

## Рабочая программа дисциплины

### 1. Сложные системы в физике высоких энергий и космосе

#### 2. Лекторы.

**2.1.** д.ф.-м.н., профессор, Деденко Леонид Григорьевич, кафедра общей физики физического факультета МГУ, [ddn@dec1.sinp.msu.ru](mailto:ddn@dec1.sinp.msu.ru), 8-495-9392437.

#### 3. Аннотация дисциплины.

В настоящее время реализация любого эксперимента должна сопровождаться моделированием откликов всех детекторов. Каждое измерение сигнала необходимо сопоставлять с рассчитанным откликом детектора. В связи с этим проблема моделирования эксперимента занимает важное место в современной физике. В лекционном курсе содержатся базовые знания о принципах современного моделирования на примере космических лучей и некоторых ускорительных экспериментов. Приводятся примеры стандартных пакетов программ, которые используются в мировой практике. В рамках курса студенты познакомятся с принципами моделирования работы детекторов физических величин. Рассматривается метод Монте Карло как способ решения проблем транспорта и взаимодействий частиц и вычисления сигналов в детекторах. Рассматриваются сложные системы в атмосфере (широкие атмосферные ливни), в океане, во льду и лунном риголите (каскады от нейтрино сверхвысоких энергий) и в космосе (ускорение космических лучей при рассеянии на неоднородностях магнитного поля).

Учебный курс состоит из шестнадцати лекций, посвященных теоретическим основам вышеперечисленных проблем и методам их решения и шестнадцати семинарских занятий для практического закрепления курса на примере конкретных задач.

#### 4. Цели освоения дисциплины.

Овладеть базовыми теоретическими и практическими знаниями, необходимыми для моделирования откликов детекторов в различных экспериментах. Изучить наиболее распространенные и эффективные на сегодняшний день пакеты программ и научиться их использовать в области их применения.

#### 5. Задачи дисциплины.

Изучение современных методов компьютерного моделирования на основе применения известных пакетов программ. Понимание необходимости моделирования сигналов в детекторах для корректной интерпретации результатов эксперимента. Получение практических навыков моделирования с помощью пакетов программ для решения задач различной сложности.

#### 6. Компетенции.

##### 7.1. Компетенции, необходимые для освоения дисциплины.

ИК-3, ИК-4, ПК-1, ПК-2, ПК-5, ПК-6, ОНК1-5, ОНК-5

##### 7.2. Компетенции, формируемые в результате освоения дисциплины.

М-ОНК-1, М-ОНК-5, М-ИК-3, М-СК-2, М-СК-3, М-ПК-1, М-ПК-2, М-ПК-3, М-СПК-14, М-СПК-15

#### 7. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

В результате освоения дисциплины студент должен знать теоретические и практические основы современных методов моделирования показаний различных детекторов и пределы их применимости; уметь самостоятельно выбрать адекватный метод решения конкретной научной задачи; владеть навыками работы с современными пакетами программ, необходимыми для дальнейшего их изучения; иметь опыт деятельности в решении простейших задач.

#### 8. Содержание и структура дисциплины.

Вид работы	Семестр 4	Всего
------------	-----------	-------

	<b>4</b>	
<b>Общая трудоёмкость, акад. Часов</b>	108	108
<b>Аудиторная работа:</b>	30	30
Лекции, акад. Часов	15	15
Семинары, акад. Часов	15	15
Лабораторные работы, акад. часов	-	-
<b>Самостоятельная работа, акад. часов</b>	78	78
<b>Вид итогового контроля (зачёт, зачёт с оценкой, экзамен)</b>	экзамен	экзамен
<b>Наименование раздела</b>	Трудоёмкость (академических часов) и содержание занятий	Форма текущего контроля

N раз- дела	Наименование раздела	Трудоёмкость (академических часов) и содержание занятий			Форма текущего контроля	
		Аудиторная работа				Самостоятельная работа
		Лекции	Семинары	Лабораторные работы		
1	Общие принципы моделирования сложных систем	1 час. Общие принципы моделирования сложного эксперимента. Пакеты программ CORSIKA, AIRES и GALPROP для моделирования развития ШАЛ в атмосфере и взаимодействий частиц в космосе.	1 час. Метод Монте Карло. Моделирование транспорта и взаимодействий различных частиц. Моделирование откликов детекторов.		5 часов Работа с лекционным материалом. Чтение литературы. Решение задач на тему моделирование транспорта и взаимодействий различных частиц, моделирование откликов детекторов.	Об, Оп
2	Современные модели взаимодействия адронов	1 час. Характеристика моделей взаимодействия адронов EPOS1.99, EPOS LHC, SIBYLL 2.1, QGS-01, QGSJETII-03 и QGSJETII-04	1 час. Феноменологические параметры взаимодействия адронов: сечения взаимодействия, коэффициент неупругости, множественное рождение вторичных частиц, инклюзивные спектры, распределения вторичных частиц по псевдобыстроте и поперечным импульсам.		5 часов. Работа с лекционным материалом. Чтение литературы. Сравнение различных моделей взаимодействия на примерах распределений параметров взаимодействия частицы.	ДЗ, Об, Оп
3	Тестирование моделей взаимодействия адронов.	1 час. Тестирование моделей взаимодействия адронов по данным ускорительных экспериментов LHCf и TOTEM.	1 час. Вычисления распределений заряженных частиц и потоков энергии по псевдобыстроте и их сравнение с данными экспериментов на большом адронном коллайдере.		5 часов. Работа с лекционным материалом. Чтение литературы. Вычисления распределений заряженных частиц и потоков энергии по псевдобыстроте для разных моделей.	ДЗ, Об, Оп
		1 час. Тестирование моделей взаимодействия адронов по потокам атмосферных мюонов	1 час. Экспериментальные данные коллабораций L3+Cosmic, MACRO и LVD по потокам атмосферных мюонов как тест моделей взаимодействия адронов.		5 часов. Работа с лекционным материалом. Чтение литературы. Сравнение вычисленных потоков атмосферных мюонов с экспериментальными данными L3+Cosmic, MACRO и LVD.	
4	Моделирование некоторых характеристик первичного космического излучения (ПКИ)	1 час. Взаимодействие протонов и ядер ПКИ с фотонами чернотельного излучения в области сверхвысоких энергий. Эффект Грейзена-Зацепина-Кузьмина (ГЗК).	1 час. Моделирование уменьшения потока космических протонов сверхвысоких энергий из-за эффекта ГЗК.		5 часов. Работа с лекционным материалом. Чтение литературы. Вычисления критической энергии обрезания спектра первичных протонов.	ДЗ, Об, Оп
		1 час. Моделирование баланса энергии космических лучей в нашей галактике Млечный путь и энергетики взрывов сверхновых звезд.	1 час. Вычисления энергии космических лучей в нашей галактике Млечный путь и его сравнение с суммарной мощностью взрывов сверхновых звезд.		5 часов. Работа с лекционным материалом. Чтение литературы. Проверка баланса энергий космических лучей и взрывов сверхновых звезд.	

5	Моделирование характеристик широких атмосферных ливней в области сверхвысоких энергий	1 час. Методы моделирования потока мюонов в атмосфере Земли. Уравнение образования и переноса мюонов в атмосфере и методы его решения.	1 час. Оригинальный метод моделирования потока мюонов в атмосфере Земли с использованием пакета CORSIKA 7.4.		5 часов. Работа с лекционным материалом. Чтение литературы. Ознакомление с пакетом CORSIKA 7.4.	ДЗ, Об, Оп
		1 час. Моделирование сигналов в наземных детекторах от частиц ШАЛ с использованием пакета программ GEANT4.	1 час. Моделирование калибровки сигнала в наземных детекторах по откликам от атмосферных мюонов с использованием пакета программ GEANT4.		5 часов. Работа с лекционным материалом. Чтение литературы. Ознакомление с пакетом программ GEANT4.	
		1 час. Моделирование сигналов в подземных детекторах от мюонов ШАЛ с использованием пакета программ GEANT4.	1 час. Моделирование калибровки сигнала в подземных детекторах по откликам от атмосферных мюонов с использованием пакета программ GEANT4.		5 часов. Работа с лекционным материалом. Чтение литературы. Ознакомление с пакетом программ GEANT4. Составление простейшей программы расчета отклика детектора.	
		1 час. Излучения Вавилова-Черенкова и флуоресцентного света в атмосфере, индуцированные ШАЛ.	1 час. Моделирование сигналов от излучений Вавилова-Черенкова и флуоресцентного света в наземных детекторах и телескопах.		5 часов. Работа с лекционным материалом. Чтение литературы. Разработка алгоритма программы для расчета откликов детекторов излучения Вавилова-Черенкова .	
6	Методы оценок состава и энергии частиц ПКИ.	1 час. Методы оценки энергии частиц ПКИ в области сверхвысоких энергий. Моделирование оценки энергии частицы ПКИ по сигналам от всех сработавших детекторов.	1 час. Моделирование оценки энергии частицы ПКИ по сигналам от всех сработавших детекторов.		5 часов. Работа с лекционным материалом. Чтение литературы. Разработка алгоритма программы для расчета откликов всех наземных детекторов от частиц ШАЛ.	ДЗ, Об, Оп
		1 час. Методы определения состава частиц ПКИ в области сверхвысоких энергий.	1 час. Моделирование состава частиц ПКИ по отношению сигналов в подземных и наземных детекторах на заданном расстоянии от оси ливня.		5 часов. Работа с лекционным материалом. Чтение литературы. Разработка алгоритма программы для расчета откликов наземного и подземного детекторов, расположенных на заданном расстоянии от оси ливня.	

7	Моделирование сигналов от каскадов в плотных средах	1 час. Эффект Ландау-Померанчука-Мигдала (ЛПМ). Сечения Мигдала для процессов тормозного излучения и генерации пар.	1 час. Моделирование электронно-фотонных каскадов в средах с переменной плотностью и в однородных плотных средах в области сверхвысоких энергий с сечениями Мигдала.		6 часов. Работа с лекционным материалом. Чтение литературы. Сравнение сечений Мигдала с сечениями Бете-Гайтлера в области сверхвысоких энергий для процессов тормозного излучения и генерации пар.	
		1 час Механизм Г.А. Аскарьяна образования акустического сигнала от каскадов частиц в плотных средах в области сверхвысоких энергий.	1 час. Моделирование акустических сигналов от каскадов, индуцированных космическими нейтрино сверхвысоких энергий в воде, во льду и в соляных линзах.		6 часов. Работа с лекционным материалом. Чтение литературы. Оценки акустических сигналов от цилиндрической антенны на разных расстояниях от ее оси.	
		1 час Механизм Г.А. Аскарьяна образования радио сигнала от избыточного заряда в каскадах частиц в области сверхвысоких энергий.	1 час. Моделирование радио сигналов от каскадов, индуцированных космическими нейтрино во льду, в соляных линзах и в лунном риголите.		6 часов. Работа с лекционным материалом. Чтение литературы. Расчеты избытка заряда в каскаде в области сверхвысоких энергий.	

**Предусмотрены следующие формы текущего контроля успеваемости:**

- Домашнее задание (ДЗ),
- Обсуждение (Об),
- Опрос (Оп).

## **9. Место дисциплины в структуре ООП ВПО**

1. Обязательная дисциплина. Блок профессиональной подготовки «Современные проблемы физики»
2. Вариативная часть, профессиональный блок.
3. Дисциплина является теоретическим базисом к овладению современными методами численного моделирования. Дисциплина дополняет дисциплины из ООП, посвященные физике космических лучей, ускорительной физике, физике высоких энергий, астрофизике высоких энергий.
  - 3.1. Дисциплины и практики, которые должны быть освоены для начала освоения данной дисциплины:
    - дисциплины "Математический анализ", "Линейная алгебра", "Дифференциальные уравнения", из блока Б-ОН базовой части ООП ВПО,
  - 3.2. Дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее: « Физика атомного ядра и частиц» из модуля «Общая физика», «Теория вероятностей» из модуля « Математика» и «Основы математического моделирования» и «Программирование и информатика» из модуля «Информатика».

Научно-исследовательская работа из блока "Научно-исследовательская работа" и выпускная квалификационная работа по направлению "Физика" из блока "Итоговая государственная аттестация".

## **10. Образовательные технологии**

Образовательные технологии, используемые при реализации различных видов учебной работы и дающие наиболее эффективные результаты освоения дисциплины:

- дискуссии,
- консультации
- преподавание дисциплин в форме авторских курсов по программам, составленным на основе результатов исследований научных школ МГУ,

## **11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации**

Текущая аттестация проводится еженедельно. Критерии формирования оценки – посещаемость занятий, активность студентов на лекциях и семинарах, восприятие излагаемого материала, выполнение домашних заданий.

Полный перечень вопросов к экзамену:

1. Основные феноменологические понятия физики взаимодействий адронов в области сверхвысоких энергий. Упругие и неупругие сечения взаимодействия.
2. Основные феноменологические понятия физики взаимодействий адронов в области сверхвысоких энергий. Множественное рождение вторичных частиц.
3. Основные феноменологические понятия физики взаимодействий адронов в области сверхвысоких энергий. Инклюзивные энергетические спектры вторичных частиц. Коэффициент неупругости.
4. Основные феноменологические понятия физики взаимодействий адронов в области сверхвысоких энергий. Распределение вторичных частиц по поперечным импульсам.
5. Модели взаимодействия. Характеристика моделей взаимодействия адронов EPOS 1.99, EPOS LHC и SIBYLL 2.1.
6. Модели взаимодействия. Характеристика моделей взаимодействия адронов QGSJETII-01, QGSJETII-03, QGSJETII-04

7. Методы тестирования моделей взаимодействия адронов EPOS LHC, SIBYLL 2.1 , QGSJETII-03 и QGSJETII-04 на основе данных, полученном на большом адронном коллайдере (БАК) в эксперименте LHCf с использованием пакета CORSIKA 7.4 и оригинальных разработок и программ.
8. . Методы тестирования моделей взаимодействия адронов EPOS LHC, SIBYLL 2.1 , QGSJETII-03 и QGSJETII-04 на основе данных, полученном на большом адронном коллайдере (БАК) в эксперименте TOTEM с использованием пакета CORSIKA 7.4 и оригинальных разработок и программ.
9. . Методы тестирования моделей взаимодействия адронов EPOS 1.99, EPOS LHC, и QGSJETII-03 на основе данных по потокам атмосферных мюонов с использованием пакета CORSIKA 7.4 и оригинальных разработок и программ в наиболее важной области энергий вторичных частиц.
10. Методы тестирования моделей взаимодействия адронов SIBYLL 2.1 , QGS-01 QGSJETII-04 на основе данных по потокам атмосферных мюонов с использованием пакета CORSIKA 7.4 и оригинальных разработок и программ в наиболее важной области энергий вторичных частиц.
11. Основные характеристики первичного космического излучения (ПКИ).  
Энергетический спектр и состав частиц ПКИ в области сверхвысоких энергий.
12. Возможные источники космических лучей. Диаграмма Хилласа.
13. Статистические механизмы ускорения космических лучей (механизмы Ферми первого и второго рода).
14. Взрывы сверхновых звезд как возможный источник космических лучей.  
Образование ударной волны от этих взрывов и ускорение заряженных частиц в результате рассеяний на неоднородностях магнитных полей по обе стороны фронта ударной волны.
15. Баланс энергии космических лучей в нашей галактике Млечный путь и энергетика взрыва сверхновых звезд.
16. Прохождение частиц ПКИ через атмосферу. Образование широкого атмосферного ливня (ШАЛ) от частиц первичного космического излучения как совокупности каскадов адронов, лептонов и гамма квантов.
17. Адронный каскад и электронно-фотонный каскад. Мюонная компонента ШАЛ.
18. Излучение Вавилова-Черенкова в атмосфере, индуцированное ШАЛ.
19. Излучение флуоресцентного света, индуцированное ШАЛ.
20. Радиоизлучение ШАЛ. Механизм Г.А. Аскарьяна.
21. Пространственно-временная структура ШАЛ.
22. Баланс энергий в ШАЛ.
23. Методы детектирование ШАЛ в области сверхвысоких энергий.  
Обсерватория P. Auger в Аргентине.
24. Методы детектирование ШАЛ в области сверхвысоких энергий.  
Установка Telescope array в США.
25. Методы детектирование ШАЛ в области сверхвысоких энергий. Якутская установка.
26. Методы детектирование ШАЛ в области сверхвысоких энергий. Установка «ТУНКА» и проект «ТАЙГА».
27. Взаимодействие протонов и ядер ПКИ с фотонами чернотельного излучения в области сверхвысоких энергий. Эффект Грейзена-Зацепина-Кузьмина (ГЗК). Подавление потока космических протонов сверхвысоких энергий из-за эффекта ГЗК.
28. Ограничения на потоки первичных фотонов в области сверхвысоких энергий.
29. Детектирование космических нейтрино сверхвысоких энергий. Установка БНТ на Байкале.

30. Детектирование космических нейтрино сверхвысоких энергий. Установка “ICE CUBE” на Южном полюсе.
31. Детектирование космических нейтрино сверхвысоких энергий. Проект KM3NeT.
32. Метод детектирования каскадов от космических нейтрино по излучению Вавилова-Черенкова.
33. Акустический метод детектирования каскадов от космических нейтрино в воде океана, во льду и в соляных линзах. Метод Г.А. Аскарьяна.
34. Метод детектирование каскадов от космических нейтрино по радиоизлучению в лунном риголите, в соляных линзах и во льдах Антарктиды. Метод Г.А. Аскарьяна.
35. Моделирование спектра атмосферных мюонов с использованием пакета программ CORSIKA 7.4 и оригинальных разработок и программ.
36. Моделирование сигнала в наземных детекторах от частиц ШАЛ с использованием пакетов программ GEANT4 и CORSIKA 7.4.
37. Моделирование сигнала в подземных детекторах от мюонов ШАЛ с использованием пакетов программ GEANT4 и CORSIKA 7.4.
38. Моделирование калибровки сигнала в наземных детекторах по потокам атмосферных мюонов с использованием пакетов программ GEANT4 и CORSIKA 7.4.
39. Моделирование калибровки сигнала в подземных детекторах по потокам атмосферных мюонов с использованием пакетов программ GEANT4 и CORSIKA 7.4.
40. Моделирование флуоресцентного света от ШАЛ с использованием пакета программ CORSIKA 7.4.
41. Моделирование излучения Вавилова-Черенкова от ШАЛ с использованием пакета программ CORSIKA 7.4.
42. Моделирование оценок энергии частиц ПКИ по сигналам всех наземных детекторов.
43. Оценки состава частиц ПКИ по отношению сигналов в подземных и наземных детекторах на заданном расстоянии от оси ШАЛ.
44. Метод Монте Карло. Моделирование транспорта и взаимодействий частиц.
45. Метод Монте Карло. Моделирование транспорта и взаимодействий частиц в атмосфере с учетом эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала (ЛПМ).
46. Метод Монте Карло. Моделирование транспорта и взаимодействий частиц в плотных средах (в воде океана, во льду, в лунном риголите) с учетом эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала (ЛПМ).
47. Метод Монте Карло. Моделирование откликов детекторов.
48. Современные библиотеки и пакеты программ. Пакет GEANT4.
49. Современные библиотеки и пакеты программ. Пакет CORSIKA 7.4.
50. Современные модели взаимодействия адронов.

## 12. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

### Основная литература

1. В.С. Мурзин. Введение в физику космических лучей. М. Изд. МГУ. 1988.
2. Г.Б. Христиансен, Г.В. Куликов, Ю.А. Фомин. Космическое излучение сверхвысокой энергии. М. Атомиздат. 1975.
3. С Хаякава. Физика космических лучей. Части 1, 2 и 3. М. Мир. 1974.



4. Б. Росси. Частицы больших энергий. М. ГИТТЛ. 1955.
5. И.П. Иваненко. Электромагнитные каскадные процессы. М. Изд. МГУ. 1972.
6. А.М. Кольчужкин, В.В. Учайкин. Введение в теорию прохождения частиц через вещество. М. Атомиздат. 1978.
7. В.Г. Гришин. Инклюзивные процессы в адронных взаимодействиях при высоких энергиях. М. Энергоатомиздат. 1982.
8. В.Г. Гришин. Кварки и адроны во взаимодействиях частиц высокой энергии. М. Энергоатомиздат. 1988.
9. Г. Кейн. Современная физика элементарных частиц. М. Мир. 1990.
10. В.С. Барашенков. Сечения взаимодействия частиц и ядер с ядрами. Дубна. Изд. ОИЯИ. 1993.
  
11. Михайлов Г.А. Численное статистическое моделирование: методы Монте-Карло: [учеб. пособие по направлению подгот. "Прикладная математика"] / Г.А.Михайлов, А.В.Войтишек. - М.: Академия, 2006. - 366 с. - (Университетский учебник).
12. Пронин Л.Н. Метод статистических испытаний: учеб.-метод. пособие / Л.Н.Пронин. - СПб.: СПбГИЭА, 1999. - 137 с.
13. D. Heck, J. Knapp, J.-N. Capdevielle et al., Report FZKA 6019 Forschungszentrum Karlsruhe (1998). <https://web.i kp.kit.edu/corsika/>
14. The GEANT4 Collab., <http://www.info.cern.ch/asd/geant4.html>
15. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Теоретическая физика. Теория поля. т.2. М., Наука, 1989.
16. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Теоретическая физика. Гидродинамика. т.7. М., Наука, 1989.

#### Дополнительная литература

1. Соболев И.М. Метод Монте-Карло / И.М.Соболев. - 4-е изд., доп. и перераб. - М.: Наука, 1985. - 78 с. – (Попул. лекции по матем., Вып.46).
2. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло / И.М.Соболев. - М.: Наука, 1973. - 311 с.
3. Alex F Bielajew. Fundamentals of the Monte Carlo method for neutral and charged particle transport. 2001

#### Периодическая литература

1. M. Ambrosio, R. Antolini, G. Auriemma et al. (The MACRO Collaboration), Phys. Rev. D52, 3793 (1995).
2. The L3 Collaboration, arXiv: hep-ex 0408114v1K (2004).
3. M. Aglietta, B. Alpat, E. D. Alieva et al. (The LVD Collaboration), arXiv: hep-ex/9806001v1 (1998).

4. Dedenko L., Roganova T., Fedorova G. Test of hadron interaction models in the most important energy range of secondary particles in spectra of atmospheric muons // JETP Letters. — 2014. — Vol. 100, no. 4. — P. 223–226.
  5. Деденко Л., Роганова Т., Федорова Г. Тестирование моделей взаимодействия адронов в наиболее важной области энергий вторичных частиц по спектрам атмосферных мюонов. Письма в ЖЭТФ // Письма в "Журнал экспериментальной и теоретической физики". — 2014. — Т. 100, № 4. — С. 247–251.  
Possible composition of the primary particles at ultrahigh energies observed at the Yakutsk array / L. Dedenko, G. Fedorova, T. Roganova et al. // Journal of Physics: Conference Series. — 2013. — Vol. 409. — P. 2068–2071.
  6. Dedenko L., Fedorova G., Roganova T. Units of signals in the surface and underground scintillation detectors of the yakutsk array // Journal of Physics: Conference Series. — 2013. — Vol. 409. — P. 2093–2096.  
Деденко Л., Роганова Т., Федорова Г. Единицы измерения сигналов в наземных и подземных детекторах Якутской установки // Известия РАН. Серия физическая. — 2013. — Т. 77, № 11. — С. 1561–1563.
  7. The composition of the primary particles at energies  $3 \times 10^{17}$ – $3 \times 10^{19}$  eV observed at the yakutsk array / L. Dedenko, G. Fedorova, T. Roganova et al. // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. — 2012. — Vol. 39, no. 9. — P. 095202–095212.
  8. Changes in the chemical composition of primary cosmic radiation at ultrahigh energies / L. Dedenko, A. Glushkov, S. Knurenko et al. // Bulletin of the Russian Academy of Science, Physics. — 2011. — Vol. 75, no. 3. — P. 296–298.
- Estimation of the mass composition of ultra-high energy cosmic rays by muon fraction in extensive air showers / A. Glushkov, S. Knurenko, A. Makarov et al. // Proc. 32-nd Int. Cosmic Ray Conf. (Beijing), 2011. — Vol. 1. — [http://www.ihep.ac.cn/english/conference/icrc2011/paper/proc/v1/v1\\_0254.pdf](http://www.ihep.ac.cn/english/conference/icrc2011/paper/proc/v1/v1_0254.pdf) Пекин, 2011. — P. 213–217.

### **13. Материально-техническое обеспечение**

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Лекции по дисциплине проводятся в аудитории им. А.Н. Матвеева (комн. 4-30) физического факультета. Лекционная аудитория обеспечена проекционным оборудованием и компьютером.