

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Школа \_\_ Инженерная школа ядерных технологий (ИЯТШ)  
Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии  
Отделение школы (НОЦ) \_\_ Отделение ядерно-топливного цикла

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
Изучение распадов В-мезонов в трехчастичные конечные состояния с чармонием в эксперименте Большого адронного коллайдера

УДК 539.126.13:621.384.6

**Студент**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ6М	Харисова Анастасия Евгеньевна		

**Руководитель**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Проректор по ОД ТПУ	Вагнер А.Р.	к.ф.-м. н		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Верховская М.В.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент отделение ядерно-топливного цикла ИЯТШ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерная медицина	Черепенников Ю.М.	к.т.н.		

Томск – 2018 г.

## Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>	
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов.
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиоэкологии, медицинской физике и ядерной медицине.
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.
P6	Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
<b><i>Общекультурные компетенции</i></b>	
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Школа \_\_ Инженерная школа ядерных технологий (ИЯТШ)  
Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии  
Отделение школы (НОЦ) \_\_ Отделение ядерно-топливного цикла

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения магистерской диссертации**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	1.06.2018
--	-----------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
29.01.18	Выбор направления исследования	5
14.03.18	Составление и утверждение технического задания	10
1.04.18	Подбор и изучение материалов по теме	5
10.05.18	Проведение физического анализа данных	40
30.05.18	Анализ и описание результатов	30
11.06.18	Подготовка к защите ВКР	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Проректор по ОД ТПУ	Вагнер А.Р.	к.ф.-м. н		1.06.2018

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерная медицина	Черепенников Ю.М.	к.т.н.		1.06.2018

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа \_\_ Инженерная школа ядерных технологий (ИЯТШ) \_\_\_\_\_  
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии  
 Отделение школы (НОЦ) \_\_ Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0АМ6М	Харисовой Анастасии Евгеньевне

Тема работы:

Изучение распадов В-мезонов в трехчастичные конечные состояния с чармонием в эксперименте Большого адронного коллайдера
---

Утверждена приказом директора (дата, номер)	11.05.2018 г., №3283К
---	-----------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	1.06.2018
--	-----------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Данные набранные экспериментом ЛНСб за 2011-2012 гг., которым соответствуют интегральные светимости <math>1 \text{ фб}^{-1}</math> при энергии в системе центра масс 7 ТэВ и <math>2 \text{ фб}^{-1}</math> при 8 ТэВ, и 2015-2016 гг; программные пакеты Bender и Ganga, библиотеки RooFit и набора расширений Ostar и Bender необходимые для работы с языком программирования python.</p>
---	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Обзор литературных источников по исследуемой тематике; постановка задачи исследования, проектирования, проведение физического анализа данных; анализ полученных результатов; финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение (Расчет себестоимости НТИ); социальная ответственность.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Презентация в среде Microsoft office PowerPoint</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Доцент ОСГН ШБИП к.э.н. Верховская М.В.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Ассистент отделение ядерно-топливного цикла ИЯТШ к.ф.-м.н. Гоголева Т.С.</p>
<p>Раздел на иностранном языке</p>	<p>Старший преподаватель Кабрышева О.П.</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>Эксперимент LHCb на ускорителе БАК</p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>10.02.2018</p>
--	-------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Проректор по ОД ТПУ	Вагнер А.Р.	к.ф.-м. н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM6M	Харисова Анастасия Евгеньевна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0АМ6М	Харисовой Анастасии Евгеньевне

<b>Школа</b>	<b>Инженерная школа ядерных технологий</b>	<b>Отделение</b>	<b>Ядерно – топливного цикла</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистр	<b>Направление/специальность</b>	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерная медицина

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ)</i>	1.Стоимость расхода электроэнергии 2.Норматив заработной платы
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	1.Тариф на электроэнергию 2.Коэффициенты для расчета заработной платы
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	1.Отчисления во внебюджетные фонды 2.Расчет дополнительной заработной платы

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	1.Потенциальные потребители результатов исследования; 2.Диаграмма Исикавы; 3.SWOT – анализ.
<i>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	1.Разработка графика проведения научного исследования; 2.Бюджет научно-технического исследования (нти).
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Расчет научно-технического эффекта

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Причинно-следственная диаграмма
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НИ
4. Иерархическая структура работ
5. Оценка НТУ НТИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Верховская М.В.	К.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ6М	Харисова Анастасия Евгеньевна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0АМ6М	Харисовой Анастасии Евгеньевне

<b>Школа</b>	<b>Инженерная школа ядерных технологий</b>	<b>Отделение</b>	<b>Ядерно – топливного цикла</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистр	<b>Направление/специальность</b>	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерная медицина

<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующее излучение);</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).</li> </ul>
2. <i>Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность;</li> <li>– пожаровзрывобезопасность;</li> <li>– требования охраны труда при работе на ПЭВМ.</li> </ul>

<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
1. <i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).</li> </ul>
2. <i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0АМ6М	Харисова А. Е.		

## АННОТАЦИЯ

Большой Адронный Коллайдер, БАК, (Large Hadron Collider, LHC) - крупнейший в мире и самый мощный коллайдер частиц, самый сложный экспериментальный объект, когда-либо построенный. Он был построен Европейской организацией ядерных исследований (ЦЕРН) в сотрудничестве с более чем 10 000 ученых и инженеров из более чем 100 стран, а также сотен университетов и лабораторий. БАК расположен в туннеле, примерно, в 175 метрах под французско-швейцарской границей вблизи Женевы.

Цель БАК заключается в том, чтобы дать физикам возможность проверить предсказания различных теорий физики частиц, включая измерение свойств бозона Хиггса и поиск большого семейства новых частиц, предсказанных суперсимметричными теориями. Но Стандартную модель (СМ) нельзя считать окончательной, несмотря на её поразительные успехи в описании экспериментальных данных. Поэтому основными направлениями исследований на БАК являются поиск физики вне СМ и точная проверка ее предсказаний [1].

Каждый эксперимент на БАК отличается и характеризуется своими детекторами. Самый большой из этих экспериментов, ATLAS и CMS, используют детекторы общего назначения для исследования наибольшего диапазона физики, например, изучение свойств бозона Хиггса, поиск суперсимметричных частиц, изучение физики t-кварков и др.. Наличие двух независимо разработанных детекторов жизненно важно для перекрестного подтверждения любых сделанных новых открытий. ALICE и LHCb имеют детекторы, специализирующиеся на конкретных явлениях. Основной целью эксперимента ALICE является изучение ион-ионных столкновений, эксперимент LHCb изучает свойств частиц, содержащих с- и b- кварки.

Наименьшими экспериментами на LHC являются TOTEM и LHCf, которые фокусируются на протонах или тяжелых ионах, которые проходят

друг мимо друга, а не сталкиваются с ними, когда сталкиваются лучи. TOTEM использует детекторы, расположенные по обе стороны от точки взаимодействия CMS, в то время как LHCf состоит из двух детекторов, которые расположены вдоль линии луча LHC, на расстоянии 140 метров от каждой стороны точки столкновения ATLAS. MoEDAL использует детекторы, развернутые вблизи LHCb, для поиска гипотетической частицы, называемой магнитным монополю.

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 120 с., 30 рис., 29 табл., 47 источников, 2 прил.

Ключевые слова: БАК, физический анализ данных,  $B^+$ -мезон, прелестные адроны, эксперимент LHCb.

Объектом исследования является: распад  $B^+ \rightarrow J/\psi \eta K^+$  ( $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  и  $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ ).

Цель работы – обнаружить распад  $B^+ \rightarrow J/\psi \eta K^+$  ( $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  и  $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ ) в данных, набранных экспериментом LHCb за 2011-2012 гг., которым соответствуют интегральные светимости  $1 \text{ фб}^{-1}$  при энергии в системе центра масс 7 ТэВ и  $2 \text{ фб}^{-1}$  при 8 ТэВ, и 2015-2016 гг. – интегральная светимость  $0.3 \text{ фб}^{-1}$  и  $1.67 \text{ фб}^{-1}$  при энергии в системе центра масс 13 ТэВ.

В процессе исследования проводился физический анализ данных набранных экспериментом LHCb с помощью программной среды ROOT, с использованием библиотеки RooFit и программных пакетов Bender и Ganga и анализ полученных результатов.

В результате исследования был проведён физический анализ анных набранных экспериментом LHCb в протон-протонных столкновениях в течение Run1 и Run2 и соответствующей интегральной светимости  $5 \text{ фб}^{-1}$ , наблюдался сигнал распада  $B^{\pm} \rightarrow J/\psi \eta K^{\pm}$  с использованием моды  $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ .

Степень внедрения: в настоящее время предмет исследования находится к стадии теоретической проработки.

Область применения: анализ может быть полезным организациям, занимающимся научными теоретическими исследованиями в области физики высоких энергий, физик элементарных частиц.

Экономическая эффективность/значимость работы на данный момент не установлена, так как предмет исследования находится в стадии теоретической проработки.

В будущем планируется: измерение отношения парциальных шириин этих двух распадов:  $B^+ \rightarrow J/\psi \eta K^+$  /  $B^+ \rightarrow \psi(2S) \eta K^+$

## Оглавление

АННОТАЦИЯ .....	9
РЕФЕРАТ .....	11
Введение .....	15
1. Эксперимент LHCb на ускорителе БАК .....	16
1.1 Большой Адронный Коллайдер .....	16
1.2 Эксперимент LHCb .....	17
1.3 Трековая система .....	19
1.3.1 Вершинный детектор .....	19
1.3.2 Трековые станции .....	21
1.4 Детекторы черенковского излучения .....	23
1.5 Калориметрическая система .....	24
1.6 Мюонная система .....	27
1.7 Восстановление событий .....	28
1. Реконструкция треков .....	28
2. Реконструкция первичных вершин .....	31
3. Реконструкция и идентификация фотонов .....	31
4. Идентификация заряженных частиц .....	32
1.8 Система предварительного отбора событий .....	33
2. Поиск распадов $B^\pm \rightarrow J/\psi \eta K^\pm$ и $B^\pm \rightarrow \psi(2S) \eta K^\pm$ .....	36
2.1 Отбор сигнальных $B^\pm$ -кандидатов .....	36
2.2 Наблюдение распада $B^\pm \rightarrow J/\psi \eta K^\pm$ .....	39
2.3 Поиск промежуточных резонансов .....	41
2.4 Перекрёстная проверка .....	52
2.4 Наблюдение распада $B^\pm \rightarrow \psi(2S) \eta K^\pm$ .....	54
Заключение .....	56
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	57

3.1	Предпроектный анализ .....	58
3.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования .....	58
3.1.2	Диаграмма Исикавы .....	58
3.1.3	SWOT-анализ .....	61
3.2	Планирование научно-исследовательских работ.....	65
3.2.1	Структура работ в рамках научного исследования .....	65
3.2.2	Определение трудоемкости выполнения работ .....	67
3.2.3	Разработка графика проведения научного исследования.....	68
3.2.4	Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....	69
3.2.5	Расчет материальных затрат НТИ.....	70
3.2.6	Основная заработная плата исполнителей темы .....	71
3.2.7	Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	74
3.2.8	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	75
3.2.9	Накладные расходы .....	76
3.2.10	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта .....	77
3.3	Организационная структура проекта .....	79
3.4	Расчет научно-технического эффекта .....	80
4	Социальная ответственность .....	82
4.1	Анализ опасных и вредных факторов .....	83
4.2	Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ .....	84
4.2.1.	Организационные мероприятия .....	84
4.2.2.	Технические мероприятия .....	85
4.2.3.	Условия безопасной работы .....	87
4.3	Электробезопасность .....	89
4.4	Противопожарная безопасность .....	91
	Список литературы.....	95

Приложение А.....	99
Приложение Б .....	118

## Введение

В 1977 г. в Fermilab (США) в соударениях протонов с ядрами были обнаружены связанные состояния системы  $b\bar{b}$ , что стало открытием пятого кварка - bottom. Существование  $b$  кварка было предсказанного ещё в 1973 году теоретиками М. Кобаяши и Т. Маекава. Позже существование  $b$ -кварка подтвердили в экспериментах ARGUS [2] и CLEO [3] открытием  $B$ -мезонов. Ими же было установлено, что в распадах  $B$ -мезонов проявляется нарушение  $CP$ -симметрии наиболее сильно, так как в этом случае в смешивании участвуют все три поколения кварков. Данное открытие является причиной повышенного интереса к изучению физики  $B$ -мезонов. Исследования по данному направлению проводятся как с помощью детекторов общего назначения, так и в экспериментах, которые специально созданы для изучения распадов  $B$ -мезонов, к ним же относятся специализированные асимметричные « $B$ -фабрики»: установка Belle [4] на ускорителе KEKB (КЕК, Япония) и установка BaBar [5] на ускорителе PEP-II (SLAC, США).

На большом адронном коллайдере экспериментом по изучению физики  $B$ -мезонов является эксперимент LHCb. Этот эксперимент специализируется на исследовании небольших различий между материей и антиматерией, изучая свойств частиц, содержащих  $c$ - и  $b$ -кварки. Детектор LHCb, в отличие от других детекторов LHC, имеет структуру одноплечевого прямого спектрометра. Так как, благодаря большой энергии протон-протонных столкновений, адроны, содержащие  $b$ - и  $c$ -кварки, распространяются, в основном, в узком конусе вокруг оси пучка.

Преимуществом эксперимента LHCb по сравнению с другими экспериментами, изучающими распады  $B$ -мезонов, является большое сечение рождения  $c$ - и  $b$ -кварков и возможность рождения всех возможных состояний, содержащих  $b$ -кварк ( $B^{+-}$ ,  $B^0$ ,  $B_s^0$  и  $B_c^{+-}$ -мезонов, а также различных барионов, содержащих прелестный кварк) [1].

## 1. Эксперимент LHCb на ускорителе БАК

### 1.1 Большой Адронный Коллайдер

Большой Адронный Коллайдер, БАК, (Large Hadron Collider, LHC) является кольцевым ускорителем встречных пучков протонов (рис. 1), который рассчитан на повышение энергии пучков в лабораторной системе с 450 ГэВ (на выходе из канала инжекции) до 7 ТэВ [6]. Проектная мгновенная светимость, которую обеспечивает ускоритель, составляет примерно  $10^{34}\text{см}^2\text{с}^{-1}$ . Протяженность кольца примерно равна 27 км. В четырех точках взаимодействия протонов (пересечение пучков) расположены детекторы: общего назначения ATLAS [7] и CMS [8], детектор ALICE [9], который предназначен для изучения процессов, которые происходят при столкновении тяжелых ионов, и детектор LHCb [10], который создан для изучения физики тяжелых кварков. Кроме того, вблизи области пересечения пучков расположены детектор LHCf [11], который занимается измерением числа и энергий нейтральных  $\pi$ -мезонов, которые вылетают в направлении близком к оси пучка, детектор TOTEM [12], который предназначен для изучения полных сечений, упругих взаимодействий и дифракционных процессов, и детектор MoEDAL [13], который занимается поиском магнитного монополя.

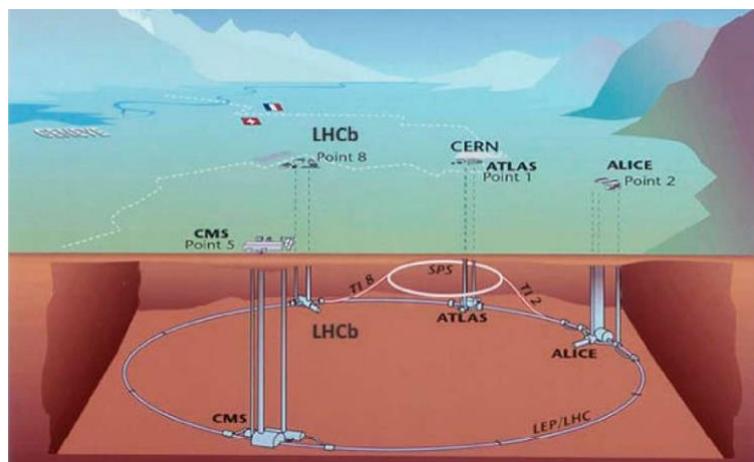


Рисунок 1 – Схема ускорителя LHC

## 1.2 Эксперимент LHCb

Одним из четырех основных экспериментов на Большом адронном коллайдере является эксперимент LHCb, так как большие сечения рождения  $b$ - и  $c$ -кварков в протон-протонных столкновениях при энергиях БАК делает данный ускоритель привлекательным для изучения физики тяжелых адронов. Его главной задачей является не прямой поиск проявлений физических явлений за пределами Стандартной модели в распадах адронов, которые содержат  $b$ - и  $c$ -кварки. Ожидается, что в процессах нарушения CP-симметрии, зарядово-лептонной симметрии, изоспиновой симметрии и в редких распадах частиц, которые содержат  $b$ - и  $c$ -кварки, эффекты «новой физики» могут привести к существенным отклонениям от предсказаний Стандартной модели. И всё же задачи эксперимента LHCb не ограничены исследованием только данных эффектов. Кроме того, в эксперименте проводятся многие другие исследования, такие как изучение свойств тяжелых адронов, а также поиск новых частиц [14].

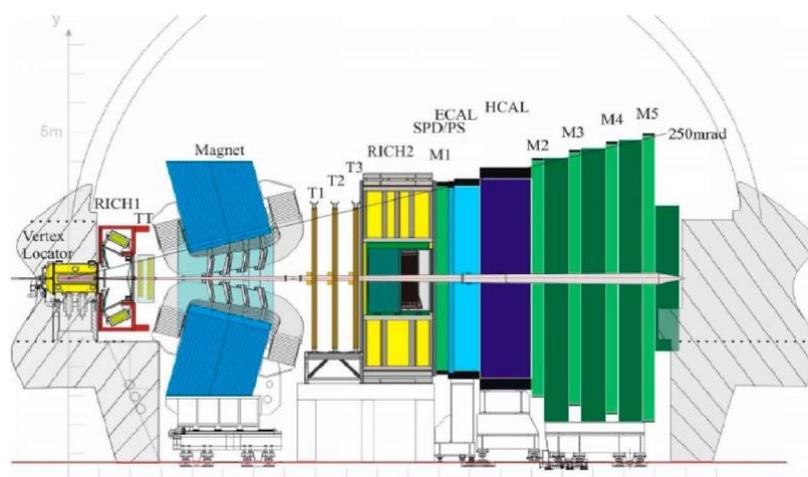


Рисунок 2 – Схема установки LHCb

Детектор LHCb (рис. 2) является одноплечевым передним спектрометром, его телесный угол лежит между 10 и 300 мрад в горизонтальной плоскости и от 10 до 250 мрад в вертикальной плоскости. Разница между горизонтальными и вертикальными углами оправдана тем,

что горизонтальная плоскость также является плоскостью изгиба для заряженных частиц, отклоненных дипольным магнитным полем ЛHCb. Диапазон псевдо-быстроты ( $\eta$ ) для дорожек внутри геометрического приема ЛHCb составляет от 1,8 до 4,9. Такая геометрия детектора обусловлена тем, что в протон-протонных столкновениях при энергиях БАК пары  $b\bar{b}$ -кварков рождаются преимущественно в узком конусе вдоль оси пучка (рис. 3). В данную область попадает  $\sim 40\%$  всех рожденных в столкновениях частиц, содержащих  $b$ - и  $c$ -кварки.

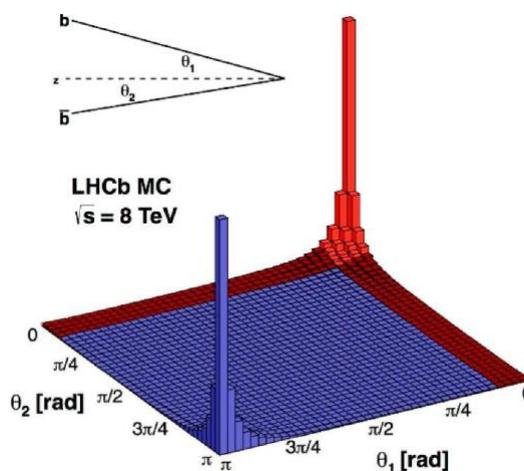


Рисунок 3 – Результат моделирования угла вылета  $b$ -кварков в протон-протонных столкновениях при энергии в системе центра масс  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ

Для изучения эффектов нарушения CP-симметрии, полного восстановления распадов адронов необходимо обеспечение ряда требований. Такие как: хорошее разрешение по времени жизни распавшихся частиц (в сравнении с частотой осцилляций  $B_s^0$ -мезонов,  $t \sim 350$  фс), точная идентификация частиц, эффективное определение их инвариантной массы, а также точная триггерная система.

Эффективное отделение вершин распада от вершин протон-протонных столкновений, а также измерение времен жизни  $B$ -мезонов обеспечивается за счёт стрипового вершинного детектора (VELO), который

окружает точку столкновения протонных пучков. За реконструкцию треков заряженных частиц отвечает трековая система (ТТ и Т1-Т3). Дипольный магнит используется для измерения импульсов этих частиц [15]. Два детектора черенковского излучения (RICH1 и RICH2) используются для идентификации адронов и разделения каонных, пионных и протонных кандидатов. За идентификацию и разделение фотонных, электронных и адронных кандидатов, а также за измерение их энергий отвечает калориметрическая система, которая включает в себя четыре подсистемы: детектор на основе сцинтилляционных пластин (SPD), предливневый детектор (PRS), электромагнитный калориметр (ECAL) и адронный калориметр (HCAL). И мюонная система (M1-M5) отвечает за реконструкцию и идентификацию мюонов. Лабораторная система координат детектора LHCb выбрана следующим образом: начало координат совпадает с точкой пересечения протонных пучков, координатная ось z совпадает с осью пучка и направлена от точки столкновения протонов в сторону мюонных станций, координатная ось y направлена вертикально вверх, а координатная ось x направлена в центр кольца БАК.

### **1.3 Трековая система**

#### **1.3.1 Вершинный детектор**

Задачей вершинного детектора VELO является точное определение положений треков вблизи области столкновения протонов. Благодаря этому можно восстанавливать координаты точек протон-протонных взаимодействий («первичных вершин») и положения вершин распадов адронов, содержащих b- и c-кварки («вторичных вершин»), и кроме того определить прицельные параметры заряженных частиц по отношению к первичным вершинам.

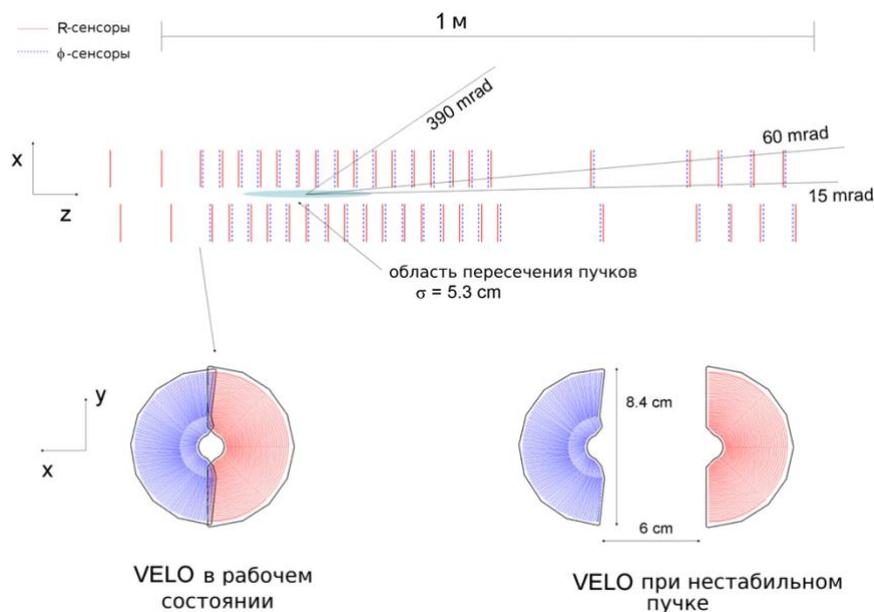


Рисунок 4 – Схема VELO-детектора в плоскости  $(x,z)$  при  $y=0$  (вверху). Схема модуля детектора VELO (внизу)

Детектор VELO [16] представляет собой кремниевый стриповый детектор, состоящий из модулей, представляющих собой пару склеенных между собой сенсоров. Один измеряет расстояние от оси  $z$  в радиальном направлении (R-сенсор), а второй — угол  $\phi$  ( $\phi$ -сенсор) в системе координат детектора LHCb. Модули выстроены последовательно вдоль оси пучка (рис. 4) таким образом, что  $z$ - координата частицы определяется положением модуля, в котором был обнаружен отсчет.

Геометрические размеры детектора выбраны так, чтобы трек любой частицы, родившейся в пределах  $\pm 5.3$  см около начала координат по оси  $z$  и направленной под углом  $\pm 300$  мрад вокруг оси пучка, пересекал хотя бы три модуля. Детектор выполнен в виде двух подвижных половинок, состоящих из 21 модуля, 6 расположены до точки пересечения пучков, остальные 15 после. Модули детектора VELO представляют собой полудиски, толщина которых равна 220 мкм каждый, радиус активной зоны модуля – 42 мм. Полная длина детектора равна 1 м. В рабочем состоянии при стабильном пучке полудиски находятся на расстоянии 0.7 см вокруг оси пучка. И в

случае нестабильности пучков полудиски разведются на расстояние до 6 см друг от друга, что необходимо для защиты детектора от потоков вторичных частиц.

Четыре дополнительных R-сенсора установлены перед детектором VELO для определения множественность заряженных треков в направлении противоположном направлению оси z. Они дают оценку числа и положения первичных вершин в событии. Данная информация предоставляется триггеру нулевого уровня.

Точность измерения прицельного параметра для треков с большим поперечным импульсом составляет 20 мкм. Точность восстановления первичных вершин в детекторе VELO для события с 25 треками составляет 16 мкм по x- и y-координатам и 76 мкм по z-координате [17]. Точность определения времени жизни частиц, распадающихся в VELO, равно 45 фс.

### **1.3.2 Трековые станции**

Непосредственно перед магнитом находится трековая станция ТТ (Tracker Turicensis), состоящая из четырех слоев кремниевых стриповых детекторов (рис. 5 (слева)), площадью 8.4 м<sup>2</sup> [18]. В первом и четвертом слоях стрипы расположены вертикально, а во втором и третьем — под стереоуглами  $-5^\circ$  и  $+5^\circ$  соответственно, согласно «x — u — v — x» геометрии.

Стрипы в сенсоре удалены друг от друга на расстояние 200 мкм, толщина самого сенсора составляет 500 мкм. Для улучшения пространственного разрешения слои разделены на две пары: (x, u) и (v, x), таким образом, что расстояние между вторым и третьим слоями в станции ТТ составляет 27 см.

Станций Т1-Т3 составлены из двух типов детекторов (рис. 5 (справа)): внутреннего трекера IT [19] и внешнего трекера OT [20]. Стриповый

детектор ИТ (внутренний треккер, Inner Tracker) представляет собой кремниевый стриповый детектор (крестообразная область вокруг оси пучка представляет). Как и в ТТ-детекторе, каждая из станций внутреннего треккера состоит из четырёх слоёв, площадью 4.2 м<sup>2</sup>. Слои расположены в соответствии с «x — u — v — x» геометрии, расстояние между стрипами в каждом слое составляет 200 мкм.

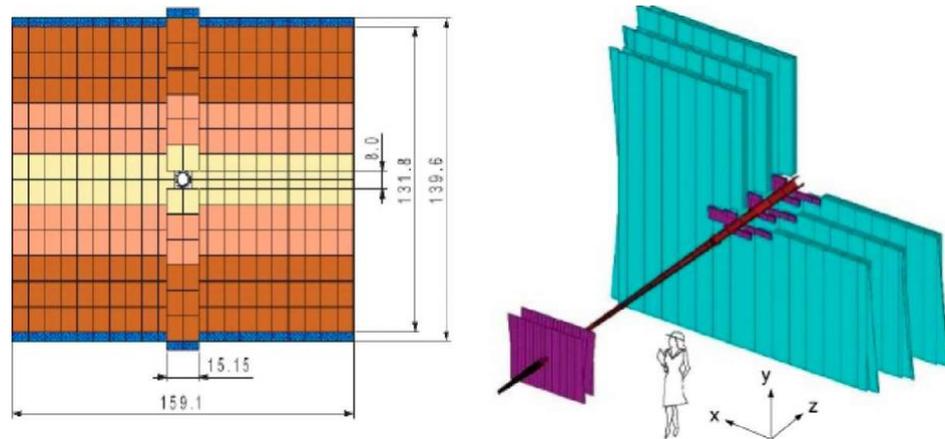


Рисунок 5 – Схема одного из слоёв ТТ-детектора (слева). Схема относительного расположения ТТ-, ИТ- и ОТ-детекторов (справа)

Внешняя часть Т-станций в области представляет собой детектор на основе дрейфовых трубок ОТ (внешний треккер, Outer Tracker) диаметром 4,9 мм. Трубки заполнены смесью на основе 70% аргона, 28.5% CO<sub>2</sub> и 1.5% O<sub>2</sub> для достижения быстрого времени дрейфа (менее 50 нс). Каждая из трех станций внешнего треккера состоит из четырех слоёв, расположенных согласно «x — u — v — x» геометрии: в первом и четвертом слоях трубки ориентированы вертикально, во втором и третьем наклонены относительно оси y под углами +5° и -5° соответственно. Площадь активной области ОТ равна 5971×4850 мм<sup>2</sup>. Граница активной области ОТ-детекторов совпадает с раствором магнита, а внутренняя прилегает к области, покрываемой ИТ.

## 1.4 Детекторы черенковского излучения

Детекторы черенковского излучения (RICH1 и RICH2) используются для обеспечения идентификации частиц в широком диапазоне импульсов [21]. RICH1, расположенный между вершинным детектором и ТТ ( $990 < z < 2165$  мм), идентифицирует частицы с импульсами от 1 до 60 ГэВ/с. В нем применяют два типа радиаторов — прослойка аэрогеля для идентификации частиц с малыми импульсами (порядка нескольких ГэВ /с) и газ  $C_4F_{10}$ .

Детектор RICH2, находящийся за магнитом ( $9500 < z < 11832$  мм), идентифицирует частицы в области импульсов от 15 до 100 ГэВ/с. В качестве радиатора используется газ  $CF_4$ . Активная область этого детектора ниже, чем у остальных подсистем установки, и соответствует диапазону углов от  $\pm 15$  мрад до  $\pm 100$  мрад по вертикали и до  $\pm 120$  мрад по горизонтали. Но при этом, эти размеры позволяют регистрировать все частицы с большими импульсами. Схемы детекторов RICH1 и RICH2 приведены на рисунке 6.

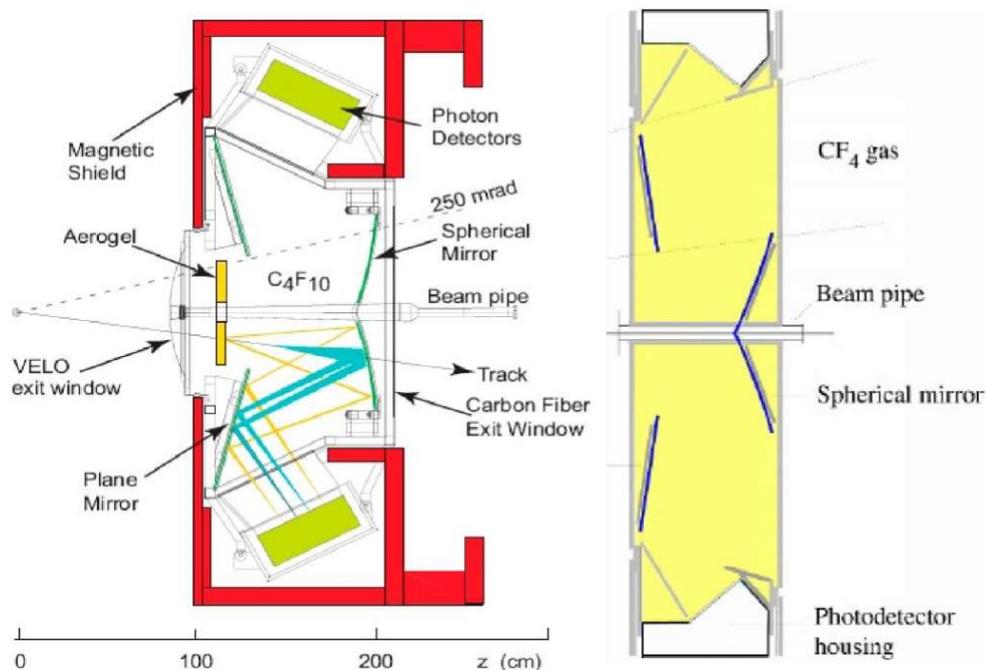


Рисунок 6 – Схема детекторов RICH1 (слева) и RICH2 (справа)

Черенковский свет в обоих RICH-детекторах фокусируется сферическими зеркалами, и после с помощью плоских зеркал выводится за пределы установки, где его регистрируют гибридные фотодетекторы (HPD). Во избежание влияния поля магнита, HPD экранированы железными щитами.

Система детекторов RICH даёт возможность идентифицировать каоны с эффективностью  $\sim 95\%$ , вероятность ошибочной идентификации пионов как каонов при этом менее  $10\%$  [22]. Эффективность идентификации протонов составляет более  $90\%$ , вероятность ошибочной идентификации пионов и каонов как протонов при этом равна  $10\%$ .

### **1.5 Калориметрическая система**

Калориметрическая система [23] находится на расстоянии  $12.5$  м от точки столкновения протонов и имеет поперечный размер  $7.76 \times 6.30$  м, за исключением области в телесном угле  $\theta_{x,y} \ll 30$  мрад вокруг оси пучка. Её основная задача заключается в детектировании фотонов, электронов и адронов, определение их положения и энергии. Кроме того, калориметрическая система вырабатывает триггер исходя из наличия кластеров с большой выделенной поперечной энергией. Система калориметров состоит из детектора на основе сцинтилляционных пластин (SPD), предливневый детектора (PRS), электромагнитный калориметра (ECAL) и адронный калориметра (HCAL).

Детектор на основе сцинтилляционных пластин и предливневый детектор состоят из пластиковых сцинтилляционных пластин толщиной  $15$  мм, которые ориентированы перпендикулярно оси пучка [24]. Между ними находится свинцовый поглотитель, толщиной  $2.5$  радиационным длинам. Детектор из сцинтилляционных пластин обеспечивает идентификацию фотонов, так как заряженные частицы, проходящие через сцинтиллятор, порождают ионизационное излучение, в то время как фотоны не оставляют следа. Предливневый детектор позволяет отделять адронные кандидаты от

электронных и фотонных, так как регистрирует электромагнитный ливень, который начинается в свинцовом поглотителе, когда через него проходит электрон или фотон.

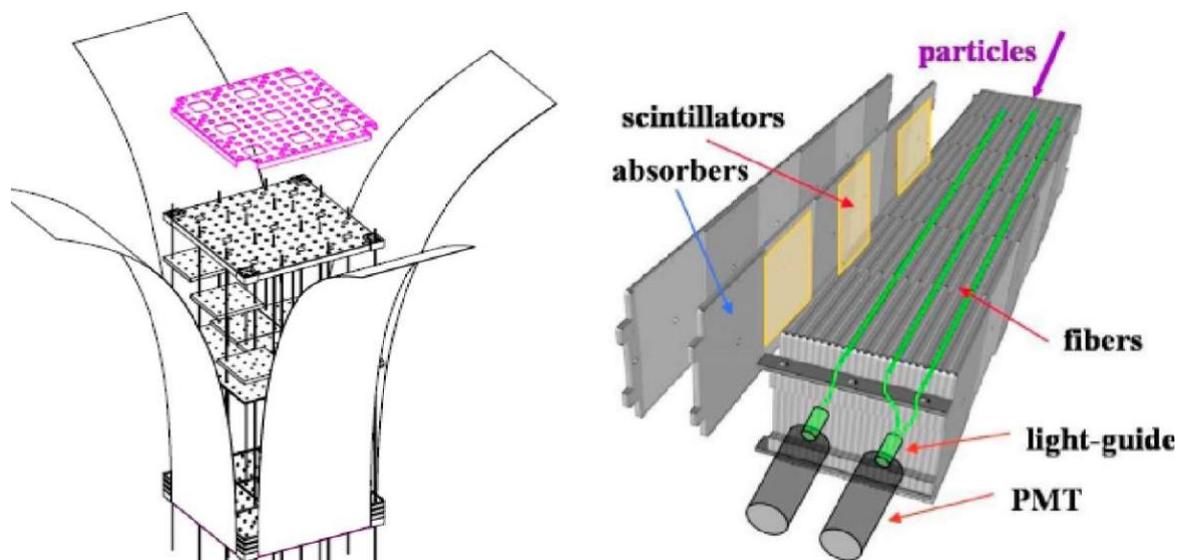


Рисунок 7 – Схематичное изображение модуля электромагнитного калориметра (слева). Схематичное изображение модуля адронного калориметра (справа)

Электромагнитный калориметр собран из модулей, состоящих из перемежающихся слоев сцинтиллятора, толщина которых равна 4 мм, и свинцового поглотителя, толщина которых равна 2 мм каждый [25]. На рисунке 7 (слева) показано схематическое изображение модуля. Полная толщина ECAL равна 42 мм, что соответствует 25 радиационным длинам. Слои ориентированы перпендикулярно оси пучка.

Для уменьшения числа каналов считывающей электроники электромагнитный калориметр разделен на три зоны с разной сегментацией. Размер ячеек во внутренней, средней и внешней зонах равен  $40 \times 40 \text{ мм}^2$ ,  $60 \times 60 \text{ мм}^2$  и  $120 \times 120 \text{ мм}^2$ , соответственно. Подобную сегментацию имеют детектор на основе сцинтилляционных пластин и предливневый детектор, что даёт возможность улучшить качество разделения фотонов, электронов и адронов. В таблице 1 приведены поперечные размеры зон и ячеек для трех

перечисленных подсистем. Чтобы исключить проникновение сцинтилляционного света из одной ячейки в другую, боковые грани пластин покрыты алюминиевой пленкой.

Сразу за электромагнитным калориметром расположен адронный [26], который сконструирован из модулей, состоящих чередующихся слоев поглотителя и сцинтиллятора. Железные пластины поглотителя (16 мм толщиной каждая) переложены сцинтиллятором (толщина одного слоя 4 мм) и расположены вдоль оси пучка, а не перпендикулярно (как это было в электромагнитном калориметре) (рис. 7 (справа)).

Полная толщина адронного калориметра равна 5,6 ядерным длинам взаимодействия. HСAL разделен только на две зоны: внешнюю и внутреннюю. А его ячейки, по сравнению с ячейками электромагнитного калориметра, имеют большие поперечные размеры (Табл. 1). Что обусловлено более широким профилем адронного ливня и позволяет уменьшить число каналов считывающей электроники [27].

Во всех детекторах калориметрической системы светосбор в ячейках осуществляется при помощи пронизывающих каждую из них спектросмещающих оптических волокон, которые проводят свет на фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), где производится считывание сигнала [28]. Каждая ячейка калориметрической системы характеризуется собственным адресом, который однозначно определяет подсистему, зону, ряд и столбец, в котором она находится.

Проектное энергетическое разрешение калориметров составляет:

$$\left. \frac{\sigma_E}{E \text{ (ГэВ)}} \right|_{ECAL} = \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus 1\% \text{ и } \left. \frac{\sigma_E}{E \text{ (ГэВ)}} \right|_{HCAL} = \frac{80\%}{\sqrt{E}} \oplus 10\%.$$

Таблица 1 – Поперечные размеры зон и ячеек (мм<sup>2</sup>) для SPD, PRS, ECAL и HCAL

Зона		SPD	PRS	ECAL	HCAL
Внутренняя	Размер зоны	1950×1430	1914×1435	1950×1454	4202×3676
	Размер ячейки	39.66×39.66	39.8×39.8	40.4×40.4	131.3×131.3
Средняя	Размер зоны	3810×2380	3827×2390	3878×2424	–
	Размер ячейки	59.5×59.5	59.8×59.8	60.0×60.6	–
Внешняя	Размер зоны	7620×6190	7655×6330	7756×6302	8404×6828
	Размер ячейки	119×119	119.5×119.5	121.2×121.2	262.6×262.6

## 1.6 Мюонная система

Мюонная система [29] даёт возможность с высокой эффективностью идентифицировать мюоны и обеспечивает быстрое измерение поперечного импульса мюонов для триггерной системы. Она состоит из пяти станций (рис. 8), разделенных на четыре зоны (R1-R4) в зависимости от удаленности от оси пучка. Перед детектором SPD калориметрической системы находится станция M1, а сразу за системой калориметров расположены станции M2-M5.

Между станциями M1 и M2 находится калориметрическая система, выполняющая роль мюонного фильтра. Между остальными роль поглотителя играют железные пластины толщиной 80 см, соответствующей 20 ядерным длинам взаимодействия.

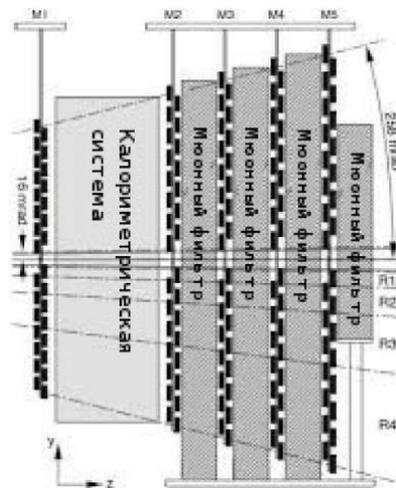


Рисунок 8 – Схема мюонной системы

За исключением зоны R1 в станции M1, все станции представляют собой многопроволочные пропорциональные камеры, заполненные смесью газов: аргон, CO<sub>2</sub> и CF<sub>4</sub> в пропорции 40:55:5. Расстояние между проволоками в детекторе равно 2 мм, а временное разрешение - 5 нс. Во внутренней зоне станции M1 (R1) используется газовый электронный умножитель (GEM), так как там ожидается значительно большая множественность заряженных частиц по сравнению с остальными станциями мюонного детектора.

### 1.7 Восстановление событий

Восстановление событий основано на программном обеспечении BRUNEL, включает в себя реконструкцию треков, первичных вершин, а также идентификацию нейтральных и заряженных частиц.

#### 1. Реконструкция треков

Под реконструкцией подразумевается нахождение треков всех заряженных частиц в событии, независимо от того, были ли эти частицы продуктами распада В-мезона или нет. Треки восстанавливаются по положениям отсчетов, которые оставлены частицей в детекторах VELO, TT, IT и OT.

Траектория заряженной частицы в каждой точке  $z$  характеризуется набором векторов состояния  $(x, v, dx/dz, dy/dz, Q/p)$ , где  $Q$  — это заряд частицы, а  $p$  — ее импульс.

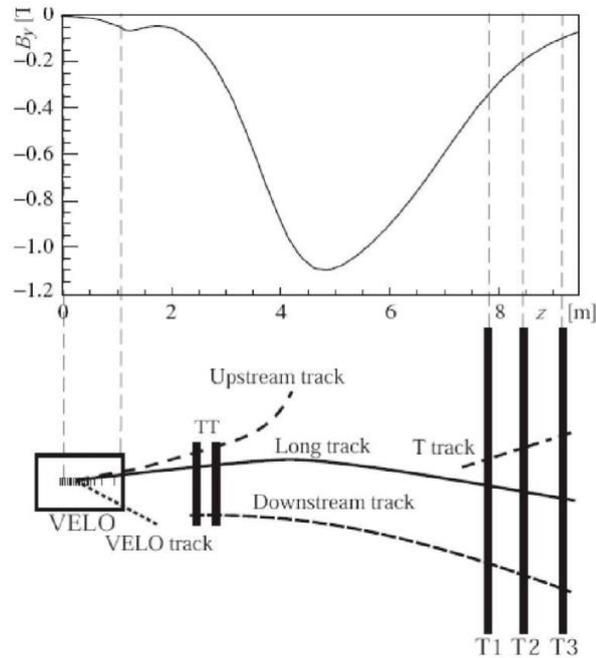


Рисунок 9 – Категории заряженных треков. Сверху приведен график напряженности магнитного поля в  $u$ -проекции

В зависимости от детекторов, в которых были зарегистрированы частицы, выделяют несколько категорий треков (как показано на рисунке 9):

- «длинные» треки, которые пересекают всю установку от VELO-детектора до станции T1-T3;
- «восходящие» треки, которые зарегистрированы только в VELO- и TT- детекторах. Как правило, такие треки, которые оставлены частицами с малым импульсом, останавливаются в поле магнита;
- «нисходящие» треки, которые пересекают только TT- и T-станции. В основном такие треки соответствуют продуктам распадов  $K_s^0$ -мезонов и  $\Lambda$ -барионов, которые распадаются за пределами VELO;

- VELO-треки, которые можно обнаружить только в VELO-детекторе. В основном они соответствуют частицам, которые вылетают под большими углами относительно оси  $z$ . Данные треки используют для реконструкции первичных вершин;
- T- треки, проходящие только через T-станциях. Они обычно производятся во вторичных взаимодействиях, но все же полезны при обработке данных детектора RICH2 для идентификации частиц.

Изначально реконструкция осуществляется с поиска начальных треков в детекторах VELO, TT, IT и OT. Прямые участки траектории восстанавливаются в детекторе VELO с помощью алгоритма распознавания образов треков, описание которого представлено в [30]. В трековых станциях, из-за влияния магнитного поля на заряженные частицы, поиск треков осуществляется в виде искривленных траекторий.

Начальные треки в дальнейшем используются для восстановления треков, которые проходят через весь детектор. В первом случае траекторию начального трека из детектора VELO необходимо экстраполировать в трековых станциях с учетом магнитного поля и сравнивать с положением сработавших сенсоров. Если совпало достаточного количества сработавших сенсоров с экстраполированной траекторией, осуществляется реконструкция трека. Во втором случае траектория начального трека из трековых станций экстраполируется в детектор VELO и сравнивается с положениями сработавших R- и  $\phi$ -сенсоров. Исходя из кривизны траектории в трековых станциях может быть сделана предварительная оценка импульса, а также в предположении, что траектория проходит через первичную вершину, что дает точность оценки  $\sim 1\%$ .

Восстановив все треки, происходит исключение дублирующих треков. Затем положения треков аппроксимируются с использованием фильтра Кальмана [31], учитывая неактивное вещество, находящееся на пути трека.

Что позволяет ввести поправку многократного рассеяния и потерь энергии при прохождении через вещество. Точность реконструкции треков, составляет более 96%.

## **2. Реконструкция первичных вершин**

С помощью итеративной процедуры осуществляется поиск первичных вершин. Сначала для каждого трека, который реконструирован в детекторе VELO, определяется точка, которая принадлежит треку и находится ближе всего к оси пучка. Затем выделяется область с максимальной плотностью, на основе распределения z-координаты этих точек. Среднее значение координаты z в данной области представляет собой вероятную z-координату первичной вершины, предполагая, что вершина расположена на оси пучка. После этого исключают треки с большим значением  $\chi^2$  прицельного параметра по отношению к данной вершине ( $> 225$  на первой итерации и  $> 9$  для последующих). И заново по оставшимся трекам определяется положение вершины. И, пока все рассматриваемые треки не будут иметь достаточно малый  $\chi^2$  по отношению к вершине, данный шаг будет повторяться. Когда остается более пяти треков в результате описанной процедуры, вершина можно считать первичной, и оставшиеся треки будут исключаться из дальнейшего рассмотрения, а процедура поиска первичной вершины повторяется. Когда же данным методом не удастся обнаружить вершину, по максимуму распределения z-координаты будет определяться положение единственной первичной вершины.

## **3. Реконструкция и идентификация фотонов**

Для реконструкции событий в электромагнитном калориметре происходит поиск ячеек, с энерговыведением превышающим энерговыведение в соседних ячейках и поперечной энергией более 50 МэВ. Под «соседними ячейками» подразумеваются, соприкасающиеся с данной ячейкой хотя бы в одной точке. Эти ячейки, совместно с соседними,

образуют кластер. Те кластеры, которые не соответствуют ни одному треку, представляют собой фотонные кандидаты. Для отбора фотонных кандидатов (нейтральных кластеров) каждый кластер сопоставляется со всеми реконструированными треками в событии [32]. Фотоны, которые конвертируют в веществе детектора, восстанавливаются по электрон-позитронной паре. Исходя из гипотезы, что импульса фотона направлен из первичной вершины в точку барицентра кластера, определяется направление этого импульса.

#### **4. Идентификация заряженных частиц**

Идентификации заряженных треков осуществляется благодаря двум детекторам черенковского излучения, калориметрической системе и мюонной системе [33]. В основном детекторы RICH несут ответственность за идентификацию адронов, за идентификацию электронов – калориметрическая система, за идентификацию мюонов – мюонная система. Но также улучшить качество идентификации лептонов можно используя информацию, которая поступает от детекторов RICH, поэтому комбинируется информация от всех четырех систем.

Чтобы осуществить идентификацию адронов необходимо сравнивать кольца черенковского излучения, наблюдаемые в детекторах RICH, с шаблоном, который соответствует набору массовых гипотез [34]. Благодаря данному сравнению определяется правдоподобие той или иной гипотезы ( $L^{RICH}$ ). Мюоны идентифицируются в мюонных станциях с помощью экстраполяции хорошо реконструированных треков с импульсом, превышающим 3 ГэВ/с [35]. Идентификация электронных треков осуществляется путем поиска соответствующего кластера в электромагнитном калориметре [32]. Для каждого трека строится функция, которая учитывает совпадение положений экстраполированного трека и барицентра кластера в ECAL, а также соответствие между импульсом трека и

энергией заряженного кластера. Как и идентификация системой детекторов черенковского излучения RICH, результаты идентификации мюонными и калориметрическими системами выражаются в виде значений правдоподобия для той или иной гипотезы ( $L^{\text{muon}}$  и  $L^{\text{calo}}$ ).

Алгоритмы идентификации заряженных частиц дают возможность верно идентифицировать  $\sim 97\%$  мюонов и  $\sim 95\%$   $\pi$ -мезонов ( $\sim 1 - 3\%$  случаев ложной идентификации мюонов как пионов и при  $\sim 5\%$  случаев ложной идентификации пионов как каонов). Электроны идентифицируются верно в  $90\%$  случаев, при ложной идентифицированных электронов как адроны  $\sim 5\%$ .

### **1.8 Система предварительного отбора событий**

Так как при запланированном режиме работы БАК столкновения протонов происходят с частотой  $40$  МГц, среди них события, которые содержат  $b$ -кварки, происходят с частотой примерно  $100$  кГц, а интерес представляет только небольшая часть из них. Поэтому снижение частоты поступления событий с  $40$  МГц до нескольких килогерц, частота при которой данные записываются в хранилище для дальнейшего анализа [36], является задачей системы предварительного отбора событий эксперимента LHCb [37]. Для этого используется двухуровневый триггер: аппаратный триггер нулевого уровня (L0), снижающий частоту с  $40$  до  $1$  МГц; программные триггеры высокого уровня (HLT1 и HLT2), снижающие частоту до  $3-5$  кГц. На рисунке 10 показана схема работы триггера.



Рисунок 10 – Схема работы триггера

Триггер нулевого уровня использует информацию из трех независимых источников: системы обнаружения событий с большой множественностью, калориметрической системы и мюонной системы. В калориметрической системе отбираются нейтральные пионы, фотоны и адронные кандидаты с большими значениями поперечной энергии. Поиск осуществляется по кластерам из четырех соседних ячеек, в то время как первичная идентификация основывается на информации из детекторов SPD, PRS, ECAL и HCAL. Для срабатывания триггера достаточно хотя бы одного нейтрального пиона или фотонного кандидата, который имеет поперечную энергию выше 2.5 ГэВ, либо адронный кандидат, который имеет поперечную энергию больше 3.5 ГэВ. Поиск одиночных мюонов или мюонных пар осуществляется в мюонной системе. И для того, чтобы триггер сработал, необходим либо одиночный мюон, поперечный импульс которого больше 1.5 ГэВ/с, либо пара мюонов, поперечные импульсы которых удовлетворяют условию  $\sqrt{p_1^T \cdot p_2^T} > 1.3 \text{ ГэВ/с}$ .

События, которые были отобраны триггером L0, затем проходят обработку системой триггеров HLT [38]. Данная обработка информации осуществляется 1350 многопроцессорными узлами с 24000 копиями C++ HLT программ, которые работают параллельно. На данном уровне доступна вся информации с детекторов, а также происходит первичная реконструкция событий. Для этого используются менее точные, но более быстрые алгоритмы реконструкции, чем алгоритмы, которые доступны на уровне полной обработки события.

Проверка решения триггера L0 после уточнения импульсов треков на основе информации из трековой системы осуществляется на первом этапе работы уровня HLT. В некоторых алгоритмах HLT1 [39] происходит поиск дополнительного трека, который не обязательно выбран на уровне L0. Затем поток данных с частотой примерно 10 кГц поступает на уровень HLT2 [40]. Из-за того, что частота событий уже достаточно низкая, на этом этапе проводится полная реконструкция события на основе которой, в событии происходит отбор и инклюзивных, и эксклюзивных распадов адронов, которые содержат  $b$ - и  $c$ -кварки. И после HLT2 события с частотой 3 – 5 кГц записываются в систему хранения данных.

## 2. Поиск распадов $B^\pm \rightarrow J/\psi\eta K^\pm$ и $B^\pm \rightarrow \psi(2S)\eta K^\pm$

### 2.1 Отбор сигнальных $B^\pm$ -кандидатов

Для поиска распада  $B^\pm \rightarrow J/\psi\eta K^\pm$  ( $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ ,  $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ ,  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ) были использованы данные, набранные экспериментом LHCb в протон-протонных столкновениях за 2011-2012 гг., которым соответствуют интегральные светимости  $1 \text{ фб}^{-1}$  при энергии в системе центра масс 7 ТэВ и  $2 \text{ фб}^{-1}$  при 8 ТэВ (Run1), и 2015-2016 гг. – интегральная светимость  $0.3 \text{ фб}^{-1}$  and  $1.67 \text{ фб}^{-1}$  при энергии в системе центра масс 13 ТэВ (Run2). Присутствие  $J/\psi$ -мезона и двух заряженных пионов в конечном состоянии этого распада позволило значительно уменьшить систематическую погрешность измерений.

Распад  $B^\pm \rightarrow J/\psi\eta K^\pm$  восстанавливается с использованием мод распадов  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ ,  $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ . Отбор сигнальных  $B$ -кандидатов производился с помощью наложения ограничений на различные кинематические параметры и идентификацию вторичных частиц.

Начальные значения критериев отбора были установлены так же, как и в предыдущем исследовании LHCb [1]. Для анализа использовались только те события, которые были вызваны наличием сигнала  $J/\psi$ -кандидата, что подразумевает два аппаратных триггерных решения: одномюонное решение, для которого требуется один мюон-кандидат с поперечным импульсом  $P_T$ , превышающим  $1,5 \text{ ГэВ}/c$ , и димюонное решение, которое требует двух мюонных кандидатов с поперечными импульсами  $P_{T1}$  и  $P_{T2}$ , удовлетворяющих условию  $\sqrt{P_{T1} \cdot P_{T2}} > 1.3 \text{ ГэВ}/c$ .

Используемые  $J/\psi$ -кандидаты прошли через линию FullDSTDiMuon-Jpsi2MuMuDetached Stripping21, которая в основном определяла ограничения, применяемые к распаду  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ . Мюоны должны иметь поперечный импульс  $P_T(\mu) > 500 \text{ MeV}/c$  и происходить из общей вершины. Критерии предварительного отбора представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Ограничения предварительного отбора данных (Stripping21)

Величина	Ограничение
В-мезон	
$\chi^2_{\text{vx}}(\text{B})$	< 16
ст, мм	[0.09; 5]
J/ψ → μμ (Jpsi2MuMuDetachedLine)	
μ	IsMuon
PT(μ), ГэВ/c <sup>2</sup>	> 0.500
$\Delta \log L^{\mu-\pi}$	> 0
CloneDist(μ)	> 5000
$\chi^2_{\text{TR}}/\text{ndf}(\mu)$	< 5
$\chi^2_{\text{vx}}/\text{ndf}(\text{J}/\psi)$	< 20
DLS	> 3
π <sup>0</sup> → γγ	
PT(γ), ГэВ/c <sup>2</sup>	> 0.300
PT(π <sup>0</sup> ), ГэВ/c <sup>2</sup>	> 0.500
$\Delta m(\pi^0)$ , ГэВ/c <sup>2</sup>	< 0.060

J / ψ-кандидаты были образованы из пар противоположно заряженных хорошо восстановленных треков. Качество треков обеспечивается за счет того, что  $\chi^2$  аппроксимации каждого из них было наложено ограничение  $\chi^2_{\text{TR}}/\text{ndf}(\mu) < 5$ , где ndf — это число степеней свободы. Каждый трек был

связан с мюонной гипотезой, что означает, что разность логарифмов глобальной вероятности гипотез мюона и адрона [33],  $\Delta \log L^{\mu-h}$ , для трека была не меньше нуля.

В процессе реконструкции заряженных треков может возникать ситуация, когда трек одной и той же частицы оказывается восстановленным дважды. Чтобы отсечь вклад от повторяющихся треков, для каждого из них вычислялось расстояние Кульбака-Либлера [41, 42],  $\text{CloneDist}(\mu)$ . Если его значение оказывалось меньше 5000, то в дальнейшем при формировании  $J/\psi$ -мезона будут использоваться только тот трек, который был лучше восстановлен. Так как пары мюонных треков, формирующих  $J/\psi$ -мезон, должны были происходить из общей вершины, было наложено ограничение на  $\chi^2$  аппроксимации общей вершины [43]:  $\chi^2_{\text{vx}}/\text{ndf} < 20$ . Также чтобы подавить фон от первичных  $J/\psi$ -мезонов, было наложено требование, означающее, что вершина распада  $J/\psi$ -мезона достаточно удалена от вершины протон-протонного взаимодействия: расстояние между первичной и вторичной вершинами, разделенное на ошибку измерения этого расстояния,  $|\text{DLS}|$ , должно было быть  $> 3$ .

Фотоны, которые образуют  $\pi^0$ -кандидаты с инвариантной массой, лежащей в пределах  $\pm 60$  МэВ/с<sup>2</sup> вокруг номинальной массы  $\pi^0$ -мезона, восстанавливаются как нейтральные кластеры в электромагнитном калориметре с поперечный импульс более 300 МэВ/с и с вероятностью (CL) более 1%. Кроме того, было ограничено время пролета  $B^+$ -кандидатов:  $0.95 < \text{ст} < 5$  мм.

Далее отбор кандидатов происходит при помощи ограничений на параметры, представленные в таблице 3. Для отбора использовали программный пакет Bender.

Таблица 3 – Критерии отбора событий

Величина	Ограничение
ст, мм	$> 0.3$
$\chi^2$ dtf (J/Ψ, η, π <sup>0</sup> , PV constraints)	$< 4$
m(J/ψ) , ГэВ /c <sup>2</sup>	[3.056;3.136]
PT (μ), ГэВ/c	$> 0.55$
m(η) , ГэВ/c <sup>2</sup>	[0.487;0.607]
PT (η), ГэВ/c	$> 2$
PT (K <sup>+</sup> ), ГэВ/c	$> 0.5$
PROBNNk(K <sup>+</sup> )	$> 0.3$
PT (π <sup>±</sup> ), ГэВ/c	$> 0.5$
m(π <sup>0</sup> ) , ГэВ/c <sup>2</sup>	[0.11;0.16]
PT (γ), ГэВ/c	$> 0.3$
CL(γ)	$> 0.1$

Обработка данных была выполнена с использованием системы распределённых вычислений GRID и программного пакета Ganga.

## 2.2 Наблюдение распада $B^\pm \rightarrow J/\psi \eta K^\pm$

Данных ограничений было достаточно для построения гистограммы распределение по инвариантной массе  $J/\psi \eta K^\pm$  (рис. 11). Построение гистограмм осуществлялось с помощью библиотеки RooFit и набора расширений Ostar. Гистограмма и её аппроксимация были построены с использованием набора расширений Ostar. Сигналу соответствует функция Гаусса, фону – экспонента и фазовый объем трех частиц в четырехчастичном

распаде (вклад от распада  $B^{\pm} \rightarrow J/\psi \eta K^{\pm}$   $\pi$ , в случае, когда  $\pi$ -мезон не был реконструирован).

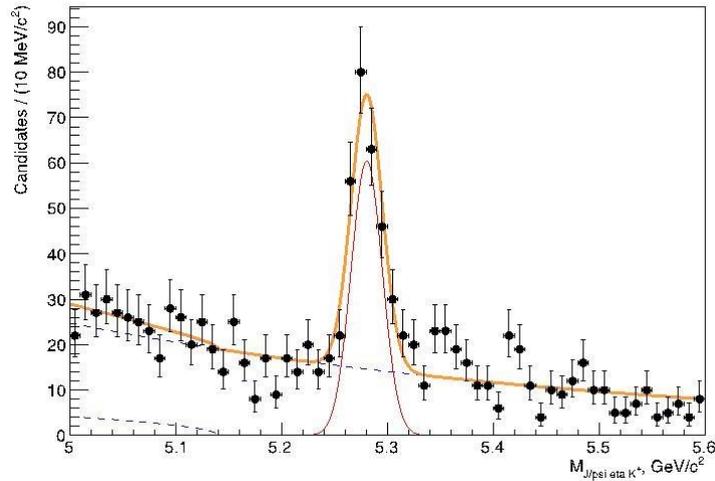


Рисунок 11 – Гистограмма распределение по инвариантной массе  $B^+$ -кандидатов

Параметры аппроксимации представлены в таблице 4. В распределении хорошо виден сигнальный пик, соответствующий распаду  $B^{\pm} \rightarrow J/\psi \eta K^{\pm}$ . Количество сигнальных событий в пике, полученное в результате анализа, составило  $266 \pm 22$ . Положение пика соответствует  $5281.4 \pm 1.3$  МэВ/ $c^2$ , что в пределах погрешности совпадает с номинальной массой  $B^+$ -мезона. Статистическая значимость более  $10\sigma$ .

Таблица 4 – Параметры аппроксимации инвариантной массы  $J/\psi \eta K^+$

Параметр	Значение
N	$266 \pm 22$
среднее, МэВ/ $c^2$	$5281.4 \pm 1.3$
разрешение, МэВ/ $c^2$	$14.7 \pm 1.4$
параметр фаз.пр., МэВ/ $c^2$ (фикс)	5.14

В дальнейшей работе была поставлена задача поиска резонансов.

## 2.3 Поиск промежуточных резонансов

Для поиска промежуточных резонансов использовалась техника sPlot, входящая в программу RooFit. Данная техника заключается в следующем: с помощью аппроксимирующей функции распределения  $B^\pm$ -кандидатов определяется вероятность оказаться сигнальным или фоновым событием в распределении  $B^\pm$  по инвариантной массе для каждого события. Далее эта вероятность используется для того, чтобы каждому  $B^\pm$ -кандидату приписать положительный (соответствующий сигнальным кандидатам) или отрицательный (фоновым) вес. С помощью этого инструмента представляется возможным построить распределение по инвариантной массе исследуемого резонанса только для сигнальных  $B^\pm$ -кандидатов и таким образом получить распределение без фоновых событий.

Для данного анализа необходимо построить распределения для инвариантных масс промежуточных резонансов:  $\pi^0$ ,  $\eta$ . Для таких распределений инвариантное массовое окно было расширено.

На рисунке 12.б представлен sPlot для  $\pi^0$  без констрейнта на  $\pi^0$  и расширенным массовым окном ( $m(\pi^0)=[90;180]\text{МэВ}/c^2$ ), сигнал аппроксимирован функцией Гаусса, фон – константой.

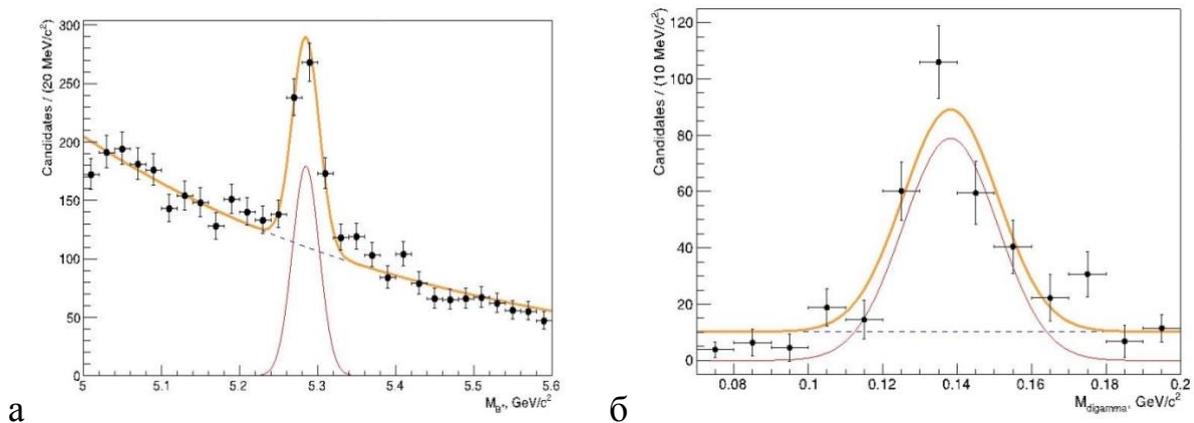


Рисунок 12 – Инвариантная масса  $B^\pm$ -мезона с расширенным массовым окном для  $\pi^0$  (а). sPlot для  $\pi^0$  (б)

Параметры аппроксимации sPlot для  $\pi^0$  представлены в таблице 5. В распределении хорошо виден сигнальный пик, соответствующий распаду  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ . Как видно, sPlot для  $\pi^0$  одержит в большом количестве фоновые события. Измеренная масса  $\pi^0$  не соответствует его номинальной массе.

Таблица 5 – Параметры аппроксимации sPlot для  $\pi^0$

Параметр	Значение
N(B)	$385 \pm 33$
среднее (B), МэВ/ $c^2$	$5285 \pm 1.6$
разрешение (B), МэВ/ $c^2$	$17.1 \pm 1.7$
N( $\pi^0$ )	$252 \pm 19$
среднее ( $\pi^0$ ), МэВ/ $c^2$	$138.2 \pm 1.1$
разрешение ( $\pi^0$ ), МэВ/ $c^2$	$12.7 \pm 1.3$
N( $\pi^0$ ), фон	$133 \pm 16$

На рисунке 13.б представлен sPlot для  $\eta$  без констрейнта на  $\eta$  и  $\pi^0$  с расширенным массовым окном на  $\eta$  ( $m(\eta) = [480; 6200]$  МэВ/ $c^2$ ), сигнал аппроксимирован функцией Гаусса, фон – константой.

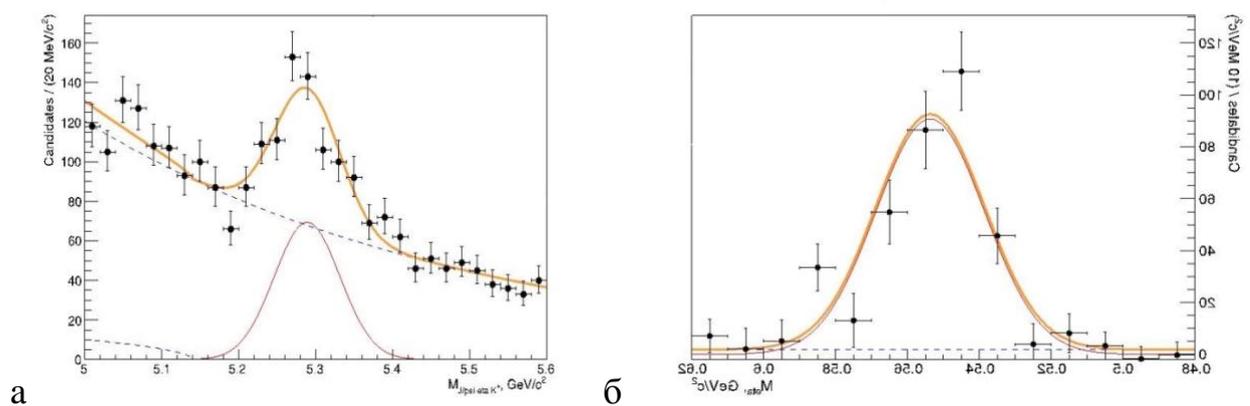


Рисунок 13 – Инвариантная масса  $B^\pm$ -мезона с расширенным массовым окном для  $\eta$  (а). sPlot для  $\eta$  (б)

Параметры аппроксимации sPlot для  $\eta$  представлены в таблице 6, сигнал аппроксимирован функцией Гаусса, фон – константой. В распределении хорошо виден сигнальный пик, соответствующий распаду  $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ . Как видно, sPlot для  $\eta$  одержит некоторый фон. Измеренная масса  $\eta$ -мезона не соответствует его номинальной массе.

Таблица 6 – Параметры аппроксимации sPlot для  $\eta$

Параметр	Значение
N(B)	$370 \pm 47$
среднее (B), МэВ/ $c^2$	$5289.1 \pm 4.6$
разрешение (B), МэВ/ $c^2$	$42.6 \pm 4.6$
N( $\eta$ )	$345 \pm 23$
среднее ( $\eta$ ), МэВ/ $c^2$	$553.7 \pm 0.9$
разрешение ( $\eta$ ), МэВ/ $c^2$	$15.1 \pm 1.2$
N( $\eta$ ), фон	$26 \pm 14$

Тогда, предположив, что часть обнаруженных  $B^\pm$ -мезонов распадаются по другим каналам распада, были выполнены поиски отражений. На рисунках 14-15 представлены sPlot для инвариантных масс комбинаций дочерних частиц  $J/\psi(\mu^+ \mu^-)\eta(\pi^+ \pi^- \pi^0)K^\pm$  без констрейнта на  $\pi^0$ .

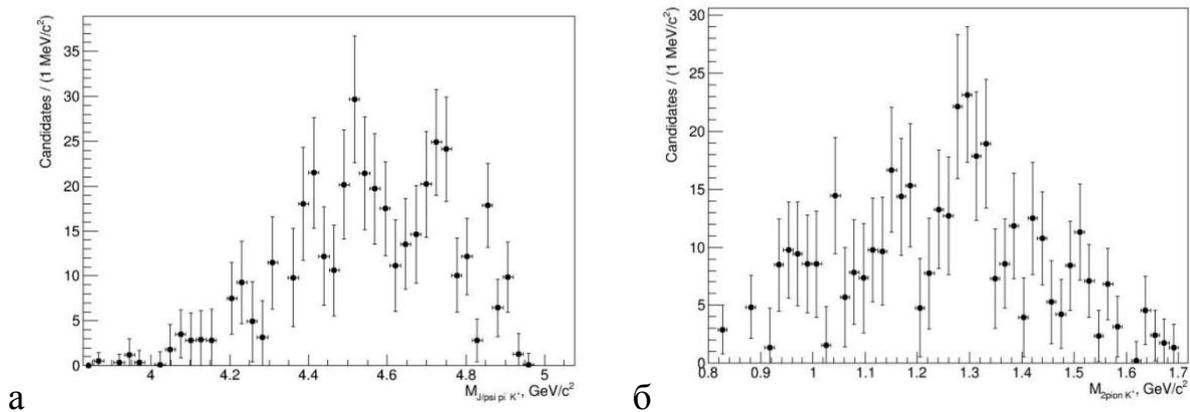


Рисунок 14 – sPlot для комбинаций инвариантных масс частиц:  $J/\psi\pi K^-$  (а),  $\pi^+\pi^-K^+$  (б)

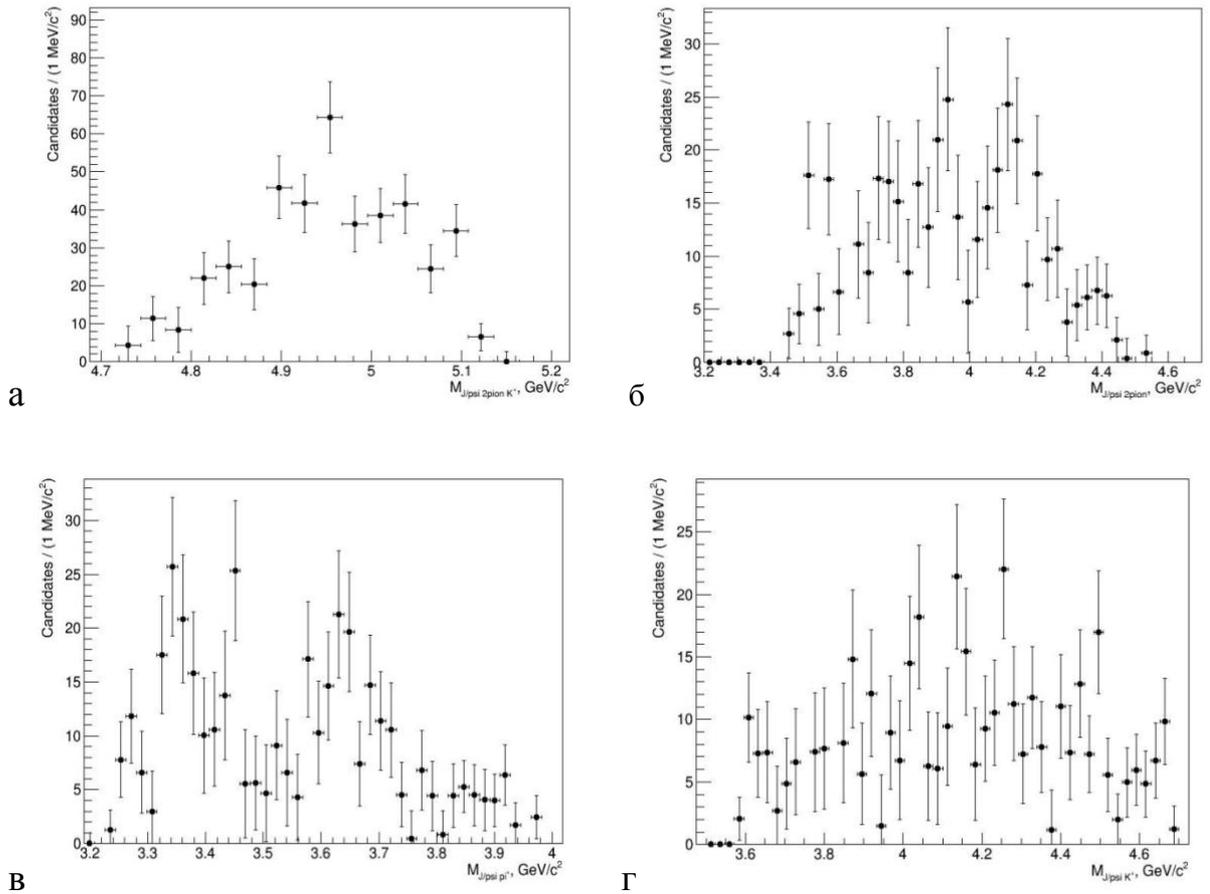


Рисунок 15 – sPlot для комбинаций инвариантных масс частиц:  $J/\psi \pi^+\pi^- K^\pm$  (а),  $J/\psi \pi^+\pi^-$  (б),  $J/\psi \pi^+$  (в),  $J/\psi K^+$  (г)

Как видно, вкладов от других каналов распадов обнаружить не удалось. Тогда предположили, что вклад в сигнал  $B^+$ -мезона, который распадается по каналу  $B^+ \rightarrow J/\psi \eta K^+$ ,  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ,  $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ , дают распады  $\eta$ -мезона в случае, когда  $\eta$  распадается по каналу  $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$  с добавлением случайного фотоном.

Таблица 7 – Каналы распада  $\eta$ -мезонов

	Отношение ( $\Gamma_i/\Gamma$ )
$\pi^+ \pi^- \pi^0$	$(22.92 \pm 0.28) \%$
$\pi^+ \pi^- \gamma$	$(4.22 \pm 0.08) \%$

Зная отношение парциальных ширин данных каналов распадов (таб. 7) и количество  $\eta$ -мезонов, распадающихся по каналу  $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ , вычислили примерное количество  $\eta$ -мезонов, распадающихся по каналу  $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ :

$$N_{\pi^+\pi^-\gamma} \approx \frac{Br(\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma)}{Br(\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)} \cdot N_{\pi^+\pi^-\pi^0} \sim 50.$$

Далее был построен sPlot для инвариантных масс комбинаций  $\pi^+\pi^-\gamma_1$  и  $\pi^+\pi^-\gamma_2$  (рис. 16).

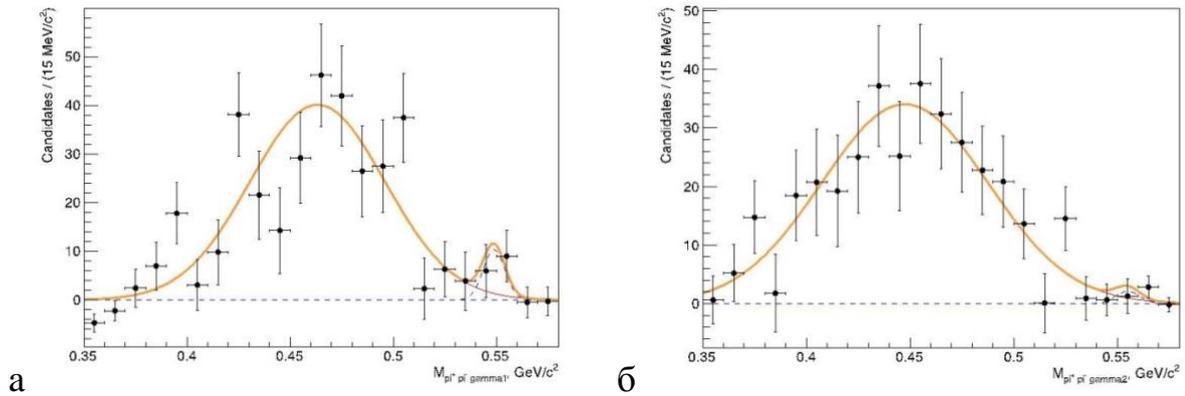


Рисунок 16 – sPlot для инвариантных масс  $\pi^+\pi^-\gamma_1$ (а) и  $\pi^+\pi^-\gamma_2$  (б)

На гистограммах (рис. 16) достаточно чётко видны небольшие пики в области номинальной массы  $\eta$ -мезона. Сигнал аппроксимирован функцией гаусса и вторым гауссом – пик в области номинальной массе  $\eta$ . Параметры аппроксимации sPlot для инвариантных масс комбинаций  $\pi^+\pi^-\gamma_1$  и  $\pi^+\pi^-\gamma_2$  представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Параметры аппроксимации sPlot для инвариантных масс  $\pi^+\pi^-\gamma_1$  и  $\pi^+\pi^-\gamma_2$

Параметр	$\pi^+\pi^-\gamma_1$	$\pi^+\pi^-\gamma_2$
N( $\eta$ )	$13 \pm 2$	$3 \pm 1$
среднее( $\eta$ ), МэВ/ $c^2$	$549.7 \pm 6.2$	$555 \pm 1.6$
разрешение ( $\eta$ ), МэВ/ $c^2$	$5.3 \pm 0.1$	$5.8 \pm 1.8$

Затем была построена гистограмма суммы sPlot для инвариантных масс  $\pi^+\pi^-\gamma_1$  и  $\pi^+\pi^-\gamma_2$  (рис. 17). Параметры аппроксимации представлены в таблице 9.

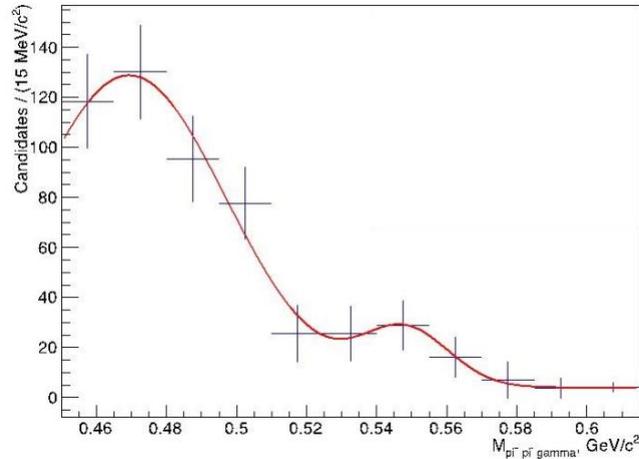


Рисунок 17 – Гистограмма инвариантной массы суммы sPlot для инвариантных масс  $\pi^+\pi^-\gamma_1$  и  $\pi^+\pi^-\gamma_2$

На гистограмме (рис. 17) виден небольшие пики в области номинальной массы  $\eta$ -мезона. Сигнал аппроксимирован функцией гаусса, фон – константой и вторым гауссом – пик в области номинальной массе  $\eta$ .

Таблица 9 – Параметры аппроксимации гистограммы инвариантной массы суммы sPlot для инвариантных масс  $\pi^+\pi^-\gamma_1$  и  $\pi^+\pi^-\gamma_2$

Параметр	Значение
$N(\eta)$	$60 \pm 30$
среднее ( $\eta$ ), МэВ/ $c^2$	$548.1 \pm 6.7$
разрешение ( $\eta$ ), МэВ/ $c^2$	$12.6 \pm 5.7$

Как видно из гистограммы (рис. 17), во втором пике содержится примерно 60 событий, что в пределах погрешности совпадает с ожидаемым результатом. Таким образом, область  $\pm 3\sigma$  от массы  $\eta$ -мезона была вырезана из инвариантной массы комбинаций  $\pi^+\pi^-\gamma_1$  и  $\pi^+\pi^-\gamma_2$  [577;505] МэВ/ $c^2$  – VETO.

После установления ограничения на инвариантную массу  $\pi^+\pi^-\gamma$  (VETO) стоим распределение по инвариантной массе искомым  $B^\pm$ -кандидатов и проводим проверку резонансов.

На рисунке 18 представлены распределение  $B^\pm$ -мезона, после (а) и до (б) установления VETO. Параметры аппроксимации представлены в таблице 10.

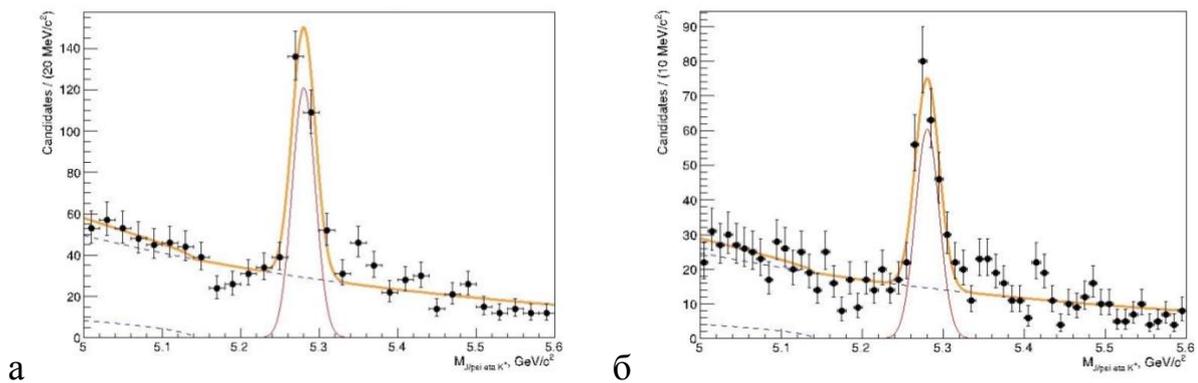


Рисунок 18 – Гистограмма распределения по инвариантной массе  $B^\pm$ -кандидатов после (а) и до (б) установления ограничения на массу  $\pi^+\pi^-\gamma$

Сигнал аппроксимирован функцией Гаусса, фон – экспонентой и функцией фазового объема трех частиц в четырехчастичном распаде (вклад от распада  $B^\pm \rightarrow J/\psi \eta K^\pm \pi$ , в случае, когда  $\pi$ -мезон не был реконструирован).

Таблица 10 – Параметры аппроксимации инвариантной массы  $B^\pm$ -кандидатов после (а) и до (б) установления VETO

Параметр	Значение	Значение
	После	До
N	$223 \pm 20$	$266 \pm 22$
среднее, МэВ/ $c^2$	$5280.5 \pm 6.7$	$5281.4 \pm 1.3$
разрешение, МэВ/ $c^2$	$14.7 \pm 1.4$	$14.7 \pm 1.4$
параметр фаз.пр., МэВ/ $c^2$ (фикс)	5.14	

После установления VETO количество сигнальных событий в пике, полученное в результате анализа, составило  $223 \pm 20$ . Как видим, количество событий уменьшилось незначительно, и измеренная масса равна  $5280.5 \pm 6.7$ , что в пределах погрешности совпадает с номинальной массой  $B^+$ -мезона.

Далее осуществлялась проверка резонансов. На рисунке 19 представлено распределение  $B^+$ -мезона с помощью которого сделан sPlot для  $\eta$  после (а) и до (б) установления ограничения (VETO), без констрейнта на  $\eta$  и  $\pi^0$  и с расширенным окном для  $\eta$  ( $m(\eta) = [480;6200]$  МэВ/ $c^2$ ). Параметры аппроксимации представлены в таблице 11.

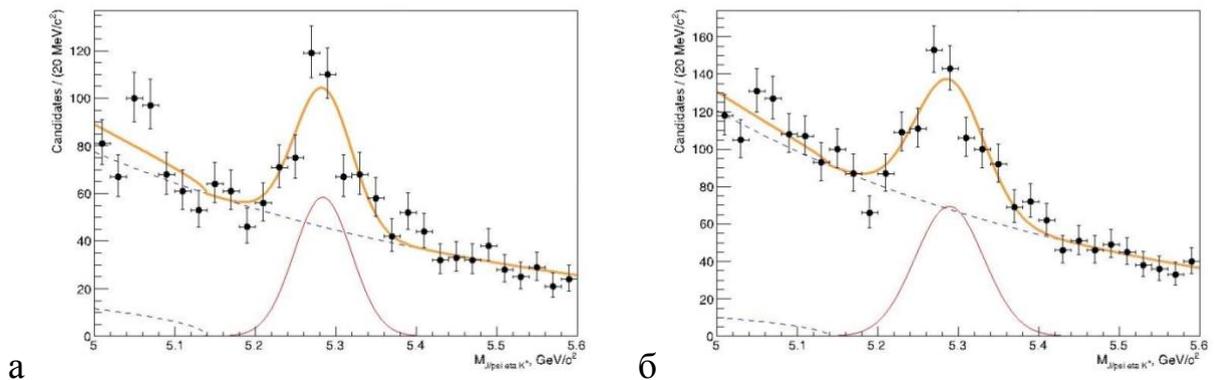


Рисунок 19 – Гистограмма распределение по инвариантной массе  $B^+$ -кандидатов для sPlot для  $\eta$  после (а) и до (б) установления VETO

Таблица 11 – Параметры аппроксимации инвариантной массы  $B^+$ -кандидатов для sPlot для  $\eta$  после и до установления VETO

Параметр	Значение	Значение
	После	До
N	$260 \pm 36$	$370 \pm 47$
среднее, МэВ/ $c^2$	$5284.1 \pm 4.3$	$5289.1 \pm 4.6$
разрешение, МэВ/ $c^2$	$35.5 \pm 5.1$	$42.6 \pm 4.6$
параметр фаз.пр., МэВ/ $c^2$ (фикс)	5.14	

Количество сигнальных событий после установления ограничения существенно уменьшилось и пределах погрешности совпадает с числом событий в найденного  $B^\pm$ -мезона.

На рисунке 20 представлен sPlot для  $\eta$  после (а) и до (б) установления ограничения (VETO), без констрейнта на  $\eta$  и  $\pi^0$  и с расширенным окном для  $\eta$  ( $m(\eta) = [480;6200]$  МэВ/ $c^2$ ). Параметры аппроксимации представлены в таблице 12.

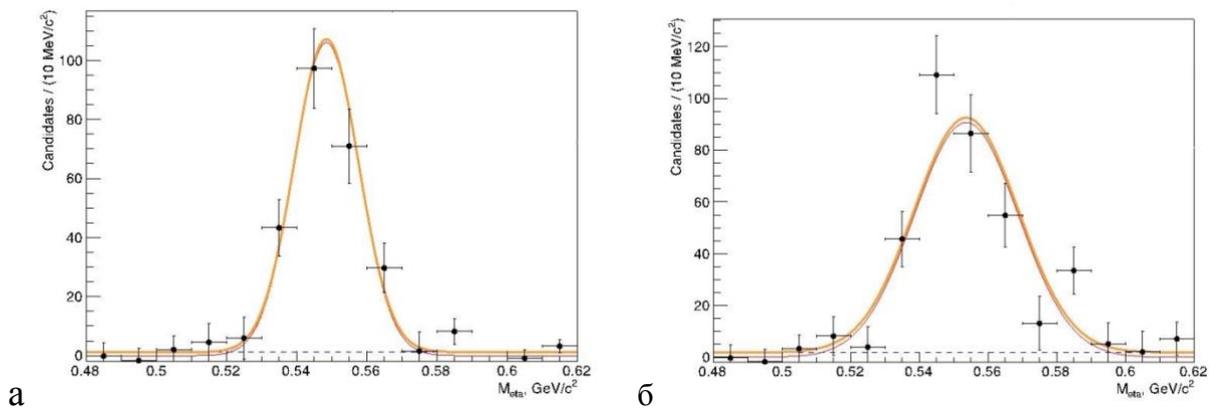


Рисунок 20 – sPlot для  $\eta$  после (а) и до (б) установления VETO

Таблица 12 – Параметры аппроксимации sPlot для  $\eta$  после и до установления VETO

Параметр	Значение	Значение
	После	До
N	$243 \pm 16$	$345 \pm 23$
среднее, МэВ/ $c^2$	$548.5 \pm 0.6$	$553.7 \pm 0.9$
разрешение, МэВ/ $c^2$	$9.5 \pm 0.5$	$15.1 \pm 1.2$
N( $\eta$ ), фон	$17 \pm 5$	$26 \pm 14$

Как видно, с таким ограничением число событий в sPlot для  $\eta$  в пределах погрешности соответствует числу событий в сигнале  $B^\pm$ . Масса  $\eta$ -мезона в пределах погрешности соответствует его номинальной массе и разрешение значительно улучшилось.

На рисунке 21 представлено распределение  $B^+$ -мезона без констрейнта на  $\pi^0$ , с помощью которого сделан sPlot для  $\pi^0$ .

На рисунке 21 представлено распределение  $B^+$ -мезона с помощью которого сделан sPlot для  $\pi^0$  после (а) и до (б) установления ограничения (VETO), без констрейнта на  $\pi^0$  и с расширенным окном для  $\pi^0$  ( $m(\pi^0)=[90;180]MэВ/c^2$ ). Параметры аппроксимации представлены в таблице 13.

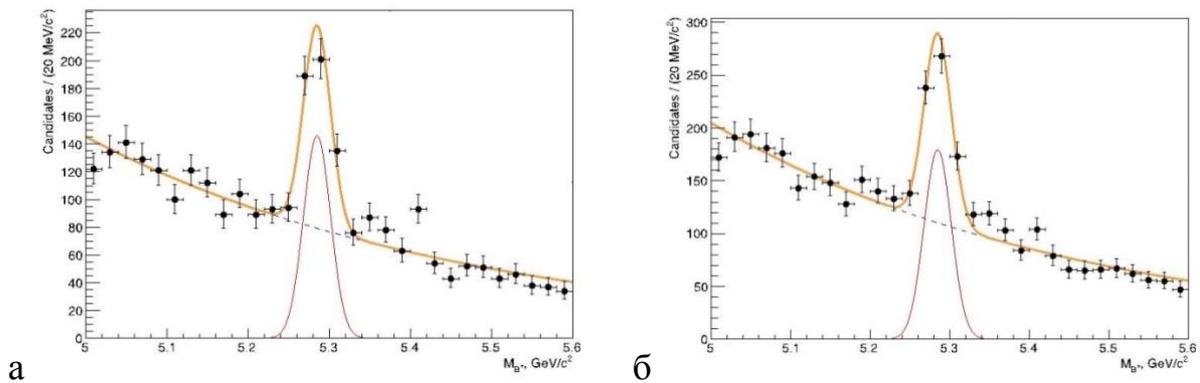


Рисунок 21 – Гистограмма распределение по инвариантной массе  $B^+$ -кандидатов для sPlot для  $\pi^0$  после (а) и до (б) установления VETO

Таблица 13 – Параметры аппроксимации инвариантной массы  $B^+$ -кандидатов для sPlot для  $\pi^0$  после и до установления VETO

Параметр	Значение	Значение
	После	До
N	$305 \pm 28$	$385 \pm 33$
среднее, $MэВ/c^2$	$5285.1 \pm 1.7$	$5285 \pm 1.6$
разрешение, $MэВ/c^2$	$16.7 \pm 1.7$	$17.1 \pm 1.7$
параметр фаз.пр., $MэВ/c^2$ (фикс)	5.14	

Количество сигнальных событий после установления ограничения существенно уменьшилось незначительно и превышает данное значение в найденном  $B^\pm$ -мезоне.

На рисунке 22 представлен sPlot для  $\pi^0$  после (а) и до (б) установления ограничения (VETO), без констрейнта на  $\pi^0$  и с расширенным окном для  $\pi^0$  ( $m(\pi^0)=[90;180]$ МэВ). Параметры аппроксимации представлены в таблице 14.

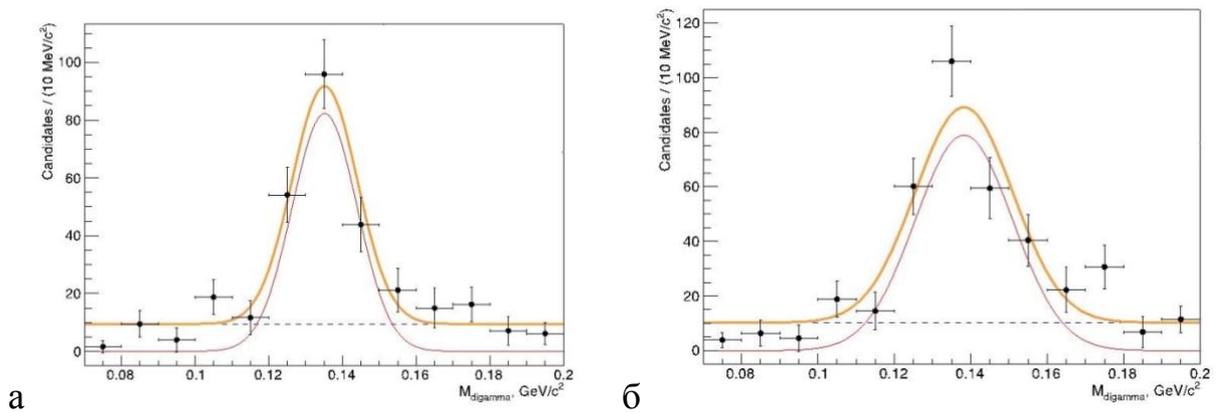


Рисунок 22 – Plot для  $\pi^0$  после (а) и до (б) установления VETO

Таблица 14 – Параметры аппроксимации sPlot для  $\pi^0$  после и до установления VETO

Параметр	Значение	Значение
	После	До
N	$182 \pm 17$	$252 \pm 19$
среднее, МэВ/ $c^2$	$135.2 \pm 0.8$	$138.2 \pm 1.1$
разрешение, МэВ/ $c^2$	$8.8 \pm 0.9$	$12.7 \pm 1.3$
N( $\eta$ ), фон	$123 \pm 15$	$133 \pm 16$

Как видно, после установления VETO sPlot для  $\pi^0$  всё ещё содержит в большом количестве фоновые события, но тем не менее масса  $\pi^0$  в пределах погрешности соответствует его номинальной массе и разрешение значительно улучшилось.

## 2.4 Перекрёстная проверка

Было проведено сравнение данных за Run1 и Run2, представленное на рисунках 23-24. Параметры аппроксимации гистограмм (рис. 23-24) представлены в таблице в таблице 15.

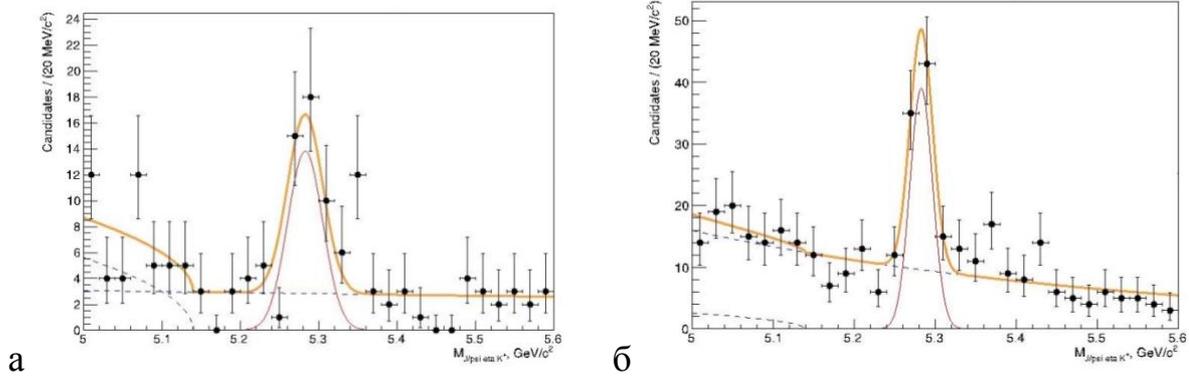


Рисунок 23 – Гистограмма распределение по инвариантной массе  $B^+$ -кандидатов для за Run1 – 2011 г. (а) и 2012 г. (б).

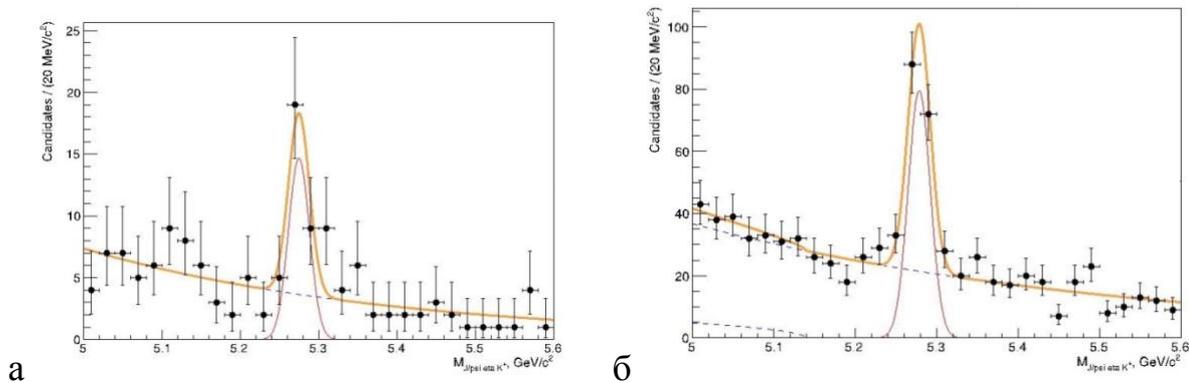


Рисунок 24 – Гистограмма распределение по инвариантной массе  $B^+$ -кандидатов для за Run2 – 2015 г. (а) и 2016 г. (б).

Таблица 15 – Параметры аппроксимации гистограмм (рис. 23-24)

	2011	2012	2015	2016
$\frac{N}{\sigma_{pp \rightarrow bb} \cdot \int L dt}$	$0.541 \pm 0.111$	$0.473 \pm 0.076$	$0.506 \pm 0.142$	$0.528 \pm 0.062$
	$\cdot 10^{-9}$	$\cdot 10^{-9}$	$\cdot 10^{-9}$	$\cdot 10^{-9}$
$\int L dt, \text{ фб}^{-1}$	1	2	0.32	1.67

$\sigma_{pp \rightarrow bb}$ , МКБ	$72.0 \pm 0.3 \pm$	$72.0 \pm 0.3 \pm$	$154.3 \pm 1.5 \pm$	$154.3 \pm 1.5 \pm$
	6.8	6.8	14.3	14.3
N	$39 \pm 8$	$68 \pm 11$	$25 \pm 7$	$136 \pm 16$

В пределах погрешности отношение числа сигнальных событий к произведению сечения рождения b-кварков в протон-протонных столкновениях и интегральной светимости за каждый год совпадает.

На рисунке представлены сравнение данных, когда магнитные линии направлены вверх и вниз. Параметры аппроксимации гистограмм представлены в таблице в таблице 16.

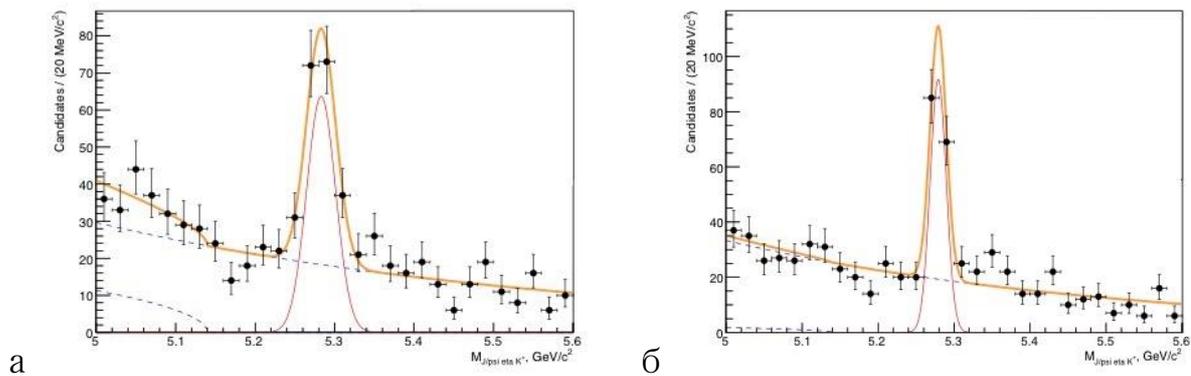


Рисунок 25 – Гистограмма распределение по инвариантной массе  $B^+$ -кандидатов, когда магнитные линии направлены вверх (а) и вниз (б)

Таблица 16 – Параметры аппроксимации

	магнит вверх	магнит вниз
N	$145 \pm 17$	$122 \pm 14$
среднее, МэВ/ $c^2$	$5283 \pm 6.3$	$5279.1 \pm 1.3$
разрешение, МэВ/ $c^2$	$18.2 \pm 2.1$	$10.6 \pm 1.1$

Как видно, в пределах погрешности количество сигнальных событий совпадает, а их сумма совпадает с числом сигнальных событий, которое было получено в обнаруженном  $B^+$ -мезоне

## 2.4 Наблюдение распада $B^\pm \rightarrow \psi(2S)\eta K^\pm$

Далее проведён анализ по поиску распада  $B^\pm \rightarrow \psi(2S)(\psi(2S) \rightarrow \mu^+ \mu^-) \eta (\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 (\pi \rightarrow \gamma\gamma)) K^\pm$  и сделано его первое наблюдение.

На рисунке 26 представлено распределение по инвариантной массе  $B^\pm$ -кандидатов распадающихся по каналу  $B^\pm \rightarrow \psi(2S)\eta K^\pm$ , массовое окно для  $\psi(2S) - m(\psi(2S)) = [3630; 3750]$  МэВ/ $c^2$ . Сигналу аппроксимирован функцией Гаусса, фон – экспонентой.

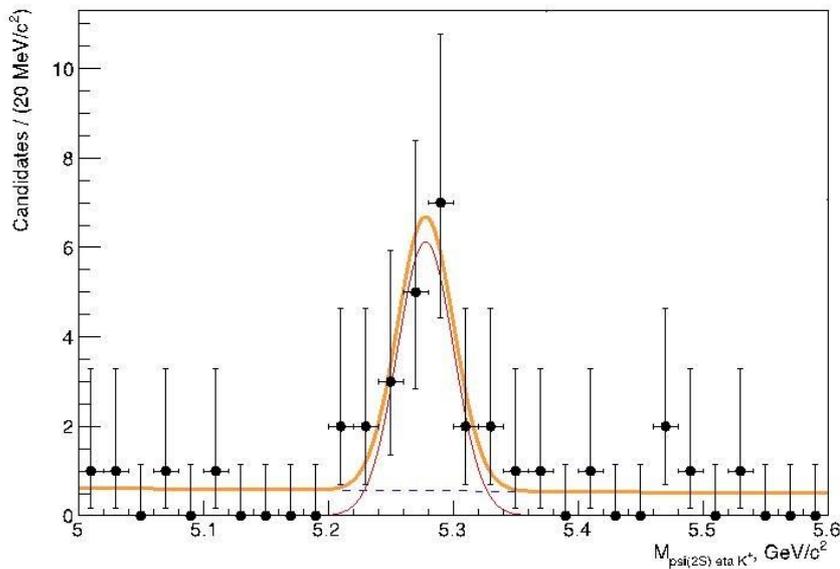


Рисунок 26 – Гистограмма распределение по инвариантной массе  $B^\pm$ -кандидатов

Параметры аппроксимации представлены в таблице 17. В распределении хорошо виден сигнальный пик, соответствующий распаду  $B^\pm \rightarrow \psi(2S)\eta K^\pm$ .

Таблица 17 – Параметры аппроксимации инвариантной массы  $J/\psi\eta K^\pm$

Параметр	Значение
N	$17 \pm 5$
среднее, МэВ/ $c^2$	$5278 \pm 8.5$
разрешение, МэВ/ $c^2$	$22.5 \pm 9.2$

Количество сигнальных событий в пике, полученное в результате анализа, составило  $17 \pm 5$ . Положение пика соответствует  $5278 \pm 8.5$  МэВ/ $c^2$ , что в пределах погрешности совпадает с номинальной массой  $B^+$ -мезона. Разрешение распада  $B^\pm \rightarrow \psi(2S)\eta K^\pm$  в пределах погрешности совпадает с разрешением распада  $B^\pm \rightarrow J/\psi \eta K^\pm$ . Статистическая значимость равна приблизительно  $5.7\sigma$  (рис. 27).

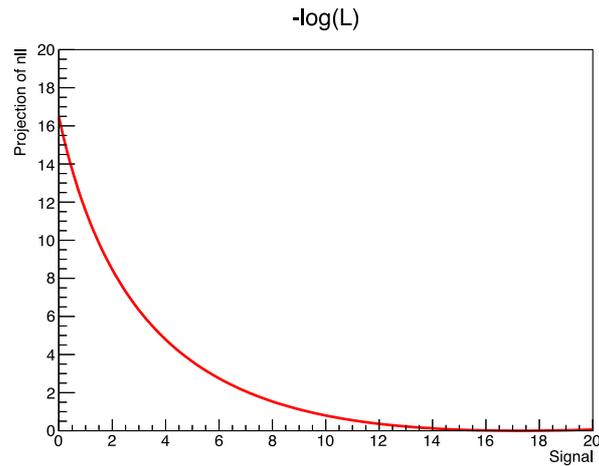


Рисунок 27 – График определения статистической значимости найденного распада  $B^\pm \rightarrow \psi(2S)\eta K^\pm$

## Заключение

1. В данных, набранных экспериментом LHCb в протон-протонных столкновениях в течение Run1 и Run2 и соответствующей интегральной светимости  $5 \text{ fb}^{-1}$ , наблюдался сигнал распада  $B^{\pm} \rightarrow J/\psi \eta K^{\pm}$  с использованием моды  $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ ;

2. Проведенные проверки подтвердили резонансную структуру конечного состояния распада, а также позволили обнаружить небольшой вклад от распадов  $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$ ;

3. Первое наблюдение канала распада  $B^{\pm} \rightarrow \psi(2S) \eta K^{\pm}$ .

### **3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

На сегодняшний день перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Коммерческая привлекательность научного исследования определяется как превышением технических параметров над предыдущими разработками, так и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на вопросы— будет ли продукт востребован рынком; какова будет его цена; каков бюджет научного проекта; какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

-оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;

-определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;

-планирование научно-исследовательских работ;

-определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

### **3.1 Предпроектный анализ**

#### **3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

В данной работе проводилось исследование распадов  $B$ -мезонов в трехчастичные конечные состояния с чармонием в эксперименте Большого адронного коллайдера, посвященном исследованию прелестных адронов. Был проведен физический анализ данных набранных в эксперименте LHCb за 2011-2012 гг., которым соответствуют интегральные светимости  $1 \text{ fb}^{-1}$  при энергии в системе центра масс  $7 \text{ ТэВ}$  и  $2 \text{ fb}^{-1}$  при  $8 \text{ ТэВ}$ , и 2015-2016 гг. – интегральная светимость  $0.3 \text{ fb}^{-1}$  and  $1.67 \text{ fb}^{-1}$  при энергии в системе центра масс  $13 \text{ ТэВ}$ . Коммерческий потенциал данного исследования отсутствует. В связи с этим анализ потенциальных потребителей результатов сделан не был. Такое моделирование может быть полезным организациям, занимающимся научными теоретическими исследованиями в области физики высоких энергий, физик элементарных частиц. В качестве заинтересованных могут выступать крупные коллаборации, проводящие эксперименты на адронных коллайдерах различного типа, а также специализированные асимметричные « $B$ -фабрики», например, установка Belle [4] на ускорителе KEKB (КЕК, Япония) и установка BaBar [5] на ускорителе PEP-II (SLAC, США).

Главными преимуществами данного исследования являются большое сечение рождения  $b$ -кварков и возможность рождения всех возможных  $B$ -мезонов по сравнению с другими экспериментами и при этом большое количество набранных экспериментальных данных.

#### **3.1.2 Диаграмма Исикавы**

Диаграмма причины-следствия Исикавы (Cause-and-Effect-Diagram) - это графический метод анализа и формирования причинно-следственных

связей, инструментальное средство для систематического определения причин проблемы и последующего графического представления.

Область применения диаграммы:

- 2 Выявление причин возникновения проблемы;
- 3 Анализ и структурирование процессов на предприятии;
- 4 Оценка причинно-следственных связей.

Объектом анализа является распределение по инвариантной массе  $B^+$  - мезона, распадающегося по каналу  $B^+ \rightarrow J/\psi \eta K^+$  ( $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  и  $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ ), построенное на основе данных набранных в эксперименте LHCb.

Факторы, влияющие на объект анализа:

- эксперты;
- технология проведения работ;
- производственная среда;
- оборудование.

Экспертами данного исследования являются:

- физик-программист;
- инженер-физик ускорителей;
- инженер-физик высоких энергий;
- физик элементарных частиц.

На выполнение работы существенное влияние оказывают эксперты, так как основная работа заключается в разработке кода, физик-программист может оценить эффективность его написания, а физики – правильность физического аспекта работы, так как исследуемые процессы должны быть возможными, а критерии отбора зависят от параметров ускорителя.

К технологии проведения работы относятся данные на основе которых проводится НТИ, описание данных представлено в разделе 2:

- данные набранные за 2011/2012 гг (Run 1);
- данные набранные за 2011/2012 гг (Run 2);

От качества набранных (RunI и RunII) и смоделированных (Монте-Карло) зависит правильность результатов НТИ. При обработки данных может возникнуть ряд проблем, так как, во время набора статистики, в детекторе случаются поломки. Поэтому при разработке кода нужно учитывать вероятность таких ошибок.

Под производственной средой подразумеваем среду в которой разрабатываем код, а именно:

- язык программирования python;
- программные пакеты Bender и Ganga;
- библиотеки ROOT и RooFit;
- наборы расширений Ostar.

Для выполнения НТИ необходимо владеть языками программирования, так как вся работа осуществляется с помощью языка программирования python, который разработан на языке C++. Также во время работы нужно изучать программные пакеты Bender и Ganga, библиотеки ROOT и RooFit и наборы расширений Ostar и Bender, так как они постоянно обновляются.

В качестве оборудования использовали:

- рабочий персональный компьютер;
- Домашний персональный компьютер;

Так как оборудованием являются только персональные компьютеры, существует возможность их поломки или сбои при подключении интернета, что может существенно повлиять на скорость выполнения работы.

Причинно-следственная диаграмма представлена на рисунке 28.



Рисунок 28 – Причинно-следственная диаграмма

### 3.1.3 SWOT-анализ

Сильными сторонами исследования распада В-мезона по каналу  $B^+ \rightarrow J/\psi \eta K^+$  ( $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  и  $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ ) в эксперименте LHCb являются:

- возможность работать удалённо;
- большое сечение рождения с- и b-кварков в эксперименте LHCb;
- собрана большая статистика;
- снижение фона;
- существование набора расширений Ostar и Bender на языке программирования python.

Слабыми сторонами данной разработки можно назвать следующие свойства и особенности:

- необходимость знания нескольких языков программирования;
- невозможность определить ошибки в коде по мере его разработки;
- длительность расчетов;
- большое количество дочерних частиц в распаде;
- недостаточная точность расчетов.

К возможностям данного проекта можно отнести:

- наличие подробного плана для реализации подобных задач;
- код прост в освоении;
- доступность программного обеспечения;
- использование библиотек для разнообразных задач;
- увеличения статистики данных.

К угрозам можно отнести:

- поломка ЭВМ;
- сбои в подключении сети интернет;
- отсутствие коммерческого интереса к проекту;
- параллельное проведение данного исследования конкурирующей лабораторией.

В таблице 18 представлен SWOT-анализ в виде таблицы, так же показаны результаты пересечений сторон, возможностей и угроз.

Таблица 18 – SWOT-анализ

	<b>Сильные стороны</b>	<b>Слабые стороны</b>
	<b>научно-исследовательского проекта:</b>	<b>научно-исследовательского проекта:</b>
	– С1. возможность	– Сл1. необходимость

	<p>работать удалённо;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– С2. большое сечение рождения с- и b-кварков в эксперименте LHCb;</li> <li>– С3. собрана большая статистика;</li> <li>– С4. снижение фона;</li> <li>– С5. существование набора расширений Ostar и Bender на языке программирования python.</li> </ul>	<p>знания нескольких языков программирования;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Сл2. невозможность определить ошибки в коде по мере его разработки;</li> <li>– Сл3. длительность расчетов.</li> <li>– Сл4. большое количество дочерних частиц в распаде;</li> <li>– Сл3. недостаточная точность расчетов.</li> </ul>
<p><b>Возможности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– В1. наличие подробного плана для реализации подобных задач;</li> <li>– В2. код прост в освоении;</li> <li>– В3. доступность программного обеспечения;</li> <li>– В4. использование</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Возможность проведения анализа различных распадов;</li> <li>2. Возможность писать код для каждой задачи.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Возможен повторный запуск кода после обнаружения ошибки;</li> <li>2. Возможность независимого пользования.</li> </ol>

<p>библиотек для разнообразных физических задач;</p> <p>– В5. увеличения статистики данных.</p>		
<p><b>Угрозы:</b></p> <p>– У1. поломка ЭВМ;</p> <p>– У2. сбои в подключении сети интернет;</p> <p>– У3. отсутствие коммерческого интереса к проекту;</p> <p>– У4. параллельное проведение данного исследования конкурирующей лабораторией.</p>	<p>1. Улучшение безопасности работы с кодом;</p> <p>2. Получение более точного результата.</p>	<p>1. Увеличение количества серверов для обработки и хранения больших объемов данных, благодаря чему увеличится точность расчётов и скорость их выполнения;</p> <p>2. Привлечение большего количества сотрудников/студентов для физического анализа данных</p>

На основе результатов проведенного анализа можно сделать вывод, что для улучшения точность результатов исследования необходимо набрать большую статистику за счет данных набранных на эксперименте за 2017-2018 гг.. А для уменьшения внешних угрозы (поломка ЭВМ, сбои в подключении сети интернет) работу необходимо проводить через удаленный рабочий стол.

## 3.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 3.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Научно-исследовательские работы и опытно-конструкторские разработки разбиваются на этапы в соответствии с ГОСТ 15.101-98, (для НИР) ГОСТ Р 15.201-2000 (для ОКР). В зависимости от характера и сложности НИОКР ГОСТ допускает разделение этапов на отдельные виды работ.

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 19.

Таблица 19 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
----------------	-------	------------------	-----------------------

Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Выбор направления исследований	Руководитель, инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические исследования	5	Разработка кода	Инженер
	6	Выбор параметров моделирования	Инженер
	7	Оценка правильности полученных результатов	Руководитель, инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Определение целесообразности проведения ВКР	Руководитель
Разработка техни- ческой документации и проектирование	9	Установка ограничений	Инженер
	10	Моделирование	Инженер
	11	Оценка эффективности результатов исследования	Руководитель, инженер

Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ВКР)	12	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Инженер
	13	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель, инженер

### 3.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется следующая формула (1):

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (1)$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;  $t_{\min i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;  $t_{\max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая

параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (2)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;  $Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

### 3.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой (3):

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (3)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле (4):

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (4)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;  $T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;  $T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе  $T_{\text{кi}}$  необходимо округлить до целого числа.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48$$

$$t_{\text{ож1}} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 2}{5} = 1,4$$

$$T_{\text{р1}} = \frac{1,4}{1} = 1,4$$

$$T_{\text{к1}} = 1,4 \cdot 1,48 = 2$$

На основе полученных выше расчетов строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работы в рамках научно-исследовательского проекта и представлен в приложении Б таблице Б.1 с разбивкой по месяцам и неделям за период времени дипломирования.

Как видно из календарного план-графика проведения ВКР, выполнение работы проводилось в течение всего времени, которое выделили на выполнение ВКР.

### **3.2.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)**

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;

- затраты на оплату труда работников, непосредственно участвующих в НТИ.
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

### 3.2.5 Расчет материальных затрат НТИ

Все работы для ВКР проводились за компьютером в корпусе университета и на домашнем компьютере. Специальное оборудование использовано не было. Поэтому в качестве материальных затрат представлены только затраты на электричество и интернет. Время, проведенное за работой: 1280 часов. Мощность рабочих станций: 0,5 кВт.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле (5):

$$C = C_{\text{эл}} * F_{\text{об}} * P = 5,8 * 1280 * 0,5 = 3712 \text{ руб} \quad (5)$$

где  $C_{\text{эл}}$  – тариф на промышленную электроэнергию (5,8 руб. за 1 кВт·ч);  $P$  – мощность оборудования, кВт;  $F_{\text{об}}$  – время использования оборудования, ч.

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 20.

Таблица 20 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб.
1. Электроэнергия	кВт·ч	640	5,8	3712
2. Доступ в интернет	–	4 месяца	350	1400
3. Распечатка диссертации	–	100	2	200
Итого				5312

Отсутствие в таблице разделения на источники финансирования говорит о том, что источник один. Источник финансов в данной работе – инженер.

### **3.2.6 Основная заработная плата исполнителей темы**

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20–30 % от тарифа или оклада.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (6)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;  $Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $Z_{\text{осн}}$ ).

Основная заработная плата научного руководителя рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1. оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор.

2. стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

Дополнительная заработная плата включает оплату за непроработанное время (очередной и учебный отпуск, выполнение государственных обязанностей, выплата вознаграждений за выслугу лет и т.п.) и рассчитывается исходя из основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении работ:

$$Z_{\text{доп}} = K_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (7)$$

где  $Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата в рублях;  $K_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной зарплаты;  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата в рублях.

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (8)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;  $T_{\text{раб}}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником в рабочих днях;  $Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника в рублях.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (9)$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года;  $F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала (в рабочих днях), представлен в таблице 21. При отпуске в 24 рабочих дней  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная рабочая неделя; в 48 рабочих дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя.

Таблица 21 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:		
– выходные дни;	52	104
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени:		
– отпуск;	48	24
– невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	223

Оклад руководителя (доцента ТПУ, кандидата физико-математических наук) за период проведения работ (8 рабочих дней) равна:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{33664 \cdot 1,3 \cdot 10,4}{251} = 1813,3 \text{ руб/д. ень} .$$

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}} = 1813,3 \cdot 8 = 14506,4 \text{ руб.}$$

Оклад инженера (9489 рублей) за период проведения работ равна:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{9489 \cdot 1,3 \cdot 11,2}{223} = 619,6 \text{ руб,}$$

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}} = 619,6 \cdot 100 = 6196 \text{ руб.}$$

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 22.

Таблица 22 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	З <sub>ок</sub> , руб.	k <sub>р</sub>	З <sub>м</sub> , руб	З <sub>дн</sub> , руб.	T <sub>р</sub> , раб. дн.	З <sub>осн</sub> , руб.
Руководитель	33664	1,3	43763,2	1813,3	8	14506,4
Инженер	9489	1,3	12335,7	619,6	100	61960
Итого						76466,4

### 3.2.7 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (10)$$

Для руководителя:  $Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 14506,4 = 2175,96$  руб

Для инженера:  $Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,12 \cdot 61960 = 7402,8$  руб

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Для руководителя:  $C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} = 14506,4 + 2175,96 = 16682,4$  руб.

Для инженера:  $C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} = 61960 + 7402,8 = 69362,8$  руб.

Дополнительная заработная плата представлена в таблице 23.

Таблица 23 – Расчёт дополнительной заработной платы

Исполнители	З <sub>осн</sub> ,руб	$k_{\text{доп}}$	З <sub>доп</sub> , руб.	С <sub>зп</sub> , руб.
Руководитель	14506,4	0,15	2175,9	16682,4
Инженер	61960	0,12	7402,8	69362,8
Итого			9578,7	86045,2

### 3.2.8 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (11)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2018 г. на основании пункта 1 ст.58 Федерального закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность, установлен размер страховых взносов равный 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представлять в таблице 24.

$$k_{\text{внеб}} = k_{\text{пф}} + k_{\text{с}} + k_{\text{пн}}, \quad (12)$$

где  $k_{пф}$  – коэф. отчисления в пенсионный фонд;  $k_c$  – коэф. отчисления страховых взносов;  $k_{пн}$  – коэф. отчисления в подоходный налог.

$$k_{внеб} = 0,271$$

Для руководителя:  $Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot C_{зп} = 0,271 \cdot 16682,4 = 4520,9$  руб

Для инженера:  $Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot C_{зп} = 0,271 \cdot 69362,8 = 18797,32$  руб

Таблица 24 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Руководитель	Инженер
Основная заработная плата, руб.	14506,4	61960
Дополнительная заработная плата, руб.	2175,9	7402,8
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
Сумма отчислений	4520,9	18797,3
<b>Итого</b>	<b>12161,4</b>	<b>50565,5</b>

### 3.2.9 Накладные расходы

В данную статью входят расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных служб. По этой статье учитываются оплата труда административно-управленческого персонала, содержание зданий, оргтехники и хозяйственного инвентаря, амортизация имущества, расходы по охране труда и подготовке кадров.

Накладные расходы в ТПУ составляют не более 20 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (13)$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов.

Накладные расходы составят:

$$\text{Для руководителя: } C_{\text{накл}} = 0,14 \cdot 16682,4 = 2335,5$$

$$\text{Для инженера: } C_{\text{накл}} = 0,14 \cdot 69362,8 = 9710,8$$

### **3.2.10 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта**

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 25.

Таблица 25 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НИИ	5312
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей	76466,4
3. Затраты по дополнительной заработной плате	9578,7

исполнителей темы	
4. Отчисления во внебюджетные фонды	23318,2
5. Накладные расходы	12946,3
<b>Бюджет затрат НИИ</b>	<b>127621,6</b>

В ходе выполнения экономической части ВКР были проведены расчеты плановой себестоимости проведения НИИ и времени, необходимого на проведение ВКР. Плановая себестоимость работы составляет 127621,6рублей, значительная часть которой – затраты на амортизацию

### 3.3 Организационная структура проекта

Организационная структура проекта — наиболее соответствующая проекту временная организационная структура, включающая всех его участников и создаваемая для успешного достижения целей проекта.

Разработка организационной структуры проекта включает:

- идентификацию всех организационных единиц;
- определение ролей участников проекта и их взаимодействия,
- определение ответственности и полномочий;
- распределение ответственности и полномочий между организационными единицами структуры;
- разработку инструкций, регламентирующих взаимодействия в структуре и рабочие процедуры.

Организационная структура проекта является динамической структурой, которая претерпевает изменения в процессе осуществления проекта. Эти изменения зависят от фаз жизненного цикла проекта, типов, используемых в проекте контрактов, и других условий выполнения проекта. Организационная структура данного проекта представлена на рисунке 29.



Рисунок 29 –Иерархическая структура работ

### 3.4 Расчет научно-технического эффекта

В последнее время для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности планируемых и выполняемых госбюджетных и хоздоговорных работ, получил распространение метод бальных оценок. Бальная оценка заключается в том, что каждому фактору по принятой шкале присваивается определенное количество баллов. Обобщенную оценку проводят по сумме баллов по всем показателям или рассчитывают по формуле. На этой основе делается вывод о целесообразности НТИ. Сущность этой методики состоит в том, что на основе оценок признаков работы определяется коэффициент научно-технического эффекта НТИ по формуле (14):

$$H = \sum_{i=1}^3 k_i \cdot n_i \quad (14)$$

где  $H$  - показатель НТУ,  $k$  – весовой коэффициент  $i$ -го признака НТУ,  $n$  – оценка (в баллах)  $i$ -го признака.

Оценка уровня проводится по следующей шкале:

- 1...4 балла - низкий НТУ
- 5...7 баллов - средний НТУ
- 8...10 баллов - сравнительно высокий НТУ
- 11...14 баллов - высокий НТУ

Оценки и весовые коэффициенты по каждому из признаков НТУ сведены в таблицу 26, как и баллы, соответствующие данной НТИ.

Согласно таблицы 10 показатель НТУ равен:

$$H = 0.6 \cdot 6 + 0.4 \cdot 2 + 0.2 \cdot (10 + 2) = 6.8$$

По шкале оценки уровня НТУ приведенного научно-технического исследования соответствует среднему уровню.

Таблица 26 – Оценка НТУ НТИ

Признак НТУ	Весовой коэфф.	Балл	Характеристика разработки	Выбранный балл
Уровень новизны	0.6	8...10	Принципиально новая	6
		5...7	Новая	
		2...4	Относительно новая Не обладает новизной	
Теоретический уровень результатов	0.4	10	Установление закона	2
		8	Глубокая разработка проблемы	
		6	Разработка способа (программы, устройства)	
		2	Элементарный анализ	
		0.5	Изложение опыта	
Возможность реализации	0.2	Время реализации		10
		10	В течение первых лет	
		4	От 5 до 10 лет	
		2	Свыше 10 лет	
		Масштаб реализации		2
		10	Народное хозяйство	
4	Отрасль			
2	Одно или несколько предприятий			

#### **4 Социальная ответственность**

Одно из основных направлений профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда. Одновременно должно осуществляться последовательное повышение качества и эффективности всех средств коллективной и индивидуальной защиты от вредных и опасных производственных факторов, увеличение объема их производства до полного удовлетворения потребностей народного хозяйства и рациональное их использование.

Охрана труда – это система законодательных актов, социально-экономических, организационных, технических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека во время труда [44].

Полностью безопасных и безвредных производств не существует. Задача охраны труда — свести к минимуму вероятность поражения или заболевания работающего с одновременным обеспечением комфорта при максимальной производительности труда. Реальные производственные условия характеризуются, как правило, наличием некоторых опасных и вредных производственных факторов.

Опасным производственным фактором, согласно ГОСТ [44], называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводит к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

#### 4.1 Анализ опасных и вредных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов [45], которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. В таблице 27 приведены основные вредные и опасные факторы производственного процесса.

Таблица 27 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа на персональном компьютере		Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03
		Пожарная опасность	ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.
	Воздействие радиации (ВЧ,УВЧ,СВЧ и т.д.)		Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»

На инженера, работа которого связана с моделированием на компьютере, воздействуют следующие факторы:

– физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой чистоты; освещённость; наличие излучения; психофизиологические.

– психофизиологические опасные и вредные производственные факторы делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

## **4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ**

### **4.2.1. Организационные мероприятия**

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая квалификационная группа по технике безопасности с учётом его знаний и опыта работы и выдается специальное удостоверение.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

#### 4.2.2. Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще, должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости изображены на рисунке 30.

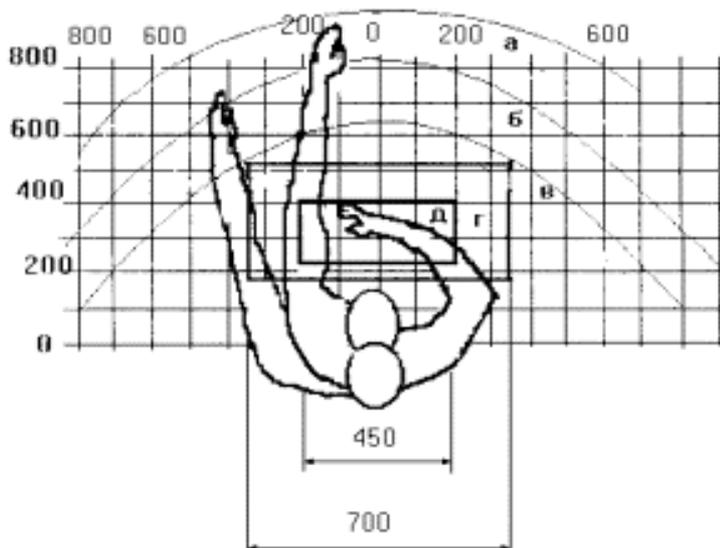


Рисунок 30 – Зоны досягаемости рук

- а - зона максимальной досягаемости рук;
- б - зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;
- в - зона легкой досягаемости ладони;
- г - оптимальное пространство для грубой ручной работы;
- д - оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура - в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация: в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования: высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680–800 мм; высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм.; рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм.; должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной - не менее 500 мм, глубиной на уровне колен - не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.; рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420–550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем; монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500–600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100–300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

#### **4.2.3. Условия безопасной работы**

Основные параметры, характеризующие условия труда это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Микроклимат – комплекс физических факторов внутренней среды помещений, оказывающий влияние на тепловой обмен организма и здоровье человека.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии со [44] и приведены в таблице 28.

Таблица 28 – Оптимальные параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22-24	40-60	0,1
Тёплый	23-25	40-60	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация

вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека — не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность — 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20–25 °С, зимой — 13–15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля. Согласно [46] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц-2кГц – 25В/м;
- в диапазоне частот 2кГц-400кГц – 2,5В/м.
- плотность магнитного потока должна быть не более:
- в диапазоне частот 5Гц-2кГц – 250нТл;
- в диапазоне частот 2кГц-400кГц – 25нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. По нормам [44] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

### **4.3 Электробезопасность**

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединению с землёй

металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность электропоражения в следующих случаях [45]:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Действие электрического тока на человека носит сложный и разнообразный характер. При замыкании электрической цепи через организм человека ток оказывает термическое, электролитическое, биологическое и механическое воздействие.

Термическое действие тока проявляется в виде ожогов как наружных участков тела, так и внутренних органов, в том числе кровеносных сосудов и нервных тканей. Электроожоги излечиваются значительно труднее и медленнее обычных термических, сопровождаются внезапно возникающими кровотечениями, омертвлением отдельных участков тела.

Электролитическое действие тока вызывает электролиз крови и лимфатической жидкости, в результате чего нарушается их химический состав и ткани организма в целом.

Биологическое воздействие выражается в раздражении живых тканей организма. Электрический ток нарушает действие биотоков, управляющих внутренним движением ткани, вызывает непроизвольное, противоестественное судорожное сокращение мышц сердца и легких.

Механическое действие тока, на организм является причиной электрических травм. Характерными видами электротравм являются ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, электроофтальмия, разрывы тканей, вывихи суставов и переломы костей.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок выполняются в следующей последовательности:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа;
- принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей).

#### **4.4 Противопожарная безопасность**

Согласно нормам пожарной безопасности, в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д [46]. Так как помещение лаборатории по степени пожароопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;

- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер [47]. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам

противопожарной безопасности;

- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

1. Сообщить руководству (дежурному);
2. Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС;
3. Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

Результаты учебно-исследовательской работы за время обучения прошли апробацию на следующих конференциях:

— Внутренняя конференция эксперимента LHCb «B2CC», ноябрь 2017. Доклад « $B^+ \rightarrow J/\psi \eta K^+$  and  $B^+ \rightarrow \psi(2S) \eta K^+$  observation»;

— Внутренняя годовая итоговая конференция эксперимента LHCb «B2CC», декабрь 2017. Доклад «B2CC summary»;

— Международная школа по физике высоких энергий в Томске, апрель 2018. Доклад «Обнаружение распада  $B^\pm \rightarrow J/\psi \eta K^\pm$  ( $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ,  $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ ,  $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ )».

## Список литературы

1. Н. В. Красников, В. А. Матвеев, Поиск новой физики на большом, адронном коллайдере, УФН 174 (2004) 697.
2. H. Albrecht et al, Observation of  $B^0$  - anti- $B^0$  Mixing, Phys.Lett., vol. B192, p. 245, 1987.
3. R. V. Kowalewski, Status of  $B^0$  anti- $B^0$  oscillations, 1988.
4. A. Abashian, K. Gotow, N. Morgan, L. Piilonen, S. Schrenk, et al, The Belle Detector, Nucl.Instrum.Meth., vol. A479, pp. 117-232, 2002.
5. B. Aubert et al, "The BaBar detector," Nucl.Instrum.Meth., vol. A479, pp. 1-116, 2002.
6. M. Benedikt, P. Collier, V. Mertens, J. Poole, and K. Schindl, LHC Design Report. Geneva: CEEN, 2004.
7. ATLAS detector and physics performance: Technical Design Report, 1. Technical Design Report ATLAS, Geneva: CERN, 1999. Electronic version not available.
8. CMS Physics: Technical Design Report Volume 1: Detector Performance and Software. Technical Design Report CMS, Geneva: CERN, 2006. There is an error on cover due to a technical problem for some items.
9. ALICE: Technical proposal for a Large Ion collider Experiment at the CERN LHC. LHC Tech. Proposal, Geneva: CERN, 1995.
10. LHCb : Technical Proposal. Tech. Proposal, Geneva: CERN, 1998.
11. O. Adriani et al., LHCf experiment: Technical Design Report. Technical Design Report LHCf, Geneva: CERN, 2006.
12. G. Ruggiero et al, The totem detector at lhc, p. 5 p, 2010.
13. J. Pinfold et al, Technical design report of the model experiment, Tech. Rep. CERN- LHCC-2009-006, MoEDAL-TDR-001, CERN, Geneva, Jun 2009.
14. LHCb : Technical Proposal.Tech. Proposal. Geneva: CERN. 1998

15. S. Amato et al, LHCb 'magnet: Technical Design Report. Technical Design Report LHCb, Geneva: CERN, 2000.
16. P. R. Barbosa-Marinho et al, LHCb VELO (VERTex LOcator): Technical Design Report. Technical Design Report LHCb, Geneva: CERN, 2001.
17. T. Latham, Performance of the lhcb vertex locator, Tech. Rep. LHCb-PROC-2012-054, Nov 2012.
18. B. Adeva et al, The lhcb silicon tracker, Aug 2013. On behalf of the LHCb Silicon Tracker group.
19. P. R. Barbosa-Marinho and t. . others.
20. P. R. Barbosa-Marinho et al, LHCb outer tracker: Technical
21. S. Amato et al, LHCb RICH: Technical Design Report. Technical Design Report LHCb, Geneva: CERN, 2000.
22. A.Powell et al, Particle identification at LHCb, PoS, vol. ICHEP2010, p. 020, 2010.
23. S. Amato et al, LHCb calorimeters: Technical Design Report. Technical Design Report LHCb, Geneva: CERN, 2000.
24. S. N. Filippov, Y. K. Gavrilov, E. Guschin, V. Klubov, L. Kravehuk, S. V. Laptev, V. E. Postoev, and A. Sadovskii, Design and construction of the lhcb scintillator pad/preshower detector, Tech. Rep. LHCb-2000-042, CERN, Geneva, Oct 2000.
25. G. Atoyán et al, The lhcb hadron calorimeter, Nucl. Instr and Meth., vol. A320, p. 144, 1992.
26. L. Afanasveva, Y. Bogomolov, S. Denissov, E. Dzhelvadin, A. Kobelev, et al, "The hadron calorimeter design and construction," 2000.
27. Y. Guz, "The lhcb hadron calorimeter," J. Phys.: Conf.Ser., vol. 160, p. 012054, 2009.
28. A. Aref'ev et al, A study of light collection in shashlik calorimeters, Instrum.Exp. Tech., vol. 51, pp. 511-522, 2008.

29. P. R. Barbosa-Marinho et al, LECb muon system: Technical Design Report. Technical Design Report LHCb, Geneva: CERN, 2001.
30. O. C allot, FastVelo, a fast and efficient pattern recognition package for the Velo, CERN-LHCb-PUB-2011-001.
31. R. E. Kalman, A new approach to linear filtering and prediction problems, J. Basic Eng. D82 (1960) 35.
32. H. Terrier and I. Belvaev, Particle identification with lhcb calorimeters, Tech, Rep, LHCb- 2003-092, CERN, Geneva, Sep 2003.
33. A.Powell et al, Particle identification at LHCb, PoS, vol. ICHEP2010, p. 020, 2010.
34. M, Adinolfi et al, Performance of the lhcb rich detector at the lhc, Eur. Phys. J. C, vol. 73, p. 2431. 25 p, Nov 2012.
35. F. Arehilli et al, Performance of the muon identification at lhcb, Tech. Rep. arXiv:1306.0249. CERN-LHCB-DP-2013-001. LHCB-DP-2013-001, Jun 2013. Comments: 17 pages, 10 figures.
36. R. Aaij et al, The lhcb trigger and its performance in 2011, J. Instrum., vol. 8, p. P04022. 31 p, Nov 2012.
37. R. Antunes-Nobrega et al, LHCb trigger system: Technical Design Report. Technical Design Report LHCb, Geneva: CERN
38. V. Gligorov, C, Thomas, and M. Williams, The HLT inclusive B triggers.
39. V. V. Gligorov, A single track HLT1 trigger
40. M. Williams et al, The HLT2 topological lines
41. S. Kullback and R. A. Leibler, On information and sufficiency, Annals of Mathematical Statistics, vol. 22, no. 1, pp. 79-86, 1951.
42. M. Needham, Clone Track Identification using the Kullbaek-Liebler Distance, Tech. Rep. LHCb-2008-002, 2008.
43. W. D. Hulsbergen, Decay chain fitting with a Kalman filter, Nucl.Instrum.Meth., vol. A552, pp. 566-575, 2005.

- 44.ГОСТ 12.0.002-80. Система стандартов безопасности труда. Термины и определения.
- 45.ГОСТ 12.1.030-81, Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
46. НПБ 105-95. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. 31 окт. 1995 г.
47. ГОСТ 12.4.009-83, Система стандартов безопасности труда. Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды. Размещение и обслуживание.

**Приложение А**  
(справочное)

**Experiment LHCb on the accelerator LHC**

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM6M	Харисова Анастасия Евгеньевна		

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Проректор по ОД	Вагнер Александр Рудольфович	к.ф.-м. н		

Консультант-лингвист Отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кабрышева Оксана Павловна			

## Contents

1 The accelerator LHC .....	101
2 The LHCb edetector .....	101
2.1 Tracking .....	103
2.2 Vertex locator .....	103
2.3 Silicon Tracker .....	106
2.4 Tracker Turicensis .....	106
2.5 Inner Tracker .....	108
2.6 RICH .....	108
2.7 Pixel Hybrid Photon Detector .....	109
2.8 Calorimeters .....	110
2.8.1 The electromagnetic calorimeter .....	111
2.8.2 The hadron calorimeter .....	111
2.9 Muon System .....	112
References .....	115

## **1 THE ACCELERATOR LHC**

The Large Hadron Collider (LHC) lies by the European Organization for Nuclear Research (CERN) [1]. It lies in a tunnel 27 kilometres (17 mi) in circumference, as deep as 175 metres (574 ft) beneath the France–Switzerland border near Geneva.

The LHC is a ring accelerator of colliding proton beams with a design energy of 7 TeV (1 TeV=10<sup>12</sup> electron volts) per beam. The design instantaneous luminosity is  $\sim 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{c}^{-1}$ .

Four large particle detectors collect the data delivered by the LHC. These four detectors sit underground in huge caverns on the LHC ring. Each experiment is distinct, and characterized by its detectors. The biggest of these experiments, ATLAS and CMS, use general-purpose detectors to investigate the largest range of physics possible. ALICE and LHCb have detectors specialized for focussing on specific phenomena. The smallest experiments on the LHC are TOTEM and LHCf, which focus on protons or heavy ions that brush past each other rather than meeting head on when the beams collide. TOTEM uses detectors positioned on either side of the CMS interaction point, while LHCf is made up of two detectors which sit along the LHC beamline, at 140 metres either side of the ATLAS collision point. MoEDAL uses detectors deployed near LHCb to search for a hypothetical particle called the magnetic monopole [2].

## **2 THE LHCb DETECTOR**

LHCb is a dedicated heavy flavour physics experiment at the LHC. Its main goal is to search for indirect evidence of new physics in CP violation and rare decays of beauty and charm hadrons, by looking for the effects of new particles in processes that are precisely predicted in the Standard Model (SM) and by utilising the distinctive flavour structure of the SM with no tree-level flavour-changing neutral currents.

Since the level of CP violation in weak interactions cannot explain the matter-antimatter asymmetry in the universe [3], new sources of CP violation beyond the SM are needed. The effect of such new sources might be seen in heavy flavour physics, where many models of new physics produce contributions that change the expectation values of the CP violating phases or the branching fractions of rare decays. Some models even predict decay modes that are forbidden in the SM. To examine such possibilities, CP violation and rare decays of hadrons containing b and c quarks must be studied with large data samples, using many different decay modes.

LHCb is a single-arm spectrometer with a forward angular coverage from approximately 10 mrad to 300 (250) mrad in the bending (non-bending) plane. The choice of the detector geometry is justified by the fact that at high energies both the b- and b-hadrons are predominantly produced in the same forward or backward cone.

The layout of the LHCb spectrometer is shown in figure 1. The right-handed coordinate system adopted has the z axis along the beam, and the y axis along the vertical.

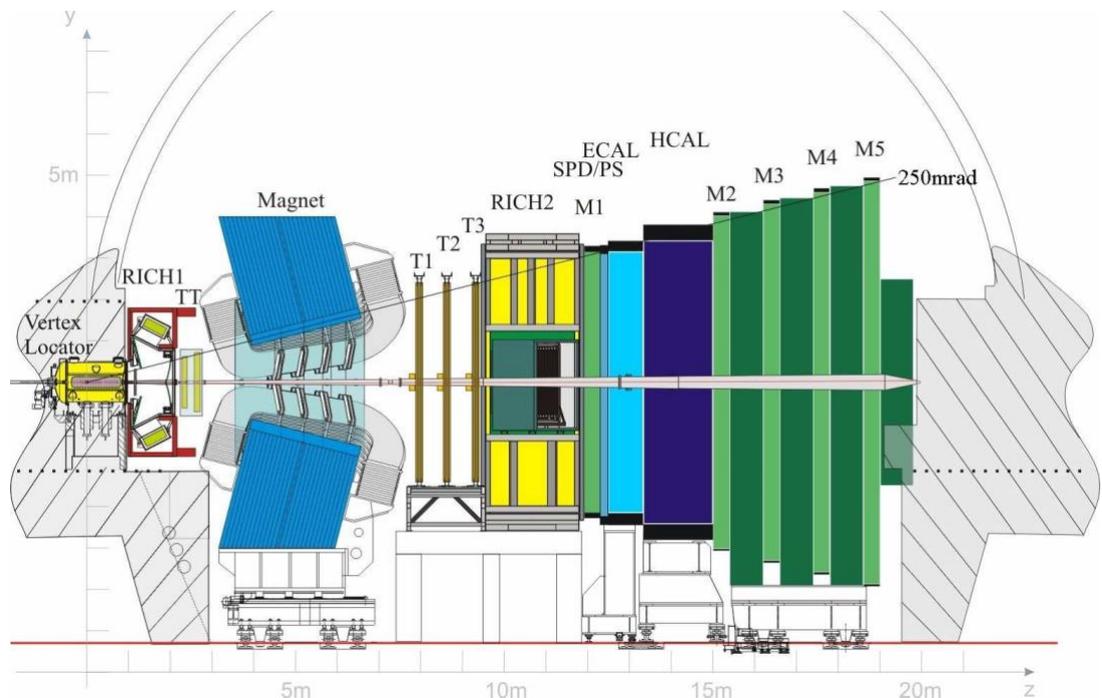


Figure 1: View of the LHCb detector.

The LHCb expert installation consists: the vertex locator system (including a pileup veto counter), called the VELO; the tracking system made of a Trigger Tracker (a silicon microstrip detector, TT) in front of the spectrometer magnet, and three tracking stations behind the magnet, made of silicon microstrips in the inner parts (IT) and of Kapton/Al straws for the outer parts (OT); two Ring Imaging Cherenkov counters (RICH1 and RICH2) using Aerogel, C<sub>4</sub>F<sub>10</sub> and CF<sub>4</sub> as radiators, to achieve excellent  $\pi$ -K separation in the momentum range from 2 to 100 GeV/c, and Hybrid Photon Detectors; the calorimeter system composed of a Scintillator Pad Detector and Preshower (SPD/PS), an electromagnetic (shashlik type) calorimeter (ECAL) and a hadronic (Fe and scintillator tiles) calorimeter (HCAL) the muon detection system composed of MWPC (except in the highest rate region, where triple-GEM's are used).

## **2.1 Tracking**

The LHCb tracking system consists of the vertex locator system (VELO) and four planar tracking stations: the Tracker Turicensis (TT) upstream of the dipole magnet and T1-T3 downstream of the magnet. VELO and TT use silicon microstrip detectors. In T1-T3, silicon microstrips are used in the region close to the beam pipe (Inner Tracker, IT) whereas straw-tubes are employed in the outer region of the stations (Outer Tracker, OT). The TT and the IT were developed in a common project called the Silicon Tracker (ST).

## **2.2 Vertex locator**

The VERtEX LOcator (VELO) provides precise measurements of track coordinates close to the interaction region, which are used to identify the displaced secondary vertices which are a distinctive feature of b and c-hadron decays [4]. The VELO consists of a series of silicon modules, each providing a measure of the r and  $\phi$  coordinates, arranged along the beam direction (2). Two planes perpendicular to the beam line and located upstream of the VELO sensors

are called the pileup veto system. The VELO sensors are placed at a radial distance from the beam which is smaller than the aperture required by the LHC during injection and must therefore be retractable. The detectors are mounted in a vessel that maintains vacuum around the sensors and is separated from the machine vacuum by a thin walled corrugated aluminum sheet. This is done to minimize the material traversed by a charged particle before it crosses the sensors and the geometry is such that it allows the two halves of the VELO to overlap when in the closed position.

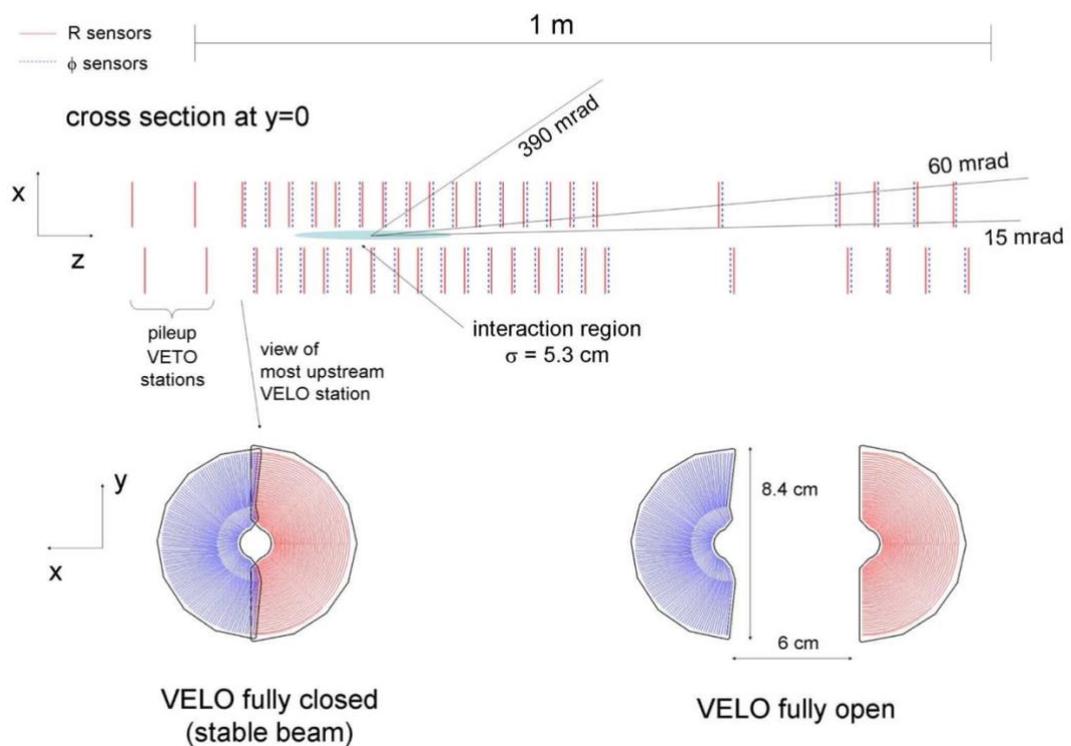


Figure 2: Cross section in the  $(x,z)$  plane of the VELO silicon sensors, at  $y = 0$ , with the detector in the fully closed position. The front face of the first modules is also illustrated in both the closed and open positions. The two pileup veto stations are located upstream of the VELO sensors.

The VELO has to cover the angular acceptance of the downstream detectors, i.e. detect particles with a pseudorapidity in the range  $1.6 < \eta < 4.9$  and emerging from primary vertices in the range  $|z| < 10.6$  cm. The detector setup was further

constrained by the following considerations:

- Polar angle coverage down to 15 mrad for a track emerging at  $z=10.6$  cm downstream from the nominal interaction point (IP), together with the minimum distance of the sensitive area to the beam axis (8mm, see below), and the requirement that a track should cross at least three VELO stations, defined the position  $z_{N-2}$  of the first of the three most downstream stations:  $z_{N-2} \simeq 65$  cm.
- A track in the LHCb spectrometer angular acceptance of 300 mrad should cross at least three VELO stations. Given a maximum outer radius of the sensors of about 42 mm, the distance between stations in the central region needed to be smaller than 5 cm. Requiring four stations to be traversed (or allowing for missing hits in one of four stations), imposed a module pitch of at most 3.5 cm. Dense packing of stations near the IP also reduces the average extrapolation distance from the first measured hit to the vertex.
- For covering the full azimuthal acceptance and for alignment issues, the two detector halves were required to overlap. This was achieved by shifting along  $z$  the positions of sensors in one half by 1.5 cm relative to sensors in the opposite half.

The use of cylindrical geometry ( $r\phi$  coordinates), rather than a simpler rectilinear scheme, was chosen in order to enable fast reconstruction of tracks and vertices in the LHCb trigger. Indeed, simulations showed that 2D ( $r_z$ ) tracking allows a fast reconstruction in the HLT with sufficient impact parameter resolution to efficiently select events with b-hadrons. For this reason, an  $r\phi$  geometry was selected for the design. Each VELO module was designed to provide the necessary 3D spatial information to reconstruct the tracks and vertices. One of the two sensors of the module, called the  $\phi$ -measuring sensor, or  $\phi$ -sensor, provides information on the azimuthal coordinate around the beam. The other sensor, called the  $r$ -measuring sensor, or R-sensor, provides information on the radial distance

from the beam axis. The third coordinate is provided by knowledge of the position of each sensor plane within the experiment. The  $rz$  tracking requirement imposes the additional constraint that the VELO circular strips should be centered as perfectly as possible around the beam axis. The result of simulation studies showing how the trigger performance would degrade as a function of various VELO R-sensor misalignments [5] indicate that the R-sensors should be mounted with a mechanical accuracy of better than  $20\ \mu\text{m}$  in  $x$  and  $y$  relative to each other within each half, and the two halves should be aligned to better than  $100\ \mu\text{m}$  relative to each other in these coordinates. The number of strips for both sensor types needed to satisfy the competing requirements of the LHCb environment, physics and a budgetary limit, is about 180000 channels.

### **2.3 Silicon Tracker**

The Silicon Tracker (ST) comprises two detectors: the Tracker Turicensis (TT) [3, 6] and the Inner Tracker (IT) [7]. Both TT and IT use silicon microstrip sensors with a strip pitch of about  $200\ \mu\text{m}$ . The TT is a  $150\text{cm}$  wide and  $130\text{cm}$  high planar tracking station that is located upstream of the LHCb dipole magnet and covers the full acceptance of the experiment. The IT covers a  $120\text{cm}$  wide and  $40\text{cm}$  high cross shaped region in the centre of the three tracking stations downstream of the magnet. Each of the four ST stations has four detection layers in an  $(x-u-v-x)$  arrangement with vertical strips in the first and the last layer and strips rotated by a stereo angle of  $-5^\circ$  and  $+5^\circ$  in the second and the third layer, respectively. The TT has an active area of about  $8.4\ \text{m}^2$  with 143360 readout strips of up to  $38\text{cm}$  in length. The IT has an active area of  $4.0\ \text{m}^2$  with 129024 readout strips of either  $11\text{cm}$  or  $22\text{cm}$  in length.

### **2.4 Tracker Turicensis**

All four detection layers of the TT are housed in one large light tight and thermally and electrically insulated detector volume, in which a temperature below

5°C is maintained [8]. The detector volume is continuously flushed with nitrogen to avoid condensation on the cold surfaces. To aid track reconstruction algorithms, the four detection layers are arranged in two pairs, (x,u) and (v,x), that are separated by approximately 27 cm along the LHC beam axis.

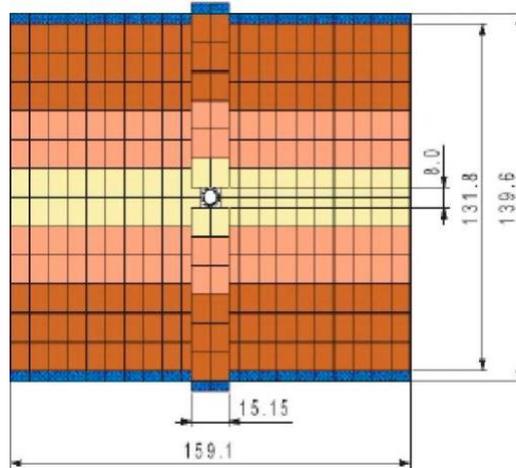


Figure 3: Layout of the third TT detection layer. Different readout sectors are indicated by different shadings.

The layout of one of the detection layers is illustrated in figure 3. Its basic building block is a half module that covers half the height of the LHCb acceptance. It consists of a row of seven silicon sensors organized into either two or three readout sectors. The readout hybrids for all readout sectors are mounted at one end of the module. The regions above and below the LHC beampipe are covered by one such half module each. The regions to the sides of the beampipe are covered by rows of seven (for the first two detection layers) or eight (for the last two detection layers) 14- sensor long full modules. These full modules cover the full height of the LHCb acceptance and are assembled from two half modules that are joined together end-to-end. Adjacent modules within a detection layer are staggered by about 1 cm in  $z$  and overlap by a few millimeters in  $x$  to avoid acceptance gaps and to facilitate the relative alignment of the modules. In the  $u$  and  $v$  detection layers, each module is individually rotated by the respective stereo angle.

A main advantage of this detector design is that all front-end hybrids and the infrastructure for cooling and module supports are located above and below the active area of the detector, outside of the acceptance of the experiment.

## **2.5 Inner Tracker**

Each of the three IT stations consists of four individual detector boxes that are arranged around the beampipe. The detector boxes are light tight and electrically and thermally insulated, and a temperature below  $5^{\circ}\text{C}$  is maintained inside them. They are continuously flushed with nitrogen to avoid condensation on the cold surfaces. Each detector box contains four detection layers and each detection layer consists of seven detector modules. Adjacent modules in a detection layer are staggered by 4 mm in  $z$  and overlap by 3 mm in  $x$  to avoid acceptance gaps and facilitate the relative alignment of the modules. Detector modules in the boxes above and below the beampipe (top and bottom boxes) consist of a single silicon sensor and a readout hybrid. Detector modules in the boxes to the left and right of the beampipe (side boxes) consist of two silicon sensors and a readout hybrid.

## **2.6 RICH**

The RICH 1 detector [3, 9] is located upstream of the LHCb dipole magnet, between the VELO and the Trigger Tracker, see figure 1. RICH1 contains aerogel and fluorobutane ( $\text{C}_4\text{F}_{10}$ ) gas radiators, providing PID from approximately  $1\text{--}60\text{GeV}/c$  for particles inside the acceptance. A schematic, 3D model and photo of the RICH 1 detector is shown in figure 4(a). It is aligned to the LHCb coordinate axes and occupies the region  $990 < z < 2165\text{mm}$ . The  $z$ -axis follows the beamline which is inclined at  $3.6\text{ mrad}$  to the horizontal.

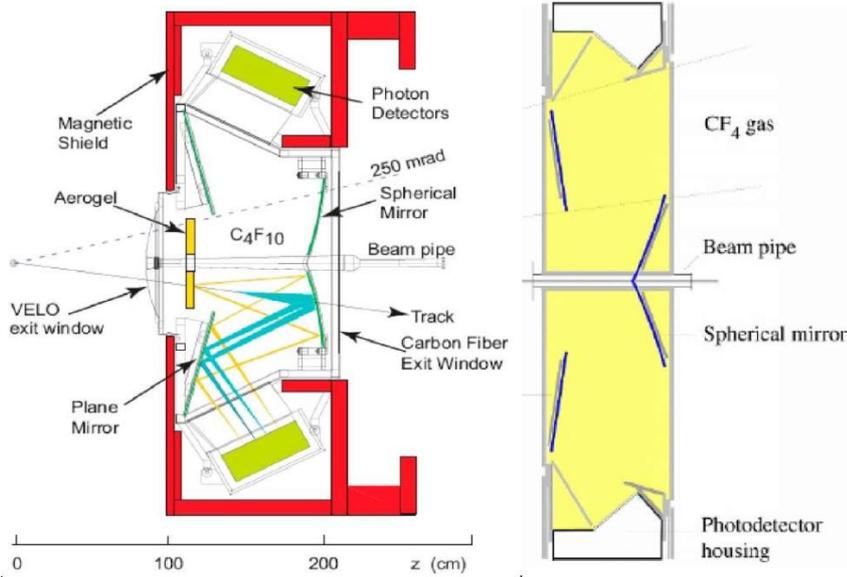


Figure 4: (a) Side view schematic layout of the RICH 1 detector. (b) Top view schematic of the RICH 2 detector.

The RICH 2 detector [10, 11] is located between the last tracking station and the first muon station, see figure 1. It contains a  $CF_4$  gas radiator, providing PID from approximately 15 to  $\geq 100$  GeV/c for particles within the reduced polar angle acceptance of  $\pm 120$  mrad (horizontal) and  $\pm 100$  mrad (vertical). Two schematics and a photograph of the RICH 2 detector are shown in figure 4(b). It is aligned vertically, with its front face positioned at 9500 mm from the interaction point and with a depth of 2332 mm.

## 2.7 Pixel Hybrid Photon Detector

The RICH detectors utilize Hybrid Photon Detectors (HPDs) to measure the spatial positions of emitted Cherenkov photons. The HPD is a vacuum photon detector in which a photoelectron, released from the conversion in a photocathode of an incident photon, is accelerated by an applied high voltage of typically 10 to 20 kV onto a reverse-biased silicon detector. During the photoelectron energy dissipation process in silicon, electron-hole pairs are created at an average yield of one for every 3.6 eV of deposited energy. Carefully-designed readout electronics

and interconnects to the silicon detector result in very high efficiency at detecting single photoelectrons.

## 2.8 Calorimeters

The calorimeter system performs several functions. It selects transverse energy hadron, electron and photon candidates for the first trigger level (L0), which makes a decision  $4\mu\text{s}$  after the interaction. It provides the identification of electrons, photons and hadrons as well as the measurement of their energies and positions. The reconstruction with good accuracy of  $\pi^0$  and prompt photons is essential for flavour tagging and for the study of B-meson decays and therefore is important for the physics program.

A classical structure of an electromagnetic calorimeter (ECAL) followed by a hadron calorimeter (HCAL) has been adopted. The most demanding identification is that of electrons. Within the bandwidth allocated to the electron trigger the electron Level 0 trigger is required to reject 99% of the inelastic pp interactions while providing an enrichment factor of at least 15 in b events. This is accomplished through the selection of electrons of large transverse energy  $E_T$ . The rejection of a high background of charged pions requires longitudinal segmentation of the electromagnetic shower detection, i.e. a preshower detector (PS) followed by the main section of the ECAL. The choice of the lead thickness results from a compromise between trigger performance and ultimate energy resolution [12]. The electron trigger must also reject a background of  $\pi^0$ 's with high  $E_T$ . Such rejection is provided by the introduction, in front of the PS, of a scintillator pad detector (SPD) plane used to select charged particles. A thin lead converter is placed between SPD and PS detectors. At Level 0, the background to the electron trigger will then be dominated by photon conversions in the upstream spectrometer material, which cannot be identified at this stage. Optimal energy resolution requires the full containment of the showers from high energy photons.

For this reason, the thickness of ECAL was chosen to be 25 radiation lengths [13]. On the other hand, the trigger requirements on the HCAL resolution do not impose a stringent hadronic shower containment condition. Its thickness is therefore set to 5.6 interaction lengths [14] due to space limitations.

### 2.8.1 The electromagnetic calorimeter

The shashlik calorimeter technology, i.e. a sampling scintillator/lead structure readout by plastic WLS fibres, has been chosen for the electromagnetic calorimeter not only by LHCb but by a number of other experiments [15, 16]. This decision was made taking into account modest energy resolution, fast time response, acceptable radiation resistance and reliability of the shashlik technology, as well as the experience accumulated by other experiments [17–19]. Specific features of the LHCb shashlik ECAL are an improved uniformity and an advanced monitoring system. The design energy resolution of  $\frac{\sigma_E}{E(\Gamma \ni B)} = \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus 1\%$  (E in GeV) results in a B mass resolution of  $65 \text{ MeV}/c^2$  for the  $B \rightarrow K^* \gamma$  penguin decay with a high- $E_T$  photon and of  $75 \text{ MeV}/c^2$  for  $B \rightarrow \rho \pi$  decay with the  $\pi^0$  mass resolution of  $\sim 8 \text{ MeV}/c^2$ .

### 2.8.2 The hadron calorimeter

The LHCb hadron calorimeter (HCAL) [20] is a sampling device made from iron and scintillating tiles, as absorber and active material respectively. The special feature of this sampling structure is the orientation of the scintillating tiles that run parallel to the beam axis. In the lateral direction tiles are interspersed with 1 cm of iron, whereas in the longitudinal direction the length of tiles and iron spacers corresponds to the hadron interaction length  $\lambda_I$  in steel. The light in this structure is collected by WLS fibres running along the detector towards the back side where photomultiplier tubes (PMTs) are housed. Three scintillator tiles arranged in depth

are in optical contact with 1.2 mm diameter Kuraray20 Y-11(250)MSJ fibre [21] that run along the tile edges. The total weight of the HCAL is about 500 tons.

## 2.9 Muon System

Muon triggering and offline muon identification are fundamental requirements of the LHCb experiment. Muons are present in the final states of many CP-sensitive B decays, in particular the two *gold-plated* decays,  $B^0_d \rightarrow J/\psi (\mu^+\mu^-)K^0_S$  and  $B^0_s \rightarrow J/\psi (\mu^+\mu^-)\phi$  [3]. They play a major role in CP asymmetry and oscillation measurements, since muons from semi-leptonic  $b$  decays provide a tag of the initial state flavor of the accompanying neutral B mesons. In addition, the study of rare B decays such as the flavour-changing neutral current decay,  $B^0_s \rightarrow \mu^+\mu^-$ , may reveal new physics beyond the Standard Model [22].

The muon system provides fast information for the high- $p_T$  muon trigger at the earliest level (Level-0) and muon identification for the high-level trigger (HLT) and offline analysis.

The muon system [23–25], shown in figure 5, is composed of five stations (M1-M5) of rectangular shape, placed along the beam axis. The full system comprises 1380 chambers and covers a total area of 435 m<sup>2</sup>. The inner and outer angular acceptances of the muon system are 20 (16) mrad and 306 (258) mrad in the bending (non-bending) plane respectively. This results in an acceptance of about 20% for muons from inclusive  $b$  semileptonic decays.

Stations M2 to M5 are placed downstream the calorimeters and are interleaved with iron absorbers 80 cm thick to select penetrating muons. The minimum momentum of a muon to cross the five stations is approximately 6 GeV/ $c$  since the total absorber thickness, including the calorimeters, is approximately 20 interaction lengths. Station M1 is placed in front of the

calorimeters and is used to improve the  $p_T$  measurement in the trigger. The geometry of the five stations is projective, meaning that all their transverse dimensions scale with the distance from the interaction point.

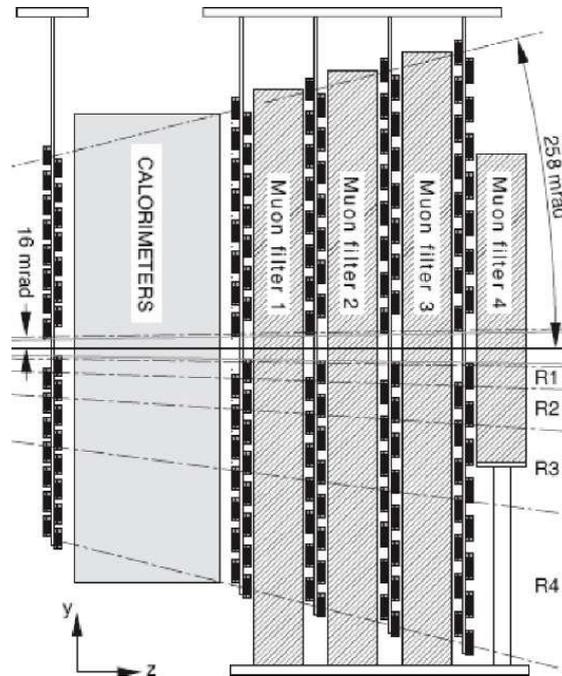


Figure 5: Side view of the muon system.

The muon trigger is based on stand-alone muon track reconstruction and  $p_T$  measurement and requires aligned hits in all five stations. Stations M1–M3 have a high spatial resolution along the  $x$  coordinate (bending plane). They are used to define the track direction and to calculate the  $p_T$  of the candidate muon with a resolution of 20%. Stations M4 and M5 have a limited spatial resolution, their main purpose being the identification of penetrating particles.

Appropriate programming of the L0 processing unit allows the muon trigger to operate in the absence of one station (M1, M4 or M5) or with missing chamber parts, although with degraded performance (worse  $p_T$  resolution).

Each Muon Station is divided into four regions, R1 to R4 with increasing distance from the beam axis. The linear dimensions of the regions R1, R2, R3, R4, and their segmentations scale in the ratio 1:2:4:8. With this geometry, the particle

flux and channel occupancy are expected to be roughly the same over the four regions of a given station. The  $(x,y)$  spatial resolution worsens far from the beam axis, where it is in any case limited by the increase of multiple scattering at large angles.

## REFERENCES

1. M. Benedikt, P. Collier, V. Mertens, J. Poole, and K. Schindl, LHC Design Report. Geneva: CEEN, 2004.
2. <https://home.cern/about/experiments>
3. LHCb collaboration, R. Antunes-Nobrega et al., LHCb reoptimized detector design and performance, CERN-LHCC-2003-030, <http://cdsweb.cern.ch/record/630827>.
4. LHCb collaboration, P.R. Barbosa-Marinho et al., Vertex locator technical design report, CERN-LHCC-2001-011, <http://cdsweb.cern.ch/record/504321>.
5. D. Petrie, C. Parkes and S. Viret, Study of the impact of VELO misalignments on the LHCb tracking and L1 trigger performance, Note LHCb-2005-056, <http://cdsweb.cern.ch/record/899299>.
6. J. Gassner, M. Needham and O. Steinkamp, Layout and expected performance of the LHCb TT station, Note LHCb-2003-140, <http://cdsweb.cern.ch/record/728548>.
7. LHCb collaboration, P.R. Barbosa-Marinho et al., LHCb inner tracker technical design report, CERN-LHCC-2002-029, <http://cdsweb.cern.ch/record/582793>.
8. J. Gassner, F. Lehner and S. Steiner, The mechanical design of the LHCb silicon trigger tracker, Note LHCb-2004-110, <http://cdsweb.cern.ch/record/858499>.
9. LHCb RICH GROUP collaboration, N. Brook et al., LHCb RICH 1 engineering design review report, Note LHCb-2004-121, <http://cdsweb.cern.ch/record/897981>.
10. LHCb collaboration, S. Amato et al., LHCb RICH technical design report, CERN-LHCC-2000-037, <http://cdsweb.cern.ch/record/494263>.
11. LHCb RICH GROUP collaboration, M. Adinolfi et al., LHCb RICH 2

engineering design review report, Note LHCb-2002-009, <http://cdsweb.cern.ch/record/691478>.

12. E. Guschin and S.V. Laptev, Monte-Carlo study of LHCb preshower, Note LHCb-2000-030, <http://cdsweb.cern.ch/record/691547>.

13. S. Barsuk et al., Design and construction of the electromagnetic calorimeter for the LHCb experiment, Note LHCb-2000-043, <http://cdsweb.cern.ch/record/691508>.

14. R. Djeliadine, O. Iouchtchenko and V.F. Obraztsov, LHCb hadron trigger and HCAL cell size and length optimisation, Note LHCb-1999-035, <http://cdsweb.cern.ch/record/691688>.

15. HERA-B collaboration, HERA-B: an experiment to study CP violation in the B system using an internal target at the HERA proton ring. Proposal, DESY-PRC-94-002; HERA-B: an experiment to study CP violation in the B system using an internal target at the HERA proton ring. Design report, DESY-PRC-95-01.

16. PHENIX collaboration, PHENIX: preliminary conceptual design report, BNL-PROPOSAL-R2.

17. HERA-B collaboration, E. Tarkovsky, The HERA-B electromagnetic calorimeter, Nucl. Instrum. Meth. A 379 (1996) 515.

18. A. Bazilevsky et al., Performance of the PHENIX EM calorimeter, IEEE Trans. Nucl. Sci. 43 (1996) 1491.

19. J. Badier et al., Shashlik calorimeter beam-test results, Nucl. Instrum. Meth. A 348 (1994) 74.

20. LHCb collaboration, S. Amato et al., LHCb calorimeters technical design report, CERN-LHCC-2000-036, <http://cdsweb.cern.ch/record/494264>.

21. V. Brekhovskikh et al., The WLS fiber time properties study, Note LHCb-2000-039, <http://cdsweb.cern.ch/record/691514>.

22. S. Amato et al., Analysis of the  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  decay with the reoptimized LHCb detector, Note LHCb-2003-165,

<http://cdsweb.cern.ch/record/726431>.

23. LHCb collaboration, LHCb muon system technical design report, CERN-LHCC-2001-010, <http://cdsweb.cern.ch/record/504326>.

24. LHCb collaboration, LHCb addendum to the muon system technical design report, CERN-LHCC-2003-002, <http://cdsweb.cern.ch/record/600536>.

25. LHCb collaboration, LHCb second addendum to the muon system technical design report, CERN-LHCC-2005-012, <http://cdsweb.cern.ch/record/831955>.



	работ по теме																		
5	Разработка кода	Инженер	40																
6	Выбор параметров моделирования	Инженер	18																
7	Оценка правильности полученных результатов	Руководитель, инженер	4																
8	Определение целесообразности проведения ВКР	Руководитель	2																
9	Установка ограничений	Инженер	30																
10	Моделирование	Инженер	50																
11	Оценка эффективности результатов исследования	Руководитель, инженер	2																

