



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
ФГБОУ ВО «ИГУ»  
**Кафедра теоретической физики**

УТВЕРЖДАЮ  
Декан Ф.М. Буднев  
«28» июня 2016 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Наименование дисциплины: Б1.В.ДВ.5.2 Нейтринная астрофизика

Направление подготовки: 03.03.02 Физика

Тип образовательной программы: Академический бакалавриат

Направленность (профиль) подготовки: Физика конденсированного состояния

Квалификация (степень) выпускника: Бакалавр

Форма обучения: Очная

Согласовано с УМК физического факультета

Протокол №3 от «28» июня 2016 г.

Зам. председателя   
В.В. Чумак

Рекомендовано кафедрой:

Протокол №8  
От «13» мая 2016 г.

Зав. кафедрой   
С.В. Ловцов

Иркутск 2016 г.

## Содержание

1. Цели и задачи дисциплины: .....	3
2. Место дисциплины в структуре ОПОП: .....	3
3. Требования к результатам освоения дисциплины (модуля): .....	3
4. Объем дисциплины (модуля) и виды учебной работы (разделяется по формам обучения) .....	4
5. Содержание дисциплины (модуля) .....	4
5.1. Содержание разделов и тем дисциплины (модуля) .....	4
5.2. Разделы дисциплины и междисциплинарные связи с обеспечиваемыми (последующими) дисциплинами.....	5
6. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ .....	6
6.1. План самостоятельной работы студентов .....	7
6.2. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.....	8
7. Примерная тематика курсовых работ (проектов) .....	8
8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля): .....	8
10. Образовательные технологии: .....	8
11. Оценочные средства (ОС): .....	9
12. Приложение: ФОС.....	13

## 1. Цели и задачи дисциплины:

Нейтринная астрофизика - сравнительно новый раздел астрофизики высоких энергий, открывающий новое окно в астрономии, расширяющей возможности исследования процессов в Галактике, удаленных галактиках и внегалактических объектах.

Цель курса «Нейтринная астрофизика» - изучение процессов в астрофизических объектах, в которых генерируются нейтрино в широком диапазоне энергий – от долей МэВ до сотен ПэВ, а также методов регистрации и детекторов нейтринного излучения. В результате изучения курса студент приобретает фундаментальные знания о процессах генерации нейтрино в астрофизических объектах, включая Солнце и Землю, познакомится с методами регистрации на Земле потоков космического излучения, приобретает навыки решения конкретных задач.

### Задачи курса

Ввести студентов в круг проблем современной нейтринной астрофизики, дать представление о физических процессах в астрофизических источниках излучения высокой энергии, познакомить с результатами измерений космического излучения, принципами работы крупномасштабных установок для детектирования астрофизических нейтрино, изучить специальные методы решения астрофизических задач. В рамках курса «Нейтринная астрофизика» студенты изучают основы устройства астрофизических объектов – потенциальных источников космических лучей, гамма-квантов и нейтрино, механизмы генерации высокоэнергетического космического излучения.

## 2. Место дисциплины в структуре ОПОП:

«Нейтринная астрофизика» является дисциплиной по выбору в вариативной части общенаучного цикла ОПОП. Курс «Нейтринная астрофизика» предназначен для подготовки бакалавра по профилю «Фундаментальная физика», способного работать в составе коллектива исследователей, проводящих эксперименты на гигантских установках по регистрации космического излучения. В результате изучения данной дисциплины специалист должен знать современное состояние исследований в области нейтринной астрофизики, знать принципы регистрации нейтрино в широком диапазоне энергий, иметь представление о детекторах астрофизических нейтрино, понимать более широкую постановку астрофизических задач.

Изучение курса предполагает наличие полученных на предыдущем уровне образования основных знаний, умений и компетенций по дисциплинам «Математический анализ», «Дифференциальные уравнения», «Интегральные уравнения», «Методы математической физики», «Квантовая теория», «Термодинамика и статистическая физика», «Ядерная физика», «Теория электрослабых взаимодействий», «Астрофизика высоких энергий».

## 3. Требования к результатам освоения дисциплины (модуля):

Процесс изучения дисциплины (модуля) направлен на формирование следующих компетенций:

- способность использовать в профессиональной деятельности базовые знания фундаментальных разделов математики, создавать математические модели типовых профессиональных задач и интерпретировать полученные результаты с учетом границ применимости моделей (ОПК-2);
- способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин (ПК-1)

В результате изучения дисциплины студент должен:

**Знать:** основные закономерности процессов, происходящих в звездах главной последовательности, и вне ее, характер процессов генерации космического излучения высокой и сверхвысокой энергии; принципы его детектирования, основные методы решения задач нейтринной астрофизики, иметь представление о пакетах программ моделирования отклика детектора на излучение.

**Владеть:** математическим аппаратом описания генерации излучения в источнике и прохождения излучения через вещество.

**Уметь:** получать простые модельные оценки характеристик космического нейтринного излучения, и предполагаемой статистики событий в детекторе.

#### 4. Объем дисциплины (модуля) и виды учебной работы (разделяется по формам обучения)

Вид учебной работы	Всего часов / зачетных единиц	Семестры		
		7		
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	60 / 1,7	60		
В том числе:	-	-		-
Лекции	18 / 0,5	18		
Практические занятия (ПЗ)	36 / 1	36		
КСР	6/0,2	6		
<b>Самостоятельная работа (всего)</b>	48 / 1,3	48		
Вид промежуточной аттестации (зачет)				
<b>Контактная работа (всего)</b>	65/1,8	65		
Общая трудоемкость	часы	108	108	
	зачетные единицы	3	3	

#### 5. Содержание дисциплины (модуля)

##### 5.1. Содержание разделов и тем дисциплины (модуля)

**Тема 1.** Свойства нейтрино. Ограничения на массу, время жизни, заряд и магнитный момент. Нейтрино в Стандартной Модели. Понятие о дираковской и майорановской массе. Лептонные числа и гипотеза нейтринных осцилляций.

**Тема 2.** Рассеяние нейтрино на электронах и нуклонах. Структурные функции нуклона. Рассеяние нейтрино на кварках. Сечение  $\nu^N$ -рассеяния в кварк-партоновой модели. Поведение сечений с ростом энергии нейтрино, оценки пробега нейтрино до взаимодействия, процессы с заряженными и нейтральными токами. Взаимодействие нейтрино с ядрами, когерентное рассеяние.

**Тема 3.** Генерация нейтрино в цепочках термоядерных реакций на Солнце. Нейтринное излучение Солнца. Результаты экспериментов Homestake, Kamiokande, Super-Kamiokande, SAGE, GALLEX, GNO, SNO, Borexino, MiniBooNE, T2K, J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex), NOvA.

**Тема 4.** Нейтринные осцилляции в веществе, эффект Михеева-Смирнова-Вольфенштейна. Конверсия нейтрино как решение проблемы солнечных нейтрино. Параметры смешивания солнечных нейтрино. Эксперименты с реакторными нейтрино.

**Тема 5.** Классификация вспышек сверхновых, общие представления о физических процессах, предшествующих вспышке сверхновой и сопровождающих вспышку СН.

**Тема 6.** Сверхновые типа II, динамика коллапса ядра массивной звезды. Роль нейтрино в гравитационном коллапсе звезд. Нейтринное излучение при вспышках сверхновых.

**Тема 7.** Сверхновая SN 1987A. Регистрация нейтринного импульса от SN 1987A, ограничения на свойства нейтрино, полученные на основе детектирования нейтринного импульса. Детекторы нейтрино от сверхновых: АСД, БПСТ, KamLand, LVD, S-K, SNO.

**Тема 8.** Нейтрино в астрофизике и космологии. Космологические ограничения на массу и число сортов нейтрино. Механизмы генерации нейтрино в сценарии “снизу-вверх”. Космогенные нейтрино:  $\mu$ - и  $\nu$ -нейтрино от взаимодействия космических лучей с реликтовыми фотонами, с веществом и радиационными полями межзвездной среды.

**Тема 9.** Галактические и внегалактические источники нейтрино, диффузные потоки нейтрино высоких энергий.

**Тема 10.** Дискретные источники космических лучей, гамма-квантов и нейтрино высоких энергий: Активные ядра галактик как источники нейтрино: модели и оценки потоков.

**Тема 11.** Источники космологических гамма-всплесков – гипотетические источники космических лучей, гамма-квантов и нейтрино высоких и сверхвысоких энергий. Модельно-независимые оценки потоков нейтрино от гамма-барстеров.

**Тема 12.** Генерация нейтрино в ядерно-каскадном процессе. Атмосферные нейтрино (от распадов  $\pi$ - и  $K$ -мезонов, мюонов,  $\tau$ -лептонов, очарованных частиц) как фон для астрофизических нейтрино и калибровка нейтринных телескопов. Атмосферные нейтрино, потоки прямых нейтрино.

**Тема 13.** Прохождение нейтрино высоких энергий через плотное вещество. Уравнение переноса нейтрино, поглощение и регенерация нейтрино. Эффект регенерации  $\nu_\mu$  за счет рождения и распада мюонов. Эффект регенерации  $\nu_\tau$  за счет рождения и распада  $\tau$ -лептонов. Специфика переноса электронных антинейтрино. Резонанс Глэшоу.

**Тема 14.** Принципы регистрации нейтрино от астрофизических источников: а) черенковские детекторы, б) радиодетектирование, в) акустические детекторы.

**Тема 15.** Нейтринные телескопы: HT200+, IceCube, ANTARES, Km<sup>3</sup>NeT, NEMO и др. Измерение спектров атмосферных нейтрино в экспериментах AMANDA, ANTARES и IceCube. Регистрация событий от астрофизических нейтрино высоких энергий в эксперименте IceCube.

## 5.2 Разделы дисциплины и междисциплинарные связи с обеспечиваемыми (последующими) дисциплинами

№ п/п	Наименование обеспечиваемых (последующих) дисциплин	№ № разделов и тем данной дисциплины, необходимых для изучения обеспечиваемых (последующих) дисциплин
1.	Квантовая электродинамика	1,2,4,10

## 5.3. Разделы и темы дисциплин (модулей) и виды занятий

№ п/п	Наименование темы	Виды занятий в часах					
		Лекции	Практ. зан.	Семин.	Лаб. занятия	СРС	Всего
1	Нейтрино в Стандартной Модели. Рассеяние нейтрино на электронах и нуклонах	1	2	-	-	4	7
2	Тема 3	1	2	-	-	4	7
3	Тема 4	1	2	-	-	4	7
4	Тема 5, 6	2	4	-	-	4	10
5	Тема 7	2	-	-	-	4	6
6	Тема 8	-	6	-	-	4	10
7	Тема 9	1	-	-	-	4	5
8	Тема 10	2	4	-	-	4	10
9	Тема 11	2	4	-	-	4	10
10	Тема 12	2	4	-	-	2	8
11	Тема 13	-	-	-	-	4	4
12	Тема 14	2	8	-	-	2	12
13	Тема 15	2	-	-	-	2	4

### 6. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ

№ п/п	№ раздела и темы дисциплины (модуля)	Наименование семинаров, практических и лабораторных работ	Трудо-ем-кость (часы)	Оценочные средства	Формируемые компетенции
1	2	3	4	5	6
1.	Тема 1	Нейтрино в Стандартной Модели. Гипотеза нейтринных осцилляций	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
2.	Тема 2	Рассеяние нейтрино на лептонах, нуклонах и ядрах	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
3.	Тема 3	Генерация нейтрино в термоядерных реакциях на Солнце. Результаты экспериментов по регистрации солнечных нейтрино	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
4	Тема 4	Нейтринные осцилляции в веществе, конверсия нейтрино, параметры смешивания солнечных нейтрино	4	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
5.	Тема 5,6	Гравитационный коллапс массивных звезд, вспышки сверхновых, нейтринное излучение	-	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
7.	Тема 7	Нейтринный импульс от SN 1987A, ограничения на свойства нейтрино, полученные на основе детектирования нейтринного импульса	6	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
8	Тема 8	$\bar{\nu}\nu$ - и $\nu\nu$ -нейтрино от взаимодействия космических лучей с веществом и радиационными полями	-	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
9.	Тема 9	Галактические и внегалактические источники нейтрино, диффузные потоки нейтрино высоких энергий	4	Контрольная работа	ОПК-2, ПК-1
10.	Тема 10,11	Гамма-всплески как источники нейтрино высоких и сверхвысоких энергий	4	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
11	Тема 12	Генерация нейтрино космическими лучами в атмосфере Земли	4	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
12.	Тема 13	Уравнение переноса нейтрино через плотное вещество, поглощение и регенерация нейтрино	-	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
13.	Тема 14	Принципы регистрации нейтрино от астрофизических источников	8	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
14.	Тема 15	Измерение спектров атмосферных нейтрино на нейтринных телескопах, регистрация событий от астрофизических нейтрино высоких энергий в эксперименте IceCube.	-	Контрольная работа	ОПК-2, ПК-1

## 6.1. План самостоятельной работы студентов

№ нед.	Тема	Вид самостоятельной работы	Задание	Рекомендуемая литература	Количество часов
1	Свойства нейтрино в Стандартной Модели	Внеаудиторная, решение задач	Свойства нейтрино, дираковская и майорановская масса, гипотеза нейтринных осцилляций	Источники из основной и дополнительной литературы по теме практических занятий; образовательные ресурсы Научной библиотекой ИГУ, сайта физического факультета ИГУ, база данных по физике inspirehep.net	4
2	Взаимодействие нейтрино с веществом	Внеаудиторная, решение задач	Вычисление сечений рассеяние нейтрино на электронах и нуклонах в кварк-партонной модели. Оценки пробега нейтрино до взаимодействия, процессы с заряженными и нейтральными токами.		4
3	Нейтринное излучение Солнца	Внеаудиторная, решение задач	Генерация нейтрино в цепочках термоядерных реакций на Солнце. Вычисление энергетического спектра солнечных нейтрино		4
4	Нейтринное излучение сверхновых	Внеаудиторная, решение задач	Расчет спектров нейтрино от вспышки сверхновой		4
5	Нейтринные события в детекторе	Внеаудиторная, решение задач	Оценка числа событий в детекторах нейтрино от вспышек сверхновых		4
6	Свойства нейтрино	Внеаудиторная, решение задач	Ограничения на свойства нейтрино на основе детектирования нейтринного импульса от SN 1987A		4
7	Образование нейтронной звезды	Внеаудиторная, решение задач	Оценить радиуса нейтросферы протонейтронной звезды $R_\nu$ . Каково соотношение между $R_{\nu_e}$ , $R_{\nu_\mu}$ и $R_{\nu_\tau}$ ?		4
8	Процесс переноса нейтрино в протонейтронной звезде	Внеаудиторная, решение задач	При каких условиях происходит захват нейтрино в мантии протонейтронной звезды?		4
9	Механизм нейтринного нагрева веществ за фронтом УВ в коллапсирующей звезде	Внеаудиторная, решение задач	Оценить передачу энергии от нейтрино за фронтом УВ, достаточную для сброса звездной оболочки		2
10	Космогенные $\bar{\nu}$ - и $\nu$ -нейтрино	Внеаудиторная, решение задач	Космогенные нейтрино: $\bar{\nu}$ - и $\nu$ -нейтрино от взаимодействия космических лучей с реликтовыми фотонами, с веществом и радиационными полями межзвездной среды		4
11	Галактические и внегалактические источники нейтрино	Внеаудиторная, решение задач	Получить оценку диффузных потоков нейтрино на Земле, используя данные об интенсивности космического гамма-излучения		2

12	Атмосферные нейтрино как фон для астрофизических нейтрино	Внеаудиторная, решение задач	Расчет углового усиления потоков атмосферных мюонных нейтрино		2
----	-----------------------------------------------------------	------------------------------	---------------------------------------------------------------	--	---

### 6.2. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов

В разделе 6.1. студентам для более углубленного изучения дисциплины предлагаются задачи и упражнения по изучаемым разделам. Предполагается, что студент самостоятельно изучит дополнительный материал из рекомендованной литературы (п. 8) и решит предложенные в п. 6.1 задачи. Оценка самостоятельной работы студентов проводится в виде домашних контрольных работ и опросов на практических занятиях.

### 7. Примерная тематика курсовых работ (проектов)

Учебным планом написание курсовых работ (проектов) не предусмотрено.

### 8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля):

#### Основная литература:

1. Синеговский, С.И. Космические нейтрино высоких энергий: учеб. пособие / С.И. Синеговский. - Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2009. - 60 с. (11)

#### Дополнительная литература:

1. Клапдор-Клайнротхаус, Г. В. Астрофизика элементарных частиц / Г.В. Клапдор-Клайнротхаус, Кау Цюбер; Пер.с нем., Под ред. А.А.Беднякова. - М.: Ред. журн. "Успехи физич. наук", 2000. - 496 с. - ISBN 5855040127 (нф А567499)

Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы:

1. <http://library.isu.ru/> - Научная библиотека ИГУ;
2. <http://inspirehep.net/>, <http://arxiv.org/> - Базы данных журнальных статей, материалов конференций и электронных препринтов по физике и астрофизике высоких энергий.

*Сверено с №5 ЧТД*



## 9. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля):

Учебная аудитория с доской и мелом для проведения лекционных и практических занятий. На лекциях могут использоваться мультимедийные средства: проектор, переносной экран, ноутбук. Лекции и материалы курса доступны на сайте [http://www.pd.isu.ru/sost/teor\\_phi/homepage/sinegovsky.html](http://www.pd.isu.ru/sost/teor_phi/homepage/sinegovsky.html).

## 10. Образовательные технологии:

Задачи изложения и изучения дисциплины реализуются в следующих формах деятельности:

- **лекции**, нацеленные на получение необходимой информации, и ее использование при решении задач;
- **практические занятия**, направленные на активизацию познавательной деятельности студентов и приобретения ими навыков решения задач;
- **консультации** – еженедельно для всех желающих студентов;
- **самостоятельная внеаудиторная работа** направлена на приобретение навыков самостоятельного решения задач по дисциплине;
- **текущий контроль** работы студентов осуществляется через практические задания

## 11. Оценочные средства (ОС):

Фонд оценочных средств представлен в приложении.

### 11.1. Оценочные средства для входного контроля:

Для изучения данного курса студент должен владеть основами физики и теоретической физики, уметь пользоваться стандартными поисковыми сервисами сети Интернет. Входной контроль умений и знаний не проводится.

### 11.2. Оценочные средства текущего контроля.

#### **Пример практического задания**

**ЗАДАНИЕ 1** Нейтринный всплеск при гравитационном коллапсе звезды

УСТНО:

1. Понятие радиуса нейтриносферы протонейтронной звезды  $R_\nu$ . Каково соотношение между  $R_{\nu_e}$ ,  $R_{\nu_\mu}$  и  $R_{\nu_\tau}$ .
2. При каких условиях происходит захват нейтрино в мантии протонейтронной звезды?
3. Каков принципиальный механизм нейтринного нагрева веществ за фронтом ударной волны в коллапсирующей звезде.

ПИСЬМЕННО:

1. Оцените энергию, уносимую нейтрино в гравитационном коллапсе звезды, если в масса железного ядра (до коллапса) порядка солнечной массы, радиус ядра 3000 км, а радиус образующейся нейтронной звезды – 10 км.
2. Получите оценку пороговой энергии (в лаб. системе) для реакции рождения заряженного пиона протоном космических лучей на инфракрасном излучении. Какова максимальная энергия нейтрино от распада такого пиона?
3. Оцените зенитно-угловое усиление потоков атмосферных нейтрино от распадов пи- и К-мезонов, считая атмосферу Земли сферической изотермической.

#### **Примерный список устных вопросов:**

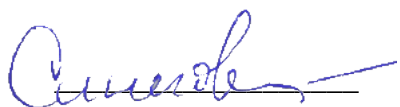
1. Дираковская и майорановская масса нейтрино.
2. Лептонные числа и гипотеза нейтринных осцилляций.
2. Оценки пробега нейтрино до взаимодействия, процессы с заряженными и нейтральными токами.
3. Основные термоядерные реакции на Солнце, в которых рождаются нейтрино.
4. Роль нейтрино в гравитационном коллапсе звезд.
5. Нейтринное излучение при вспышках сверхновых.
6. Детектирование нейтринного всплеска от сверхновой SN 1987A – факты и гипотезы.
6.  $\nu\bar{\nu}$ - и  $\nu\nu$ -нейтрино в астрофизических источниках.
7. Активные ядра галактик и микроквазары как источники нейтрино.
8. Атмосферные нейтрино как фон для астрофизических нейтрино.
9. Прохождение нейтрино высоких энергий через плотное вещество. Эффекты регенерации нейтрино.
10. Резонанс Глэшоу

### 11.3. Оценочные средства для промежуточной аттестации

#### **Примерный список вопросов к зачету:**

1. Свойства нейтрино: тип, масса, лептонные числа, нейтринные осцилляции.
2. Рассеяние нейтрино на электронах и нуклонах. Сечение  $\nu^N$ -рассеяния в кварк-партонной модели.
3. Оценки пробега нейтрино до взаимодействия, процессы с заряженными и нейтральными токами.
4. Генерация нейтрино в цепочках термоядерных реакций на Солнце. Нейтринное излучение Солнца.
5. Общие представления о физических процессах, предшествующих вспышке сверхновой и сопровождающих ее.
6. Роль нейтрино в гравитационном коллапсе звезд. Нейтринное излучение при вспышках сверхновых.
7. Сверхновая SN 1987A. Регистрация нейтринного импульса от SN 1987A, ограничения на свойства нейтрино, полученные на основе детектирования нейтринного импульса.
8. Механизмы генерации нейтрино в астрофизических источниках и в МЗС.
9. Реликтовые нейтрино.
10. Активные ядра галактик и микроквазары как источники нейтрино: модели и оценки потоков.
11. Космологические гамма-всплески – гипотетические источники нейтрино высоких и сверхвысоких энергий, модели и оценки потоков нейтрино.
12. Атмосферные нейтрино как фон для астрофизических нейтрино, потоки прямых нейтрино.
13. Уравнение переноса нейтрино в веществе, поглощение и регенерация нейтрино. Эффект регенерации  $\bar{\nu}_\mu$  за счет рождения и распада мюонов. Специфика переноса электронных антинейтрино. Резонанс Глэшоу.
14. Принципы регистрации нейтрино высоких энергий от астрофизических источников. Нейтринные телескопы: NT200+, IceCube, ANTARES. Регистрация событий от астрофизических нейтрино высоких энергий в эксперименте IceCube.

#### **Разработчики:**



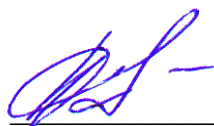
профессор кафедры теоретической физики

С.И. Синеговский

Программа рассмотрена на заседании кафедры теоретической физики

«13» мая 2016 г.

Протокол № 8 Зав. кафедрой



С.В. Ловцов

**Настоящая программа не может быть воспроизведена ни в какой форме без предварительного письменного разрешения кафедры-разработчика программы.**

**Лист согласования, дополнений и изменений  
на 2017/2018 учебный год**

К рабочей программе дисциплины Б1.В.ДВ.5.2 Нейтринная астрофизика по направлению 03.03.02 Физика профиля Физика конденсированного состояния

В рабочую программу дисциплины вносятся следующие дополнения: нет дополнений.

Изменения одобрены Ученым советом физического факультета,  
протокол №8 от 19.06.2017 г.

Зав. кафедрой теоретической физики



С.В. Ловцов