

Тема научно-квалификационной работы: Измерение параметров CP-нарушений в распадах $B(s)$ мезонов в эксперименте ATLAS

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

Аспирант: Мешков Олег Васильевич

Развернутый отчет.

1. Работа в детекторе ATLAS.

ATLAS является универсальным детектором с широким спектром задач. Это определяет состав и параметры различных компонентов детектора. Общий вид детектора изображен на рис. 1.

Магнитная система ATLAS создаёт магнитное поле, необходимое для отклонения траекторий заряженных частиц и измерения их импульсов по искривлению треков. Она состоит из сверхпроводящего соленоида во внутренней области детектора и трёх больших сверхпроводящих тороидов на его периферии: одного в цилиндрической части и двух в торцевых частях. Именно структура магнитной системы определяет общий вид и большие размеры всей установки ATLAS. Детектирующие подсистемы ATLAS включают трековый внутренний детектор (Inner Detector, ID), расположенный ближе всего к точке соударения пучков, систему калориметров, окружающую внутренний детектор, и мюонный спектрометр (Muon Spectrometer, MS), находящийся во внешней части детектора ATLAS.

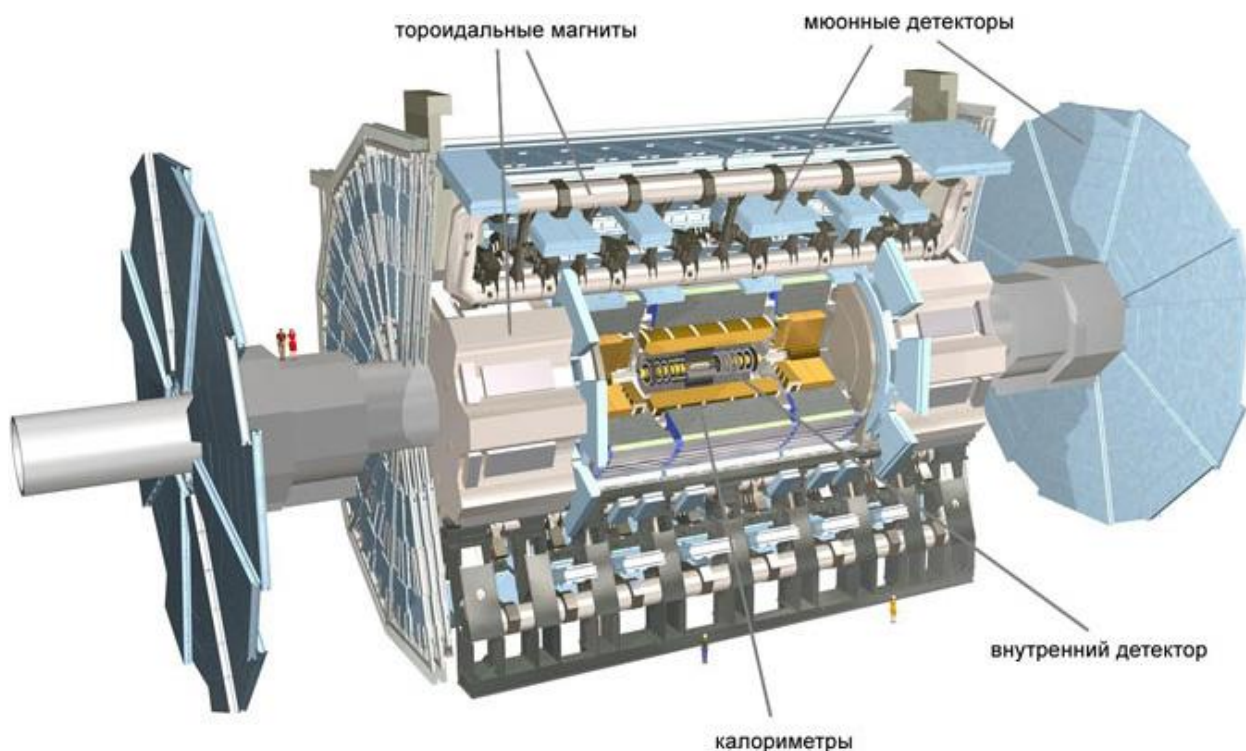


Рис.1. Схематичный вид установки ATLAS. Показаны размеры детектора, отмечены отдельные подсистемы.

Внутренний детектор, находящийся ближе всего к точке столкновения пучков, предназначен для реконструкции треков заряженных частиц, измерения их импульсов и реконструкции вершин. Он расположен внутри сверхпроводящего соленоида, создающего магнитное поле величиной 2 Т. Он состоит из трёх подсистем: кремниевых пиксельного детектора (Pixel Detector) и полупроводникового микрострипового детектора (Semiconductor Tracker, SCT) и газонаполненного трекового детектора переходного излучения (Transition Radiation Tracker, TRT).

Мюонный спектрометр находится на периферии детектора и предназначен для идентификации мюонов, реконструкции их треков и прецизионного измерения импульсов. Мюоны имеют высокую проникающую способность и слабо поглощаются калориметрами, поэтому в мюонном спектрометре регистрируются в основном только мюоны. Присутствие мюонов с определёнными характеристиками часто свидетельствует о наличии интересного с физической точки зрения процесса в данном событии, поэтому информация из мюонных камер используется триггерами ATLAS.

Мюонный спектрометр включает четыре типа газонаполненных камер: мониторируемые дрейфовые трубки (Monitored Drift Tubes, MDT) и катодные полосковые камеры (Cathode Strip Chambers, CSC), служащие для прецизионного измерения импульсов мюонов и координат их треков, и камеры с резистивными пластинами (Resistive Plate Chambers, RPC) и тонкозазорные камеры (Thin Gap Chambers, TGC), используемые для триггерного отбора событий с мюонами.

ATLAS работает с большими потоками данных, соответствующих 10^9 соударений протонов в секунду. Только некоторые из этих событий содержат интересную информацию, которая может привести к более глубокой проверке Стандартной модели и наблюдению новой физики. Для того, чтобы уменьшить поток данных, используется триггерная система отбора событий. Во втором сеансе работы (Run-2) при увеличенной светимости до $1.7 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и энергии соударений до 13 ТэВ триггер имел двух уровневую систему отбора событий. Триггер первого уровня (Level-1, L1) работает с информацией от калориметра и мюонных детекторов и выполнен на аппаратном уровне, а последующий триггер высокого уровня (High-Level Trigger, HLT) используют программные алгоритмы.

Схема триггера детектора ATLAS для Run-2 изображена на рис. 2. Для отбора событий с b -адронами используется триггер В-физики.

Триггер В-физики реализован с помощью программных алгоритмов, включенных в триггер высокого уровня. По величине инвариантной массы мюонов выделяются три типа алгоритмов: для распадов J/ψ и $\psi(2S)$ со

значениями $m_{\mu\mu}$ в интервале 2.5–4.3 ГэВ, для редких распадов со значениями $m_{\mu\mu}$ в интервале 4–8.5 ГэВ, для сигналов $Y(nS)$ со значениями $m_{\mu\mu}$ в интервале 8–12 ГэВ.

Для триггера распадов $B \rightarrow \mu\mu X$ в широком интервале $m_{\mu\mu}$ 1.5–14 ГэВ применяются специальные триггеры для отбора событий типа: $B_0 \rightarrow \mu\mu K^{*0}$, $B_s^0 \rightarrow \mu\mu\phi$, $B_c^+ \rightarrow \mu\mu D_s^{*+} (K^+ K^- \pi^+)$.

Для становления полноценным автором коллаборации детектора ATLAS была выполнена квалификационная работа в триггере В-физики. Цель этой работы состояла в расширении доступных онлайн и офлайн средств мониторинга триггеров В-физики.

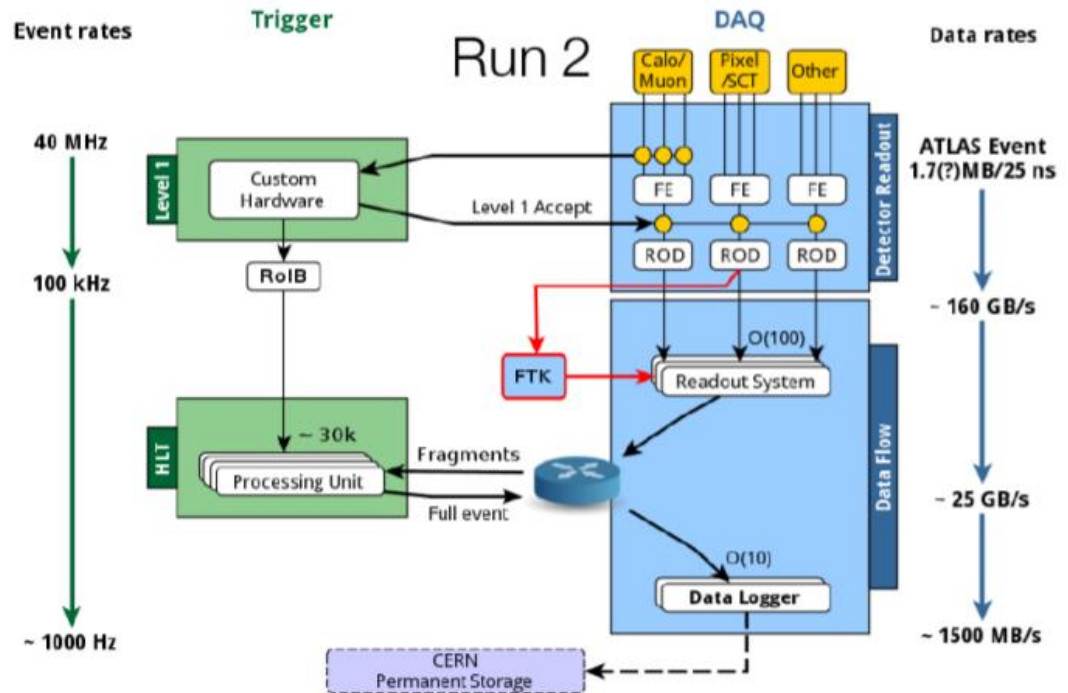


Рис. 2: Схема функционирования триггера и система съёма данных ATLAS в сеансе Run-2

В результате квалификационного проекта было произведено усовершенствование заполнения примерно 30% гистограмм для офлайн мониторинга.

2. Измерение параметров CP-нарушений в распаде $B_{0s} \rightarrow J/\psi\phi$.

На втором году аспирантуры включился в работу группы анализа $B_{0s} \rightarrow J/\psi\phi$. Участвовал в анализе данных детектора ATLAS годов 2015+2016, 2015+2016+2017, а теперь участвую в анализе на полном Run-2.

В данный момент готовится препринт для публикации «Measurement of the CP-violation phase ϕ_s and other system parameters in $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ decays in ATLAS at 13 TeV» на полной статистике Run-2, а публикация «Measurement of the CP violation phase ϕ_s in $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ decays in ATLAS at 13 TeV» на данных 2015+2016+2017 годов была добавлена в arXiv:2001.07115 и отправлена на печать в журнал «European Physical Journal C».

Новые явления, выходящие за рамки предсказаний стандартной модели, могут влиять на величину CP-нарушений в распадах b-адронов. Одним из чувствительных к таким явлениям является распад $B_s \rightarrow J/\psi\phi$. Нарушение CP-инвариантности в нем происходит за счет интерференции между прямыми распадами и распадами посредством $B_s - \bar{B}_s$ осцилляций. Частота этих осцилляций характеризуется разницей Δm_s масс тяжелого (B_H) и легкого (B_L) массовых состояний. Величина CP-нарушения в данном распаде характеризуется величиной ϕ_s , которая определяется как разница слабых фаз между амплитудой $B_s - \bar{B}_s$ - смешивания и амплитудой распада $b \rightarrow c\bar{c}s$. В предположении отсутствия проявлений новой физики, влияющих на смешивание и распады B_s - мезонов, значение величины $\phi_s = -0.03696_{-0.00082}^{+0.00072}$ рад оценено путем объединения результатов измерений других наблюдаемых из области физики b-адронов и физики каонов.

Другая характеристика в B_s смешивании это $\Delta\Gamma_s = \Gamma_L - \Gamma_H$, где Γ_L и Γ_H ширины распадов легкого и тяжелого массовых состояний. $\Delta\Gamma_s$ не чувствительна к проявлениям новой физики, однако измерение интересно для проверки теорий.

Распад псевдоскалярного B_s -мезона на конечное состояние $B_s \rightarrow J/\psi(\mu\mu)\phi(KK)$ с двумя векторными мезонами приводит к наличию суперпозиции CP-четных и CP-нечетных состояний со значением орбитального момента $L = 0, 1$ или 2 . При этом конечные состояния с $L = 0$ или 2 являются CP-четными, а состояние с $L = 1$ CP-нечетным. Еще одно конечное состояние может быть образовано с парой KK в S-волновой конфигурации. Такое конечное состояние также является CP-нечетным. Статистическое разделение всех этих состояний возможно благодаря угловому анализу продуктов распада.

Для анализа использованы данные, набранные в 2015-2017 при энергии соударения 13 ТэВ, соответствующие интегральной светимостью 80.5 fb^{-1} .

Триггерные алгоритмы, использованные в данном анализе основаны на идентификации распадов $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ с порогами на поперечные импульсы мюонов 4 или 6 ГэВ. Для анализа были сделаны Монте-Карло (МК) наборы для $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ и $B_d \rightarrow J/\psi K^*$, $B_d \rightarrow J/\psi K\pi$ и $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K$ для оценки фоновых процессов. Нету отбора по времени t — разделение фона и сигнала проводилось с помощью фитирования.

Для анализа использовались события, имеющие по крайней мере одну первичную вершину pp -взаимодействия, образованную по меньшей мере четырьмя треками во внутреннем детекторе, и имеющие не менее одной пары противоположно заряженных мюонных кандидатов, реконструированных с использованием измерений внутреннего детектора и мюонного спектрометра.

Реконструкция J/ψ -кандидатов осуществлялась путем фитирования треков мюонов в общую вершину с требованием на качество фита $\chi^2/N_{d.o.f.} < 10$, где $N_{d.o.f.}$ его число степеней свободы.

Кандидаты $\phi \rightarrow KK$ реконструировались из всех пар противоположно заряжены треков с поперечным импульсом $p_T > 1$ ГэВ и псевдобыстротой $|\eta| < 2.5$, не идентифицированных как мюоны. Кандидаты $B_s \rightarrow J/\psi(\mu\mu)\phi(KK)$ отбирались путем фитирования в общую вершину треков всех комбинаций кандидатов $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ и $\phi \rightarrow KK$.

Четверка треков рассматривалась в дальнейшем анализе при условии на качество их фита $\chi^2/N_{d.o.f.} < 3$, а также на p_T треков каонов после фитирования $p_T > 1$ ГэВ и инвариантную массу $1008. \text{ ГэВ} < m(KK) < 1030.5$ ГэВ. При наличии более одного B_s -кандидата в событии для анализа выбирался кандидат с наименьшим значением $\chi^2/N_{d.o.f.}$ фита четырех треков. Всего было отобрано 3 210 429 кандидатов в пределах интервала инвариантных масс четырех треков (5150 - 5650) ГэВ.

Начальный аромат нейтрального B -мезона может быть восстановлен с использованием информации от противоположного b -адрона, содержащего парный к исходному b -кварк. Этот метод называется тагированием по противоположному b -кварку (opposite-side tagging, OST). Методы тагирования, использованные в данном анализе: тагирование электрона тагирование мюона, тагирование струи b -адрона (если отсутствует лептон). Распад $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$ использовался для калибровки тагирования аромата, где аромат B -мезона определяется зарядом K -мезона. Распределение инвариантных масс для распада $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$, изображено на рис. 3.

Для выбранного мюона, электрона или струи строится зарядовая переменная:

=

Распределение зарядовой переменной для мюонов, изображено на рис. 4.

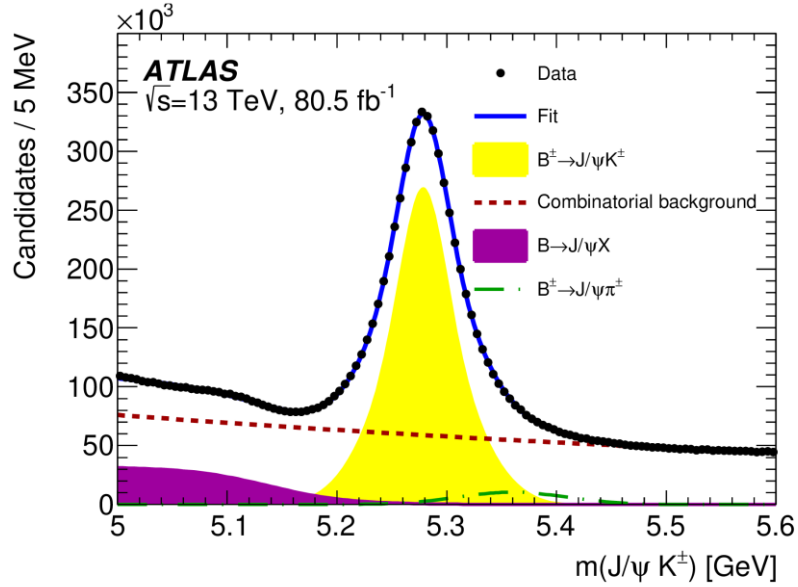


Рис. 3: Распределение инвариантных масс для распада $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$

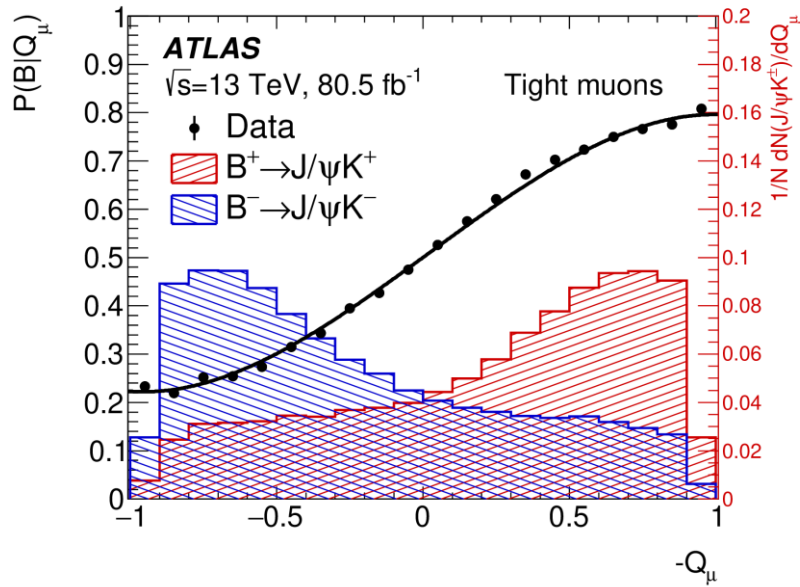


Рис. 4: Распределение зарядовой переменной Q для мюонов.

Была построена вероятность $P(B | Q_x)$, которая определяется как вероятность образования B -мезона в состоянии, содержащем \bar{b} -кварк, при заданном значении зарядовой переменной Q_x . Вероятность тагирования сигнального события как содержащего b -кварк равна $P(B|Q) = P(Q|B^+) / (P(Q|B^+) + P(Q|B^-))$, а соответственно $P(B | Q^-) = 1 - P(B|Q)$. Эти переменные используются в общем фите.

Извлечение значений параметров распада $B_s \rightarrow J/\psi(\mu\mu)\phi(KK)$ из отобранных событий осуществляется фитом методом наибольшего правдоподобия. В фите

используются инвариантная масса m , время жизни t , их неопределённости σ , вероятность тагирования $P(B|Q)$ и углы.

Функция правдоподобия определяется в виде комбинации сигнальной и фоновых плотностей вероятности следующим образом:

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

где w – веса для учета эффективности триггера, f_s – доля сигнальных событий, f_{B^0} и f_{Λ_b} – доли для фоновых процессов. $\mathcal{F}_s, \mathcal{F}_{B^0}, \mathcal{F}_{\Lambda_b}, \mathcal{F}_{\text{bkg}}$ – плотности вероятности сигнала, фона B_d, Λ_b и прочих фоновых процессов, соответственно.

В таблице 1. представлены измеренные значения физических параметров и их неопределенностей. В таблице 2. представлены все эффекты, которые приводят к систематическим неопределенностям:

Тагирование: Систематическим погрешности, связанным с методикой калибровки процедуры тагирования

Акцептанс: Угловой акцептанс рассчитывается с помощью модельных сигнальных событий в бинах по углам и поперечному импульсу

Калибровка геометрии (alignment) внутреннего детектора: Неточности в определении координат элементов внутреннего детектора

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 $\Lambda_b \rightarrow J/\psi K^p$, ошибочно реконструированных как $B_s \rightarrow J/\psi \phi$

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

Parameter	Value	Statistical uncertainty	Systematic uncertainty
ϕ_s [rad]	-0.081	0.041	0.020
$\Delta\Gamma_s$ [ps^{-1}]	0.0607	0.0046	0.0025
Γ_s [ps^{-1}]	0.6687	0.0015	0.0017
$ A_{\parallel}(0) ^2$	0.2213	0.0020	0.0022
$ A_0(0) ^2$	0.5131	0.0013	0.0034
$ A_S(0) ^2$	0.0321	0.0034	0.0044
δ_{\perp} [rad]	3.12	0.11	0.05
δ_{\parallel} [rad]	3.35	0.05	0.06
$\delta_{\perp} - \delta_S$ [rad]	-0.25	0.05	0.01

Таблица 1. Измеренные значения физических параметров и их неопределенности для Run-2.

	ϕ_s [10^{-3} rad]	$\Delta\Gamma_s$ [10^{-3} ps^{-1}]	Γ_s [10^{-3} ps^{-1}]	$ A_{\parallel}(0) ^2$ [10^{-3}]	$ A_0(0) ^2$ [10^{-3}]	$ A_S(0) ^2$ [10^{-3}]	δ_{\perp} [10^{-3} rad]	δ_{\parallel} [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
Acceptance	0.5	< 0.1	< 0.1	1.0	0.8	2.6	30	50	11
ID alignment	0.8	0.2	0.5	< 0.1	< 0.1	< 0.1	11	7.2	< 0.1
Best candidate selection	0.5	0.4	0.7	0.5	0.2	0.2	12	17	7.5
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 interval	0.4	0.1	0.1	0.3	0.3	1.3	4.4	7.4	2.3
Dedicated backgrounds:									
B_d^0	2.3	1.1	< 0.1	0.2	3.0	1.5	10	23	2.1
Λ_b	1.6	0.3	0.2	0.5	1.2	1.8	14	30	0.8
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	0.2	< 0.1	< 0.1	0.3	< 0.1	0.3	11	21	8.4
Fit bias	4.1	1.7	0.9	1.4	< 0.1	1.5	19	0.9	7.0
Total	20	2.5	1.6	2.3	3.5	4.5	50	79	18

Таблица 2. Систематические неопределенности

На рис. 5, 6 изображены массовые и временные проекции фита событий $B_s \rightarrow J/\psi\phi$. Красной сплошной линией отмечен полный фит, пунктирной фиолетовой линией – сигнальная компонента, пунктирной синей линией – фоновая компонента.

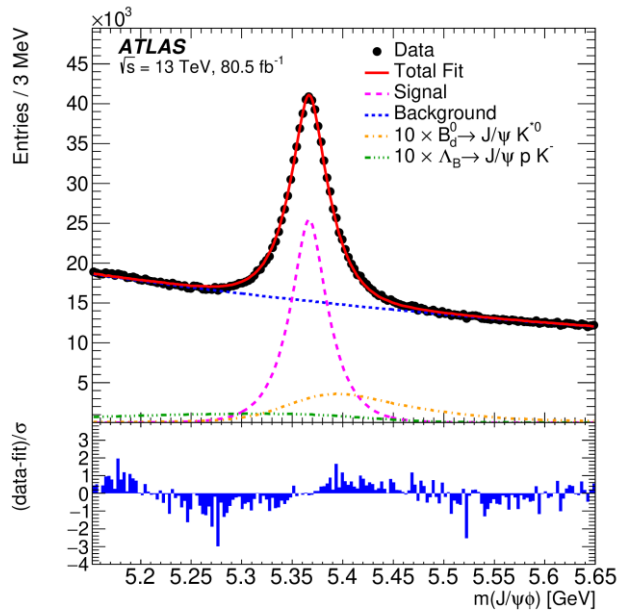


Рис 5: Массовая проекция фита событий $B_s \rightarrow J/\psi\phi$

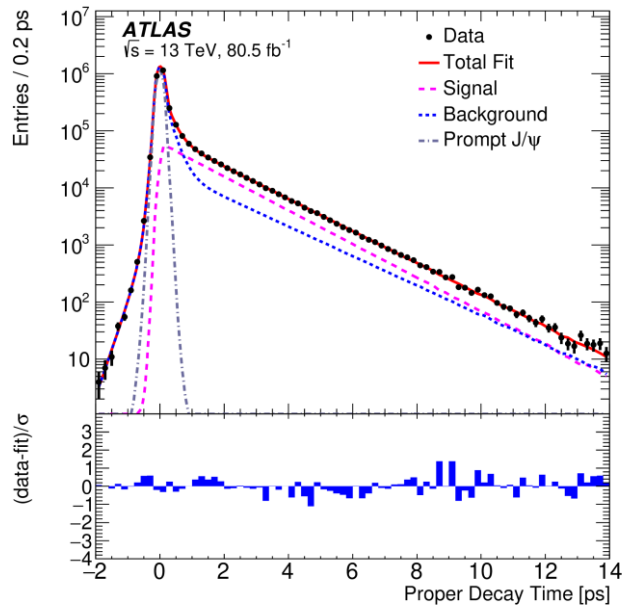


Рис 6: Временная проекция фита событий

Так же было произведено статистическое объединение результатов с предыдущим анализом эксперимента ATLAS на данных Run-1. Таблица 3 – статистическое объединение результатов Run-2 и Run-1. Контур функции правдоподобия на плоскости $\phi_s - \Delta\Gamma_s$ для анализов Run-1 и для Run-2 изображены на рис. 7. Контур функции правдоподобия на плоскости $\phi_s - \Delta\Gamma_s$ для всех экспериментов БАК – рис 8.

Parameter	Value	Statistical uncertainty	Systematic uncertainty
ϕ_s [rad]	-0.087	0.037	0.019
$\Delta\Gamma_s$ [ps^{-1}]	0.0640	0.0042	0.0024
Γ_s [ps^{-1}]	0.6698	0.0014	0.0015
$ A_{\parallel}(0) ^2$	0.2221	0.0018	0.0022
$ A_0(0) ^2$	0.5149	0.0012	0.0031
$ A_S ^2$	0.0343	0.0032	0.0044
δ_{\perp} [rad]	3.21	0.10	0.05
δ_{\parallel} [rad]	3.36	0.05	0.08
$\delta_{\perp} - \delta_S$ [rad]	-0.24	0.05	0.02

Таблица 3. Статистическое объединение физических параметров с предыдущим анализом на данных Run-1

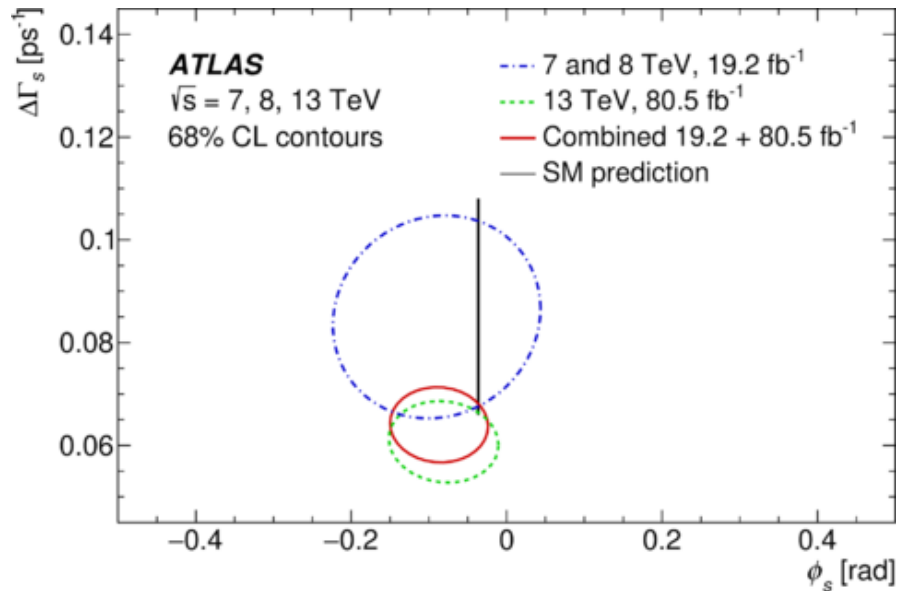


Рис. 7: Контуры функции правдоподобия на плоскости $\phi_s - \Delta\Gamma_s$

Видно, что результат эксперимента ATLAS согласуется с другими экспериментами и с предсказаниями СМ. Аспирант участвовал в изучении фоновых процессов для распада $B_s \rightarrow J/\psi\phi$, а также рассчитал вклад систематических погрешностей от фоновых процессов для этого анализа.

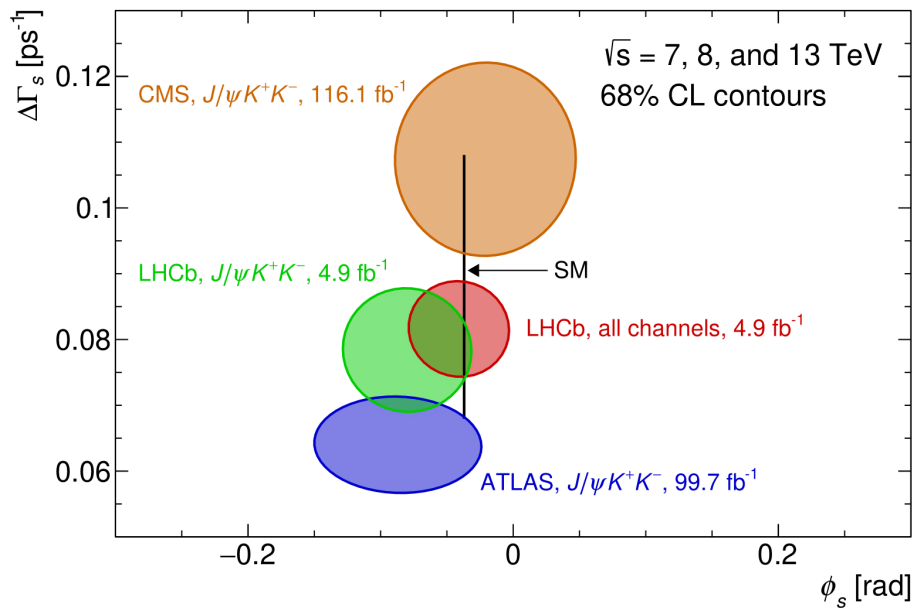


Рис 8: Контуры функции правдоподобия на плоскости ϕ_s – $\Delta\Gamma_s$ для последних результатов экспериментов БАК.

3. Вывод и планы

Триггер В-физики играет важную роль в эксперименте ATLAS. Система мониторинга триггера В-физики выполняет важные задачи во время сбора данных. Мною было произведено усовершенствование заполнения примерно 30% гистограмм для офлайн мониторинга. Анализ с использованием 2015+2016+2017 ATLAS данных представлен. Результаты статистически объединены с Run1. Результаты согласуются с LHCb, CMS и предсказаниями СМ. Готовится препринт для полного анализа по Run2(60 фб–1). Планируется полностью новый анализ по всему Run2.

4. Доклады и публикации

Доклады:

1. Measurement of the weak mixing phase ϕ_s through time-dependent CP violation in $B_s \rightarrow J/\psi \Phi$ decay in ATLAS, Conference on flavor physics and CP violation (FPCP) 2020
2. Measurement of the CP violation in $B_s \rightarrow J/\psi + \Phi$ decays in ATLAS at 13 TeV - Moscow International School of Physics (MISP) 2020
3. Heavy quark physics at ATLAS and CMS (excluding top), The XXIV International Workshop High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP) 2019
4. Исследование нарушения лептонного аромата, CP-инвариантности и $R(K^*)$ аномалии в экспериментах на БАК, «Ломоносовские чтения - 2019». Секция «Физика»
5. Вклад фоновых процессов в систематическую погрешность измерения параметра фазы ϕ_s в эксперименте ATLAS, VIII Межинститутская

молодежная конференция "Физика элементарных частиц и космология 2019"

6. Системы мониторинга триггера В-физики в эксперименте ATLAS Большого адронного коллайдера» - XIX Межвузовская научная школа молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине»
7. Задачи модернизации детектора ATLAS, Ломоносовские чтения — 2018
8. Основные задачи триггера В-физики в эксперименте ATLAS - VII межинститутская молодёжная конференция, "Физика элементарных частиц и космология 2018"
9. Развитие средств мониторинга триггера В-физики в эксперименте ATLAS, XXV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018». Секция «Физика»

Публикации:

1. Готовится препринт «Measurement of the CP-violation phase ϕ_s and other system parameters in $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ decays in ATLAS at 13 TeV»
2. «Measurement of the CP violation phase ϕ_s in $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ decays in ATLAS at 13 TeV» Отправлена на печать в «European Physical Journal C»(arXiv:2001.07115).
3. Исследования нарушения лептонного аромата, CP-инвариантности и $R(K^*)$ аномалии в экспериментах на БАК, УЗФФ № 3, с. 1930404
4. Системы мониторинга триггера В-физики в эксперименте ATLAS Большого адронного коллайдера, УЗФФ, № 2, с. 1920202
5. Газовые детекторы для идентификации частиц при высоких энергиях, УЗФФ, № 3, с. 173204-1-173204-8