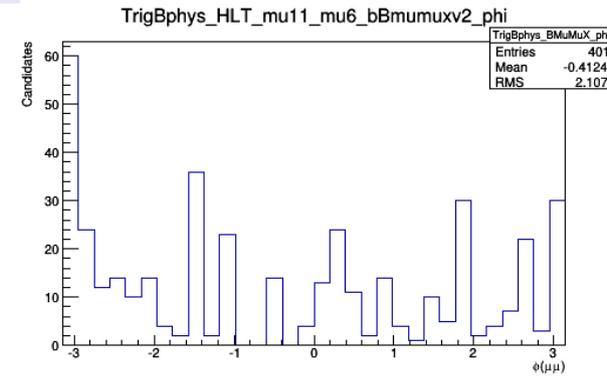
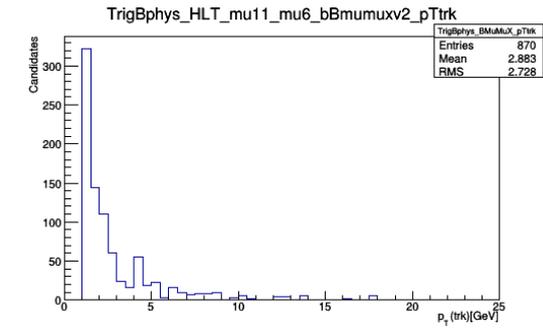
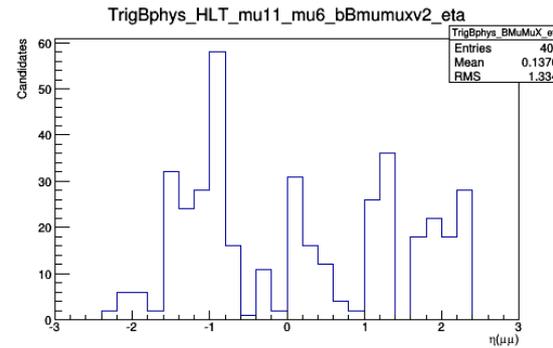
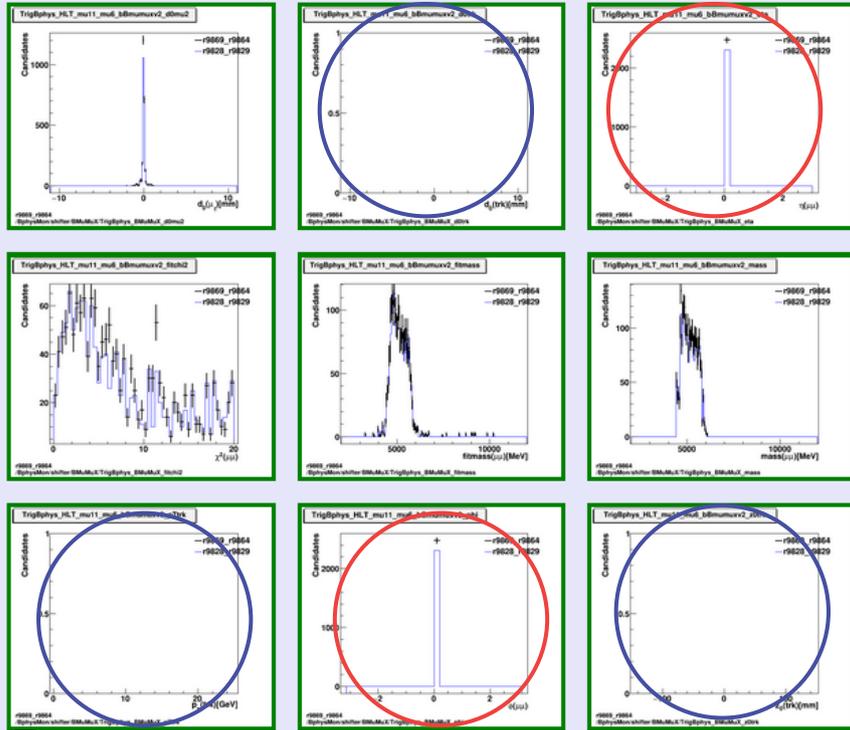


Гистограмма для прицельного параметра d_0 для алгоритма $B \rightarrow \mu\mu X$

Проведено исправление неработающих гистограмм для офлайн мониторинга

r9869_r9864 BphysMon/shifter
/BMuMuX: Green only

[Only Red] [Only Yellow] [Only Green]



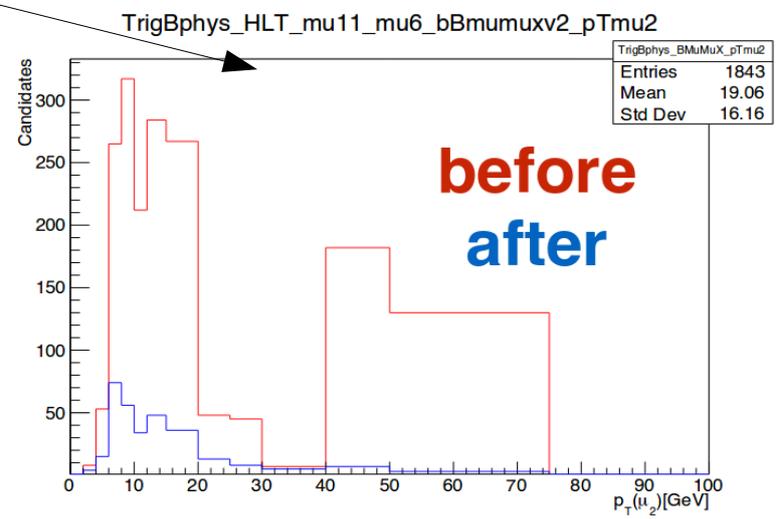
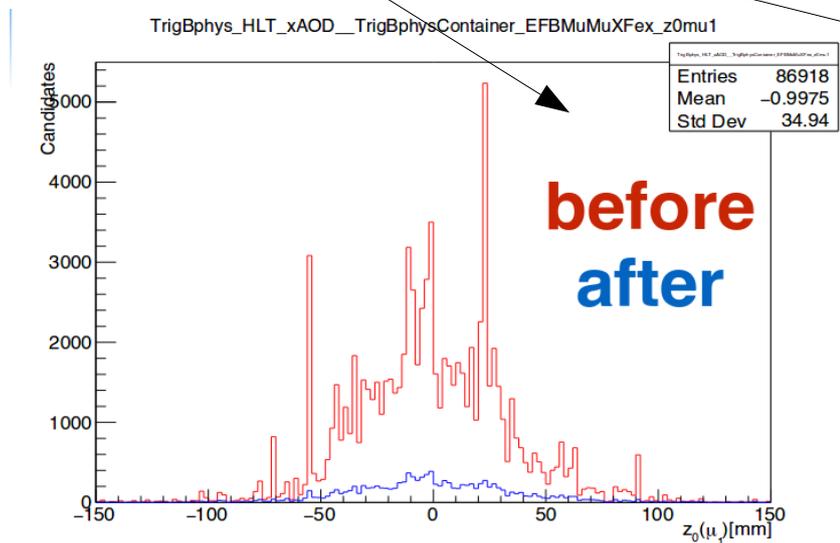
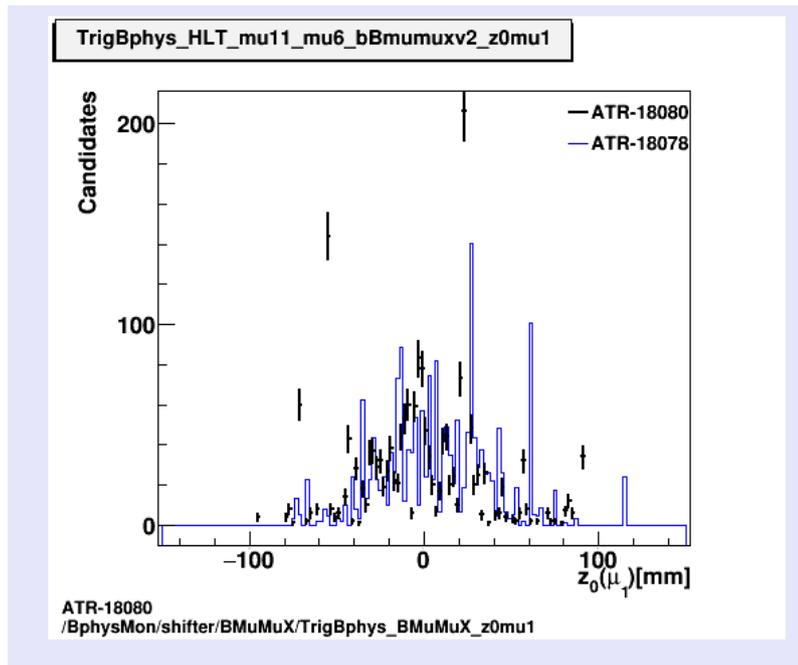
Вид гистограмм до и после внесения исправлений:

- Красные круги — заполненные нулем, а синие круги — пустые гистограммы
- Гистограммы для η и ϕ — нулевые, а гистограммы для p_T , d_0 , z_0 для треков пустые

Достигнутое улучшение регистрации пар мюонов в офлайн мониторинге

В алгоритмах триггера В-физики офлайн мониторинга построения кандидатов в В-адрон одни и те же пары мюонов записывались несколько раз, что порождало выбросы количества событий

Достигнуто улучшение при регистрации пар мюонов, этот эффект исключен
Примеры для алгоритмов $B \rightarrow \mu\mu X$



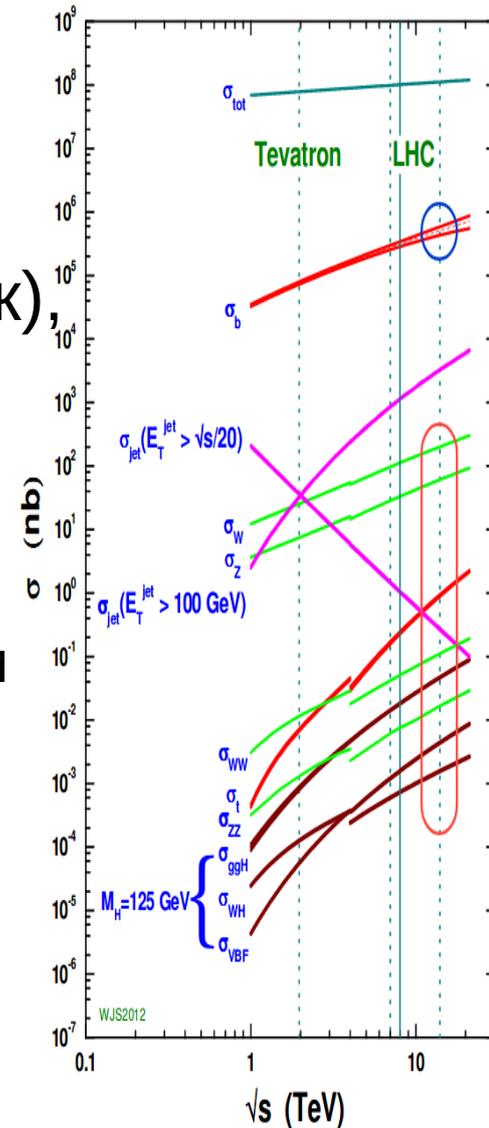
Программа В-физики в эксперименте ATLAS

- Проверка предсказаний на основе КХД:
 - измерение сечений,
 - спектроскопия, кварконий,
 - экзотические адроны (тетракварк и пентакварк),
 - исследования поляризации, асимметрии распада

Проверка электрослабой физики и поиск новой физики - это области, где СМ предсказывает редкие процессы или небольшие эффекты:

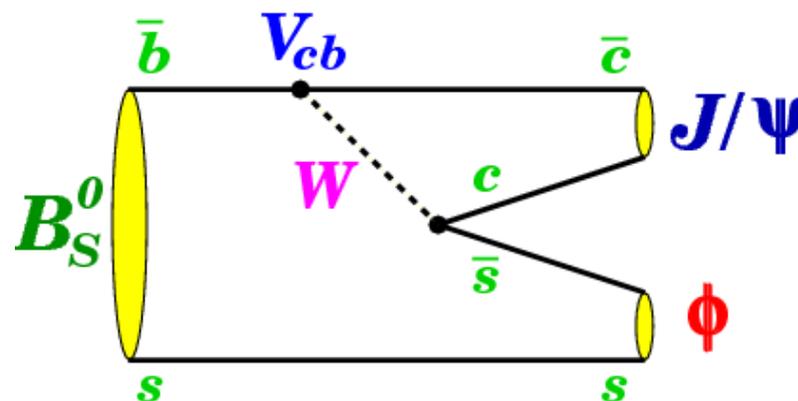
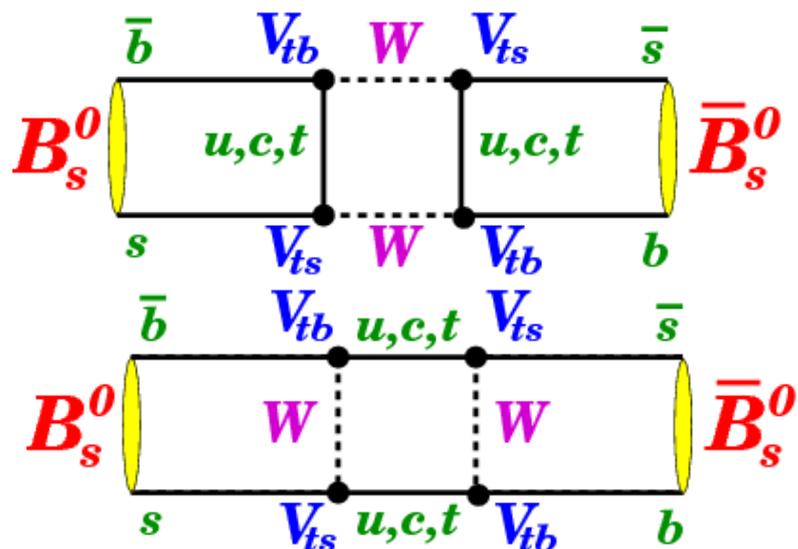
- Слабая фаза ϕ_s в $B_s \rightarrow J/\psi\phi$
- Редкие распады $B_{s,d} \rightarrow \mu\mu$
- Нарушение лептонного аромата ($R(K^*)$)
- Распад $\tau \rightarrow 3\mu$

proton - (anti)proton cross sections



CP-нарушения в $B_s \rightarrow J/\psi\phi$

- В распаде $B_s \rightarrow J/\psi\phi$, CP-нарушения происходят за счет интерференции между прямыми распадами и распадами посредством $B_s - \bar{B}_s$ осцилляций



- На левом рисунке — основные диаграммы Фейнмана для $B_s - \bar{B}_s$ осцилляций
- Справа — диаграмма прямого распада $B_s \rightarrow J/\psi\phi$

Измеряемые параметры CP-нарушений

- Слабая фаза φ_s , которая определяется как разница слабых фаз между амплитудой $V_s - \bar{V}_s$ смешивания и амплитудой распада $b \rightarrow c\bar{c}s$
- В СМ фаза φ_s мала, а ее значение связано с величинами элементов матрицы Кабиббо — Кобаяси — Маскавы(ККМ) посредством соотношения $\varphi_s \approx -2\beta_s$ и равно:

[Phys. Rev. D 91 \(2015\) 073007](#)

$$\bullet \varphi_s \equiv -2\beta_s = -2 \arg\left(\frac{-V_{ts} V_{*tb}}{V_{cs} V_{*cb}}\right) = -0.03696^{+0.00072}_{-0.00082} \text{ рад}$$

- Величина φ_s чувствительна к проявлениям новой физики
- Другая характеристика V_s смешивания это разность ширин распадов легкого V_L и тяжелого V_H мезонов: $\Delta\Gamma_s = \Gamma_L - \Gamma_H$.
- $\Delta\Gamma_s$ не чувствительна к проявлениям новой физики, является контрольным параметром измерений

Данные для анализа

[Eur. Phys. J. C 81 \(2021\) 342](#)

- Использована интегральная светимость 80.5 фб^{-1} , набранная в Run-2 в период 2015-2017гг. при энергии 13 ТэВ
- Триггерные алгоритмы основаны на идентификации распадов $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ с порогами на поперечные импульсы мюонов 4 или 6 ГэВ
- Использовались моделированные Монте-Карло (МК) наборы распадов:
 - $B_s \rightarrow J/\psi\phi$
 - $B_d \rightarrow J/\psi K^*$, $B_d \rightarrow J/\psi K\pi$ и $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K$ для оценки фоновых событий

Реконструкция и отбор событий

[Eur. Phys. J. C 81 \(2021\) 342](#)

Отбор событий

- Хотя бы одна первичная вершина, образованная по меньшей мере четырьмя треками во внутреннем детекторе
- Не менее одной пары $\mu^+\mu^-$, реконструированных с использованием внутреннего детектора и мюонного спектрометра

Реконструкция $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$

- Двухмюонный вершинный фит $\chi^2/\text{d.o.f.} < 10$
- Три двухмюонных массовых окна для разных частей мюонного спектрометра BB/BE/EE (центральная часть (Barrel), торцевая часть (Endcap) детектора)

Реконструкция $\phi \rightarrow K^+K^-$

- $p_T(K) > 1$ ГэВ, не идентифицированных как мюоны
- $1008.5 \text{ МэВ} < m(KK) < 1030.5 \text{ МэВ}$

Реконструкция $B_s \rightarrow J/\psi(\mu\mu)\phi(KK)$

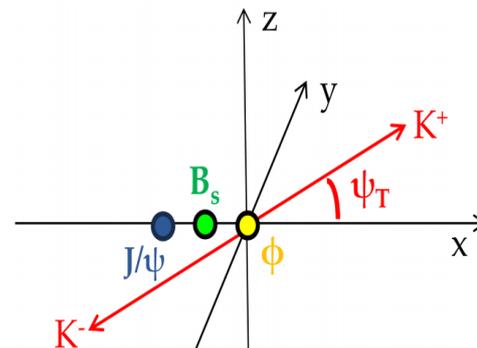
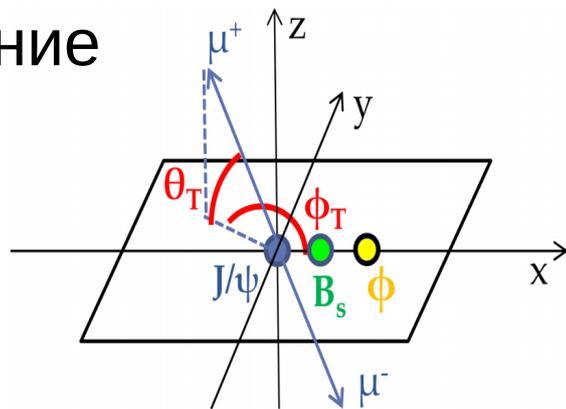
- $p_T(B_s) > 10$ ГэВ
- Четверка треков объединялась в один фит с условием $\chi^2/\text{d.o.f.} < 3$
- Использовался кандидат с наименьшим значением $\chi^2/\text{d.o.f.}$ в событии
- $5150 \text{ MeV} < m(B_s) < 5650 \text{ MeV} \rightarrow$ всего отобранно 2 977 526 B_s кандидатов
- **Нет отбора по времени жизни — разделение фона и сигнала проводилось с помощью фитирования**

Анализ угловых распределений распада

$$B_s \rightarrow J/\psi(\mu\mu)\phi(KK)$$

[Eur. Phys. J. C 81 \(2021\) 342](#)

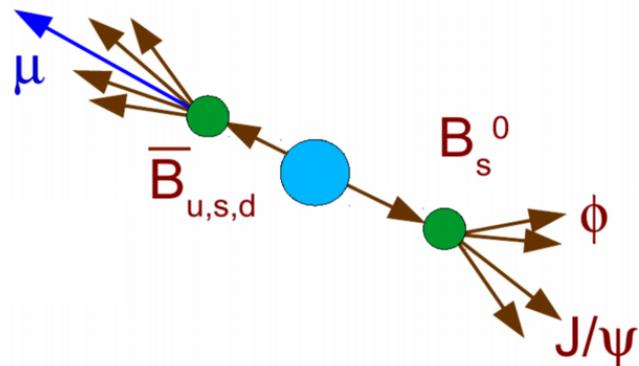
- Распад псевдоскалярного нейтрального $B_s \rightarrow J/\psi(\mu\mu)\phi(KK)$ на конечное состояние с двумя векторными мезонами
- Конечное состояние: суперпозиция из CP-нечетных ($L = 1$) и CP-четных ($L = 0, 2$) состояний
- Статистическое разделение всех этих состояний возможно благодаря угловому анализу продуктов распада
- Не резонансный S-волновой распад $B_s \rightarrow J/\psi KK$ включен в конечное состояние



Схематическое изображение распада $B_s \rightarrow J/\psi(\mu\mu)\phi(KK)$ в системах покоя J/ψ и ϕ -мезонов. Отмечены поперечные углы $(\theta_T, \phi_T, \psi_T)$

Метод мечения B_s (типа b-кварка)

- Начальный аромат нейтрального B-мезона может быть восстановлен с использованием информации от противоположного B-адрона, содержащего парный к исходному b-кварк (opposite-side tagging, OST)
- Методы мечения:
 - электрический заряд электрона
 - электрический заряд мюона
 - электрический заряд струи b-адрона (если отсутствует лептон)



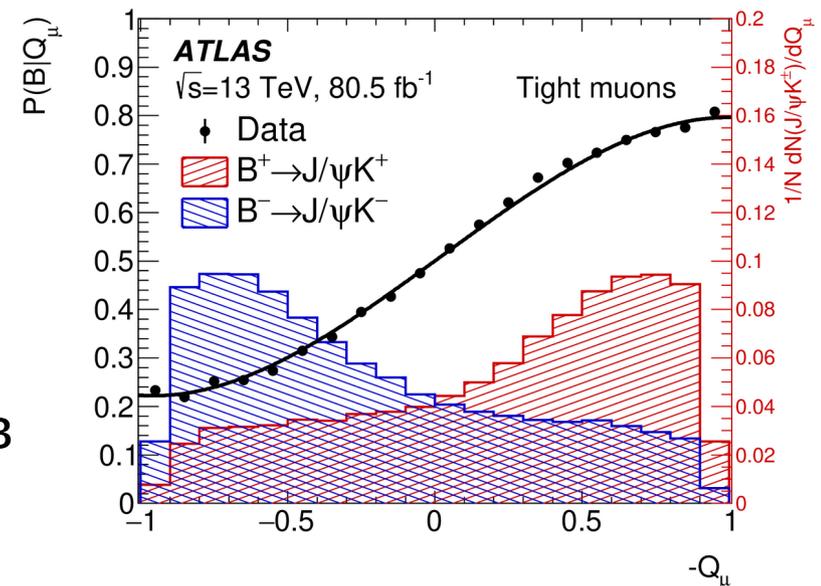
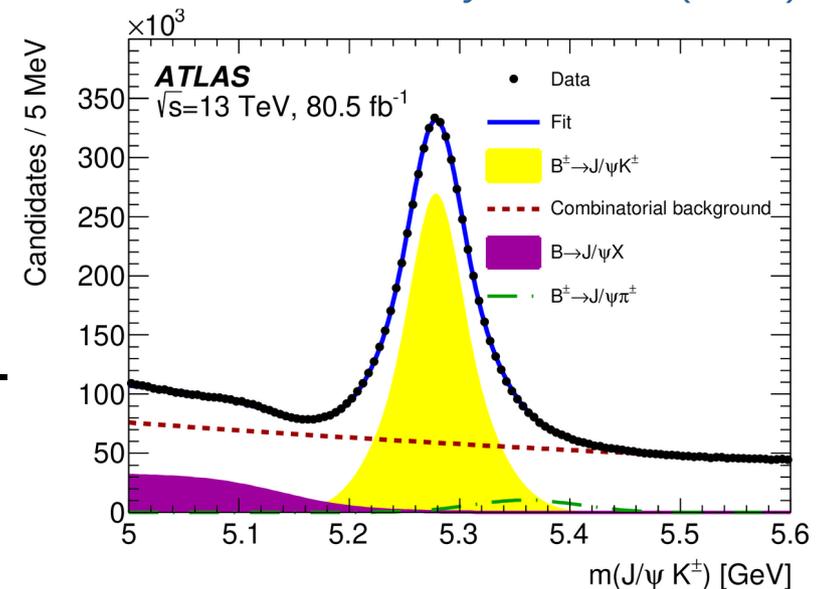
B_s мечение аромата

Eur. Phys. J. C 81 (2021) 342

- Используем b - \bar{b} корреляцию для определения начального аромата B -мезона
- $b \rightarrow l$ переход чистый метод
- $b \rightarrow c \rightarrow l$ и осциляции нейтрального B -мезона разбавляют мечение
- Для выбранного мюона, электрона или струи строится заряд:

$$Q_x = \frac{\sum_i^{N \text{ tracks}} q_i \cdot (p_{Ti})^\kappa}{\sum_i^{N \text{ tracks}} (p_{Ti})^\kappa} \longrightarrow P(Q|B^\pm) \quad Q \in \langle -1, 1 \rangle$$

- Распад $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$ использовался для калибровки мечения аромата
- Вероятность того, что B -мезон образуется в состоянии, содержащем анти b -кварк
- $P(B|Q_x) = P(Q_x|B^+) / (P(Q_x|B^+) + P(Q_x|B^-))$



Качество процедуры мечения

[Eur. Phys. J. C 81 \(2021\) 342](#)

Tag method	ϵ_x [%]	D_x [%]	T_x [%]
Tight muon	4.50 ± 0.01	43.8 ± 0.2	0.862 ± 0.009
Electron	1.57 ± 0.01	41.8 ± 0.2	0.274 ± 0.004
Low- p_T muon	3.12 ± 0.01	29.9 ± 0.2	0.278 ± 0.006
Jet	12.04 ± 0.02	16.6 ± 0.1	0.334 ± 0.006
Total	21.23 ± 0.03	28.7 ± 0.1	1.75 ± 0.01

- Эффективность ϵ_x : отношение числа В-кандидатов, меченных данным методом, к полному числу кандидатов:
$$\epsilon_x = \frac{N_{tagged}}{N_{Bcand}}$$
- Коэффициент разбавления D_x (dilution) : $D = (1 - 2w)$, где w — вероятность ошибочного мечения
- Мощность мечения T_x (tagging power) : показатель качества работы мечения
 - Зависит от разбавления и эффективности:
$$TP = \epsilon D^2 = \epsilon(1 - 2w)^2$$

Фит методом наибольшего правдоподобия

[Eur. Phys. J. C 81 \(2021\) 342](#)

Проводится одновременное фитирование массы, времени жизни и угловых распределений методом наибольшего правдоподобия

$$\ln \mathcal{L} = \sum_{i=1}^N w_i \cdot \ln [f_s \cdot \mathcal{F}_s(m_i, t_i, \sigma_{m_i}, \sigma_{t_i}, \Omega_i, P_i(B|Q_x), p_{T_i}) + f_s \cdot f_{B^0} \cdot \mathcal{F}_{B^0}(m_i, t_i, \sigma_{m_i}, \sigma_{t_i}, \Omega_i, P_i(B|Q_x), p_{T_i}) + f_s \cdot f_{\Lambda_b} \cdot \mathcal{F}_{\Lambda_b}(m_i, t_i, \sigma_{m_i}, \sigma_{t_i}, \Omega_i, P_i(B|Q_x), p_{T_i}) + (1 - f_s \cdot (1 + f_{B^0} + f_{\Lambda_b})) \mathcal{F}_{\text{bkg}}(m_i, t_i, \sigma_{m_i}, \sigma_{t_i}, \Omega_i, P_i(B|Q_x), p_{T_i})]$$

Сигнал

Фон $B_d \rightarrow J/\psi K^*$ и $\Lambda_b \rightarrow J/\psi K p$

Комбинаторные фоновые процессы

Вес для учета эффективности триггера

Физические параметры:

- Фаза φ_s
- Ширины распада: $\Delta\Gamma_s, \Gamma_s$
- Амплитуды распада: $|A_0(0)|^2, |A_{\parallel}(0)|^2, \delta_{\parallel}, \delta_{\perp}$
- S-волна: $|A_s(0)|^2, \delta_s$
- Δm_s фиксировано (PDG)

Переменные:

- Базовые переменные: m_i, t_i, Ω_i
- Переменные для каждого кандидата:
 - Неопределенность: σ_m, σ_t
 - Вероятность тагирования и метод: $P(B|Q)$

Функции плотности вероятности (probability density function, PDF)

$$\ln \mathcal{L} = \sum_{i=1}^N \{w_i \cdot \ln(f_s \mathcal{F}_s + f_s f_{B^0} \mathcal{F}_{B^0} + f_s f_{\Lambda_b} \mathcal{F}_{\Lambda_b} + (1 - f_s(1 + f_{B^0} + f_{\Lambda_b})) \mathcal{F}_{\text{bkg}})\}$$

- Вклад от $B_d \rightarrow J/\psi K^*$, $B_d \rightarrow J/\psi K\pi$ и $\Lambda_b \rightarrow J/\psi pK$
- Эти распределения моделируются с учетом эффектов акцептанса и затем описываются с помощью полиномов Лежандра
- Фиксированы в основном фите
- Доли $f(B_d)=(4.3\pm 0.5)\%$ и $f(\Lambda_b)=(2.1\pm 0.6)\%$
 - Эффективности отбора и акцептанс, используя МК
 - Парциальные ширины (Br) из PDG
 - Вероятности фрагментации b -кварка из предыдущих измерений
- Комбинаторные фоновые процессы:
 - Масса: экспонента+константа
 - Время: дельта-функция и 3 экспоненты, используя σ_t
 - Углы: Лежандра полиномы в боковых областях спектра, фиксированы в основном фите

Систематические неопределенности

[Eur. Phys. J. C 81 \(2021\) 342](#)

	ϕ_s [10 ⁻³ rad]	$\Delta\Gamma_s$ [10 ⁻³ ps ⁻¹]	Γ_s [10 ⁻³ ps ⁻¹]	$ A_{ }(0) ^2$ [10 ⁻³]	$ A_{0}(0) ^2$ [10 ⁻³]	$ A_S(0) ^2$ [10 ⁻³]	δ_{\perp} [10 ⁻³ rad]	$\delta_{ }$ [10 ⁻³ rad]	$\delta_{\perp} - \delta_S$ [10 ⁻³ rad]
■ Tagging	19	0.4	0.3	0.2	0.2	1.1	17	19	2.3
ID alignment	0.8	0.2	0.5	< 0.1	< 0.1	< 0.1	11	7.2	< 0.1
■ Acceptance	0.5	0.3	< 0.1	1.0	0.9	2.9	37	64	8.6
Time efficiency	0.2	0.2	0.5	< 0.1	< 0.1	0.1	3.0	5.7	0.5
Best candidate selection	0.4	1.6	1.3	0.1	1.0	0.5	2.3	7.0	7.4
■ Background angles model:									
Choice of fit function	2.5	< 0.1	0.3	1.1	< 0.1	0.6	12	0.9	1.1
Choice of p_T bins	1.3	0.5	< 0.1	0.4	0.5	1.2	1.5	7.2	1.0
Choice of mass window	9.3	3.3	0.2	0.4	0.8	0.9	17	8.6	6.0
Choice of sidebands intervals	0.4	0.1	0.1	0.3	0.3	1.3	4.4	7.4	2.3
Dedicated backgrounds:									
■ B_d^0	2.6	1.1	< 0.1	0.2	3.1	1.5	10	23	2.1
■ Λ_b	1.6	0.3	0.2	0.5	1.2	1.8	14	30	0.8
Alternate Δm_s	1.0	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	15	4.0	< 0.1
■ Fit model:									
Time res. sig frac	1.4	1.1	0.5	0.5	0.6	0.8	12	30	0.4
Time res. p_T bins	0.7	0.5	0.8	0.1	0.1	0.1	2.2	14	0.7
S-wave phase	0.3	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.2	8.0	15	37
Fit bias	5.7	1.3	1.2	1.3	0.4	1.1	3.3	19	0.3
Total	22	4.3	2.2	2.3	3.8	4.6	55	88	39

Систематическим погрешности, связанным с методикой калибровки процедуры тагирования
Угловой аксептанс рассчитывается с помощью модельных сигнальных событий в бинах по углам и поперечному импульсу

Угловые распределения для фона: выборы функции фитирования, количества бинов, интервала массы

Вклад событий $B_d \rightarrow J/\psi K^*$, ошибочно реконструированных как $B_s \rightarrow J/\psi \phi$

Вклад событий $\Lambda_b \rightarrow J/\psi K^0$, ошибочно реконструированных как $B_s \rightarrow J/\psi \phi$

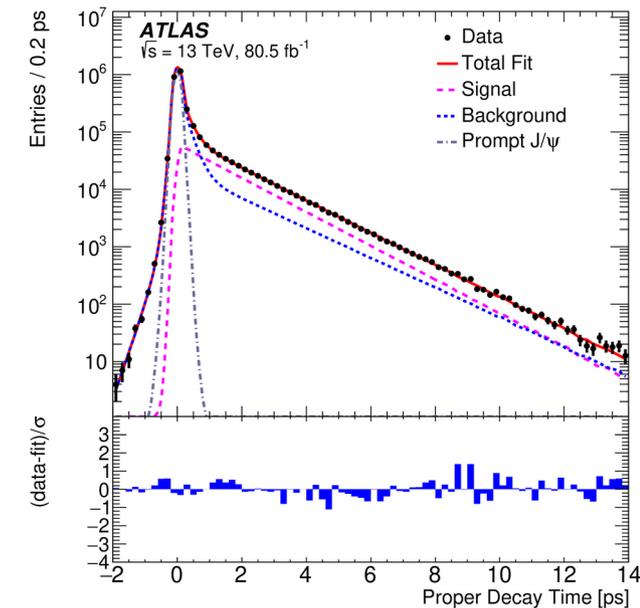
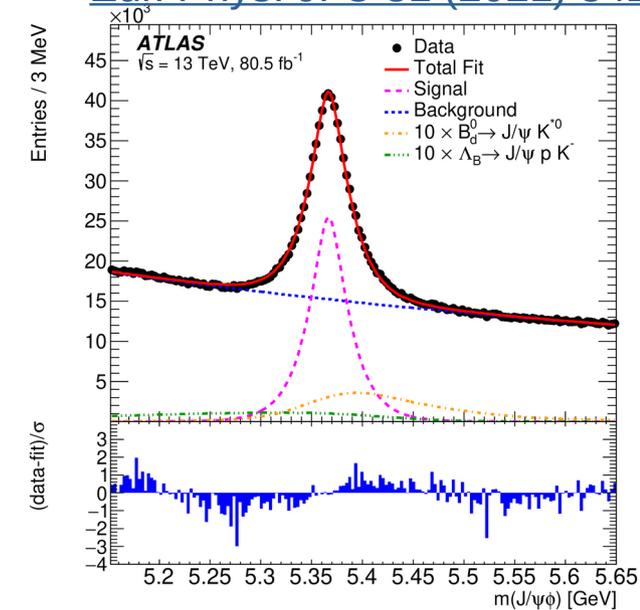
Вариации модели фита. Систематические эффекты, связанные с выбором модели фита

Проекции и результаты фита

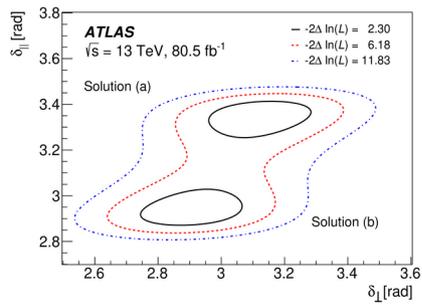
Eur. Phys. J. C 81 (2021) 342

Проводится одновременное фитирование массы, времени жизни и угловых распределений

Parameter	Value	Statistical uncertainty	Systematic uncertainty
ϕ_s [rad]	-0.081	0.041	0.022
$\Delta\Gamma_c$ [ps ⁻¹]	0.0607	0.0047	0.0043
Γ_s [ps ⁻¹]	0.6687	0.0015	0.0022
$ A_{ }(0) ^2$	0.2213	0.0019	0.0023
$ A_0(0) ^2$	0.5131	0.0013	0.0038
$ A_S(0) ^2$	0.0321	0.0033	0.0046
$\delta_{\perp} - \delta_S$ [rad]	-0.25	0.05	0.04
Solution (a)			
δ_{\perp} [rad]	3.12	0.11	0.06
$\delta_{ }$ [rad]	3.35	0.05	0.09
Solution (b)			
δ_{\perp} [rad]	2.91	0.11	0.06
$\delta_{ }$ [rad]	2.94	0.05	0.09



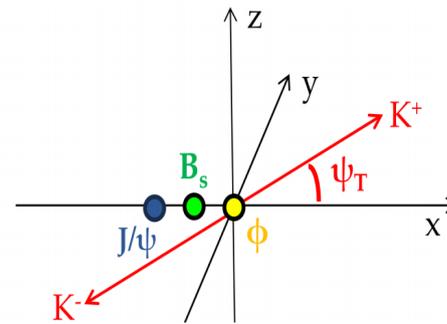
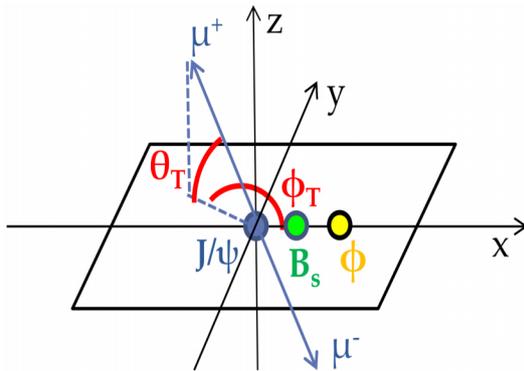
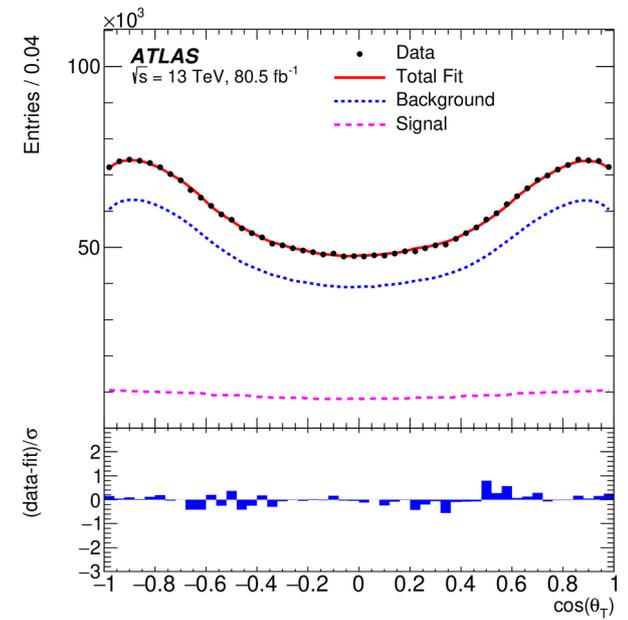
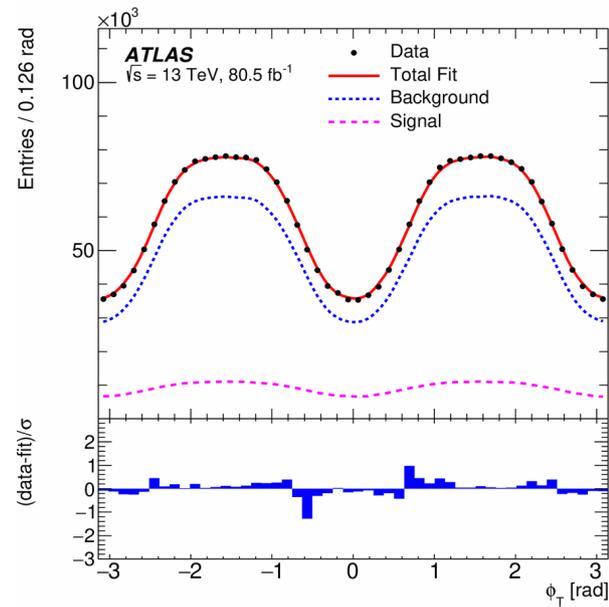
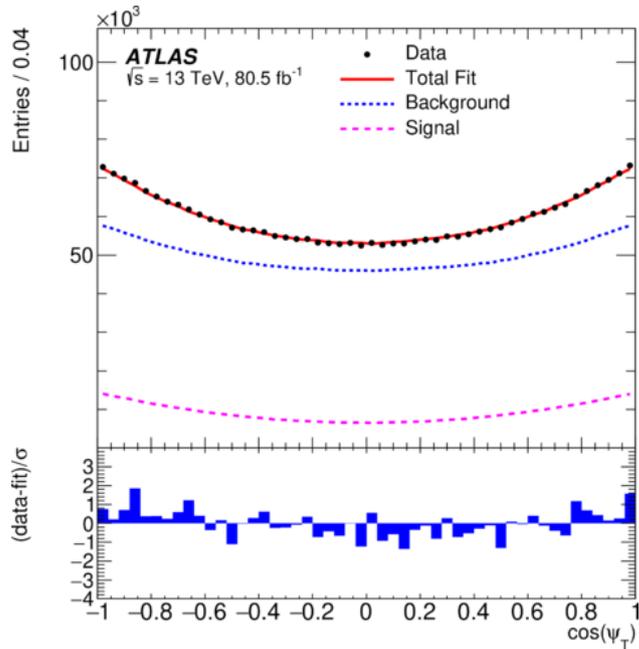
Для сильных фаз δ_{\perp} и $\delta_{||}$ найдены два хорошо разделенных локальных максимума правдоподобия с $-2\Delta\ln(L)=0.03$



$$t = \frac{L^{xy} m^B}{p_{T_B}}$$

Угловые распределения продуктов распада

Eur. Phys. J. C 81 (2021) 342



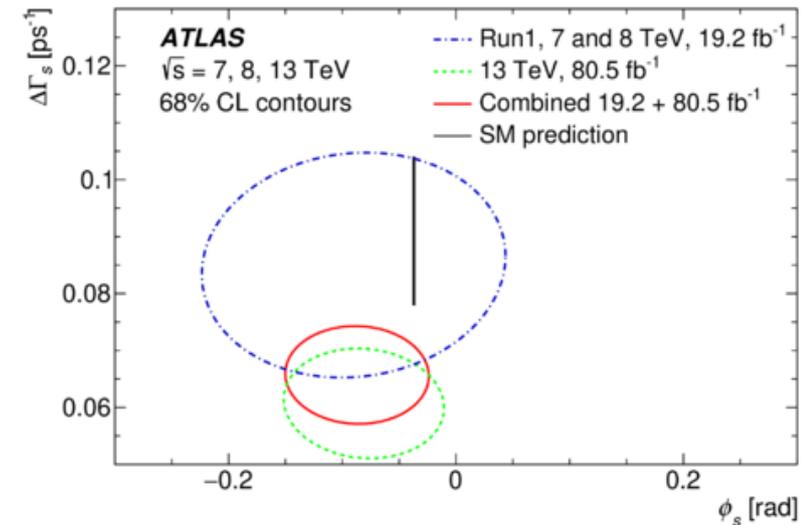
Статистическое объединение результатов Run-2 с результатами Run-1

[Eur. Phys. J. C 81 \(2021\) 342](#)

Объединение ATLAS Run 1 & Run 2
(19.2 fb^{-1} + 80.5 fb^{-1}):

Run 1 (19.2 fb^{-1}) & Run 2 (80.5 fb^{-1}):

Parameter	Value	Solution (a)		Solution (b)		
		Statistical uncertainty	Systematic uncertainty	Value	Statistical uncertainty	Systematic uncertainty
ϕ_s [rad]	-0.087	0.036	0.021	-0.087	0.036	0.021
$\Delta\Gamma_s$ [ps^{-1}]	0.0657	0.0043	0.0037	0.0657	0.0043	0.0037
Γ_s [ps^{-1}]	0.6703	0.0014	0.0018	0.6704	0.0014	0.0018
$ A_{\parallel}(0) ^2$	0.2220	0.0017	0.0021	0.2218	0.0017	0.0021
$ A_0(0) ^2$	0.5152	0.0012	0.0034	0.5152	0.0012	0.0034
$ A_S ^2$	0.0343	0.0031	0.0045	0.0348	0.0031	0.0045
δ_{\perp} [rad]	3.22	0.10	0.05	3.03	0.10	0.05
δ_{\parallel} [rad]	3.36	0.05	0.09	2.95	0.05	0.09
$\delta_{\perp} - \delta_S$ [rad]	-0.24	0.05	0.04	-0.24	0.05	0.04



Статистическое объединение с Run1 результатами ATLAS :

- 4.9 fb^{-1} (7 ТэВ, pp 2011)
- 14.3 fb^{-1} (8 ТэВ, pp 2012) — статическое объединение с 7 TeV

Последние результаты БАК

Run2 ATLAS:

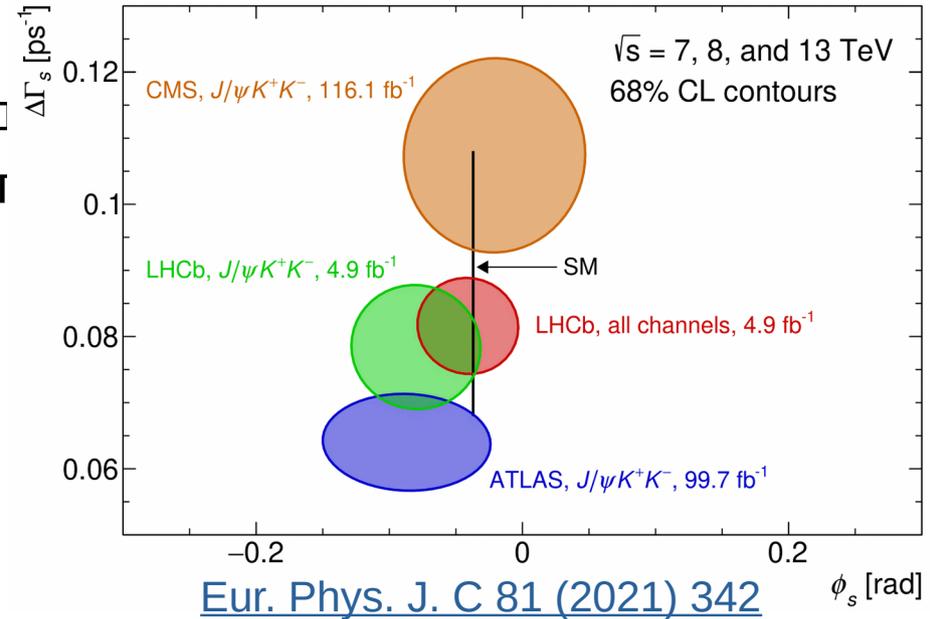
- $\phi_s = -0.087 \pm 0.036$ (стат.) ± 0.021 (сист.) рад
- $\Delta\Gamma_s = 0.0657 \pm 0.0043$ (стат.) ± 0.0037 (сист.) пс⁻¹

Run2+Run1 ATLAS:

- $\phi_s = -0.087 \pm 0.036$ (стат.) ± 0.021 (сист.) рад
- $\Delta\Gamma_s = 0.0657 \pm 0.0043$ (стат.) ± 0.0037 (сист.) пс⁻¹

Мировое среднее (HFLAV 2021):

- $\phi_s = -0.050 \pm 0.019$ рад
- $\Delta\Gamma_s = 0.082 \pm 0.005$ пс⁻¹



$B_s \rightarrow J/\psi K K$	ϕ_s [рад]
LHCb 4.9 fb ⁻¹ Объединение с 3 другими каналами, EUR. PHYS. J. C 79 (2019) 706	-0.042 ± 0.025
CMS 96.4 fb ⁻¹ Run2 объединение с Run1, CMS-PAS-BPH-20-001	-0.021 ± 0.045
ATLAS 80.5 fb ⁻¹ • Run2 объединение с Run1, Eur. Phys. J. C 81 (2021) 342	-0.087 ± 0.036 (стат.) ± 0.021 (сист.)

Основные результаты работы

- 1) Проведены работы по улучшению детектора ATLAS во время второго сеанса (Run-2)
 - Участие в тестовых запусках для детектора TRT и калибровка данных (2016 г)
 - Улучшение мониторинга триггера В-физики
- 2) В рамках анализа по измерению параметров CP-нарушения в распадах $B_s \rightarrow J/\psi\phi$
 - Проведен расчет доли фоновых событий $B_d \rightarrow J/\psi K^*$, $B_d \rightarrow J/\psi K\pi$ и $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K$
 - Выполнен расчет систематических неопределенностей за счет вклада фоновых процессов и времени жизни B_d и Λ_b
- 3) Проведено измерение параметров ϕ_s и $\Delta\Gamma_s$ CP-нарушений в распадах $B_s \rightarrow J/\psi\phi$

Доклады на конференциях

Международные:

1. The XXIV International Workshop High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP 2019, 22-29 сентября 2019 , Сочи, Россия);
2. Moscow International School of Physics 2020 (3-9 марта 2020, Учебный центр "Вороново" НИУ ВШЭ, Россия);
3. Conference on Flavour Physics and CP violation (FPCP 2020, 8-12 июня 2020, Испания, онлайн)
4. The 5th international conference on particle physics and astrophysics (ICPPA 2020, Россия, онлайн)
5. The 10th International Workshop on CHARM Physics (CHARM 2021, 31 мая - 4 июня 2021, Мексика, онлайн)

Помимо международных конференций сделаны доклады в «Ломоносовских чтениях», Межвузовской научной школе молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» и межинститутской молодёжной конференции «Физика элементарных частиц и космология»

Всего докладов на конференциях: 14

Публикации

Публикации, удовлетворяющие ВАК:

1. Мешков О.В. Системы мониторинга триггера В-физики в эксперименте ATLAS Большого адронного коллайдера// Ученые записки физического факультета Московского Университета, 2019, № 2, с. 1920202
2. Синецкий В.В., Мешков О.В., Смирнова Л.Н. Исследования нарушения лептонного аромата, CP-инвариантности и $R(K^*)$ аномалии в экспериментах на БАК // Ученые записки физического факультета Московского Университета, № 3, 2019, с. 1930404
3. Мешков О.В., Смирнова Л.Н. Газовые детекторы для идентификации частиц при высоких энергиях// Ученые записки физического факультета Московского Университета, 2017, № 3, с. 173204-1-173204-8
4. ATLAS Collaboration, Measurement of the CP-violating phase ϕ_s in $B \rightarrow J/\psi\phi$ decays in ATLAS at 13 TeV // Eur. Phys. J. C 81 (2021) 342, arXiv:2001.07115
5. ATLAS Collaboration, Performance of the ATLAS muon triggers in Run 2 // JINST 15 (2020) P09015, arXiv:2004.13447

Дополнительные слайды

Временные и угловые функции

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

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

Расчет вклада фоновых процессов для B_d

- Для расчета вклада от $B_d \rightarrow J/\psi K^*$ и $B_d \rightarrow J/\psi K\pi$:

$$Fr_{Bd J/\psi K^*} = \frac{f_d}{f_s} \frac{Br(Bd \rightarrow J/\psi K^*) * Br(K^* \rightarrow K^+ \pi^-) eff_{BdJpsiKstar}}{Br(Bs \rightarrow J/\psi \phi) * Br(\phi \rightarrow K^+ K^-) eff_{BsJpsiPhi}}$$

$$Fr_{Bd K\pi} = \frac{f_d}{f_s} \frac{Br(Bd \rightarrow J/\psi K^+ \pi^-) S-wave eff_{BdJpsiKpi}}{Br(Bs \rightarrow J/\psi \phi) * Br(\phi \rightarrow K^+ K^-) eff_{BsJpsiPhi}}$$

- Если использовать переменные из таблицы, то получаются:

- $Fr_{K^*} = (3.68 \pm 0.42)\%$
- $Fr_{K\pi} = (0.63 \pm 0.08)\%$

- $Fr_{B_d} = 4.31 \pm 0.43\%$

Переменная	Значение
f_s/f_d	0.259 ± 0.015 PDG 2018
$Br(Bs \rightarrow J/\psi \phi)$	$(1.08 \pm 0.08) * 10^{-3}$ PDG 2018
$Br(Bd \rightarrow J/\psi K^+ \pi^-)_{tot}$	$(1.079 \pm 0.0011) * 10^{-3}$ PDG 2018
P-волна	0.735 ± 0.007 PDG 2018
$Br(\phi \rightarrow K^+ K^-)$	0.492 ± 0.005 PDG 2018
S-волна	0.157 ± 0.008 PDG 2018
$eff_{BdJ/\psi Kstar}$	0.000577 ± 0.000035 MC 2017
$eff_{BdJ/\psi Kpi}$	0.000460 ± 0.000036 MC 2017
$eff_{BsJ/\psi \phi}$	0.090300 ± 0.000704 MC 2017

Расчет вклада фоновых процессов для Λ_b

Для расчет вклада от $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K^-$:

$$Fr_{\Lambda_b J/\psi p K^-} = \frac{f_{\Lambda_b}}{f_s} \frac{Br(\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K^-)}{Br(Bs \rightarrow J/\psi \phi) * Br(\phi \rightarrow K^+ K^-)} \frac{eff_{\Lambda J\psi p K^-}}{eff_{Bs J\psi p K^-}}$$

$$Fr_{\Lambda_b J/\psi p K^-} = \frac{N_{\Lambda_b LHCb}}{N_{B_d LHCb}} \frac{f_d}{f_s} \frac{Br(Bd \rightarrow J/\psi K^+ \pi^-) p\text{-wave}}{Br(Bs \rightarrow J/\psi \phi) * Br(\phi \rightarrow K^+ K^-)} \frac{eff_{Lb J\psi p K^-}}{eff_{Bs J\psi p K^-}}$$

Если брать значения из таблицы, то получается:

$$Fr_{\Lambda_b} = (2.13 \pm 0.36)\%$$

Variable	Value
f_s/f_d	0.259 ± 0.015 PDG 2018
$Br(Bs \rightarrow J/\psi \phi)$	$(1.08 \pm 0.08) * 10^{-3}$ PDG 2018
$Br(Bd \rightarrow J/\psi K^+ \pi^-)_{tot}$	$(1.079 \pm 0.0011) * 10^{-3}$ PDG 2018
$N_{\Lambda_b LHCb}$	15581 LHCb
$N_{bd LHCb}$	97506 LHCb
S-волна	0.157 ± 0.008 PDG 2018
$Br(\phi \rightarrow K^+ K^-)$	0.492 ± 0.005 PDG 2018
$eff_{Lb J/\psi p K^-}$	0.002090 ± 0.000152 MC 2017
$eff_{Bs J/\psi \phi}$	0.090300 ± 0.000704 MC 2017