

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

УТВЕРЖДАЮ

Директор

С.В. Иванов

» 04 2022 г.



Рабочая программа факультативной дисциплины

**ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА**

программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре

по научной специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия

Принята решением Ученого совета  
от 04.03.2022 № 03/22

Санкт-Петербург

2022 г.

Рабочая программа факультативной дисциплины «Физическая кинетика» составлена на основании программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия (далее - программа аспирантуры)

## **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Целями изучения дисциплины является:

- Изучение современной кинетической теории вещества в различных физических условиях (от разреженного газа до вырожденных квантовых газов и сильнонеидеальных систем частиц, в том числе, в сильных магнитных полях);
- изучение современных методов расчета кинетических свойств материи;
- приобретение опыта использования методов кинетики для моделирования диссипативных процессов в различных физических условиях.

**Задачи дисциплины заключаются в изучении:**

- фундаментальных понятий, законов и теорий, относящихся к физической кинетике;
- теоретических концепций и моделей, описывающих физику кинетических явлений;
- современных аналитических и численных методов расчета кинетических коэффициентов.

Для достижения задач, поставленных при изучении дисциплины, используется набор методических средств: учебная, учебно-методическая литература, информационные ресурсы библиотеки, электронные курсы и др.

## **2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММЫ АСПИРАНТУРЫ**

2.1. Дисциплина «Физическая кинетика» входит в факультативную часть программы аспирантуры с целью расширения и углубления научных и прикладных знаний аспирантов и организуется по выбору и желанию аспиранта.

2.2. Программа данной дисциплины строится на преемственности программ в системе высшего образования и предназначена для аспирантов ФТИ им. А.Ф. Иоффе, прошедших обучение по программе подготовки магистров, прослушавших соответствующие курсы и имеющих по ним положительные оценки. Она основывается на положениях, отраженных в учебных программах указанных уровней.

## **3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

По окончании изучения дисциплины аспиранты должны будут:

**знать:**

- основные закономерности, определяющие кинетические коэффициенты вещества;

- основные понятия, законы и модели кинетических явлений, протекающих в веществе при различных физических условиях;

**уметь:**

- применять методы математического расчета кинетических коэффициентов;  
 - самостоятельно изучать и понимать специальную научную и методическую литературу, связанную с проблемами физической кинетики;

**владеть:**

- фундаментальными разделами физики, необходимыми для исследования кинетических свойств вещества;

- научными терминами, основными понятиями и концепциями физической кинетики, необходимыми для понимания специальной научной и методической литературы, связанной с проблемами изучения кинетики вещества;

- опытом понимания качества исследований, относящихся к физической кинетике;

- опытом самостоятельного изучения и анализа специальной научной и методической литературы, связанной с проблемами физической кинетики.

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

##### 4.1. Разделы дисциплины и виды занятий

Приводимая ниже таблица показывает распределение бюджета учебного времени, отводимого на освоение основных разделов курса согласно учебному плану «Физическая кинетика».

Наименование разделов и тем	Трудоёмкость (в ЗЕТ)	Объём работы (в часах)	Всего учебных занятий (в часах)			
			Лекции	Лаб. / практ.	Самостоятельная работа	Контроль
1	2	3	4	5	6	7
<b>Раздел 1. Уравнение Больцмана</b>						
Тема 1.1. Функция распределения		8	3		5	
Тема 1.2. Теорема Лиувилля		8	3		5	
Тема 1.3. Уравнение Больцмана		8	3		5	
Тема 1.4. Столкновения частиц		8	3		5	



Тема 1.5. H-теорема Больцмана		8	3		5	
Тема 1.6. Интеграл столкновений легких частиц с тяжелыми		8	3		5	
<b>Раздел 2. Газодинамика и коэффициенты переноса в разреженном газе</b>						
Тема 2.1. Уравнения газодинамики		8	3		5	
Тема 2.2. Линеаризованное уравнение Больцмана для простого газа		8	3		5	
Тема 2.3. Теплопроводность и вязкость простого газа		8	3		5	
Тема 2.4. Газодинамика многокомпонентных смесей		8	3		5	
<b>Раздел 3. Кинетика и теория флуктуаций</b>						
Тема 3.1. Флуктуации термодинамических величин		8	3		5	
Тема 3.2. Принцип Онзагера		8	3		5	
Тема 3.3. Формулы Кубо. Молекулярная динамика		8	3		5	
<b>Раздел 4. Кинетика вырожденного электронного газа</b>						
Тема 4.1. Кинетическое уравнение для вырожденных электронов		8	3		5	
Тема 4.2. Кинетические коэффициенты вырожденных электронов		8	3		5	
Тема 4.3. Приближение времени релаксации для вырожденных электронов		8	3		5	
Тема 4.4. Кинетика неупругих столкновений вырожденных электронов		8	3		5	
Тема 4.5. Кинетика вырожденного электронного газа в магнитном поле		8	3		5	
<b>Всего по дисциплине</b>	<b>4</b>	<b>144</b>	<b>54</b>		<b>90</b>	за- чет

#### *4.2. Содержание разделов и тем*

##### **Раздел 1. Уравнение Больцмана**

Тема 1.1. Функции распределения.

*Лекции (3 часа)*

Многочастичные функции распределения. Иерархии функций распределения. Одночастичные состояния и функции распределения. Равновесные одночастичные функции распределения. Полное термодинамическое равновесие. Распределения Максвелла, Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна. Локальное термодинамическое равновесие.

Тема 1.2. Теорема Лиувилля.

*Лекции (3 часа)*

Доказательство теоремы Лиувилля. Иерархия функций распределения и цепочка уравнений Боголюбова. Одночастичные, двухчастичные, трехчастичные и прочие функции распределения. Цепочка рекуррентных уравнений для этих функций. Корреляционные функции.

Тема 1.3. Уравнение Больцмана.

### *Лекции (3 часа)*

Разреженный газ. Вывод кинетического уравнения Больцмана. Бесстолкновительное уравнение Больцмана. Кинематика парных упругих столкновений частиц. Интеграл парных упругих столкновений. Дифференциальное сечение рассеяния частиц. Теорема взаимности. Частота столкновений частиц в газе. Стандартная форма интеграла столкновений в разреженном газе. Симметричная форма интеграла столкновений. Принцип детального равновесия. Усиление или блокировка реакций в квантовых газах.

Тема 1.4. Столкновения частиц.

### *Лекции (3 часа)*

Потенциалы взаимодействия нейтральных частиц. Методы расчета сечений рассеяния частиц. Модель твердых упругих шариков. Сечения столкновений заряженных частиц в плазме, кулоновское дальное действие. Слабонеидеальная плазма. Плазменное экранирование кулоновского взаимодействия заряженных частиц поляризацией плазмы. Сечение рассеяния заряженных частиц с учетом экранирования. Скорость изменения физической величины за счет столкновений. Сумматорные инварианты и их свойства.

Тема 1.5. H-теорема Больцмана.

### *Лекции (3 часа)*

Скорость изменения энтропии разреженного газа. Постоянство полной энтропии в бесстолкновительном газе. Скорость производства энтропии за счет столкновений. Доказательство H-теоремы.

Тема 1.6. Интеграл столкновений легких частиц с тяжелыми.

### *Лекции (3 часа)*

Упрощение интеграла столкновений легких частиц с тяжелыми в приближении времени релаксации. Транспортное сечение рассеяния. Время релаксации и эффективная частота столкновений. Аддитивность эффективных частот при нескольких механизмах рассеяния легких частиц с тяжелыми. Времена релаксации в нейтральном газе. Столкновения электронов с ионами в плазме; время релаксации, кулоновский логарифм.

## **Раздел 2. Газодинамика и коэффициенты переноса в разреженном газе**

Тема 2.1. Уравнения газодинамики.

### *Лекции (3 часа)*

Газодинамический режим. Вывод уравнений газодинамики простого газа из уравнения Больцмана. Бездиссипативная газодинамика. Уравнения газодинамики бесстолкновительного простого газа и их общие свойства. Диссипативная газодинамика. Уравнения газодинамики простого газа с учетом диссипации. Диссипативные эффекты – теплопроводность и вязкость.

Тема 2.2. Линеаризованное уравнение Больцмана для простого газа.

*Лекции (3 часа)*

Линеаризация левой части уравнения Больцмана и интеграла столкновений для простого газа в газодинамическом пределе. Уравнение, описывающее релаксацию простого газа к состоянию равновесия в задаче о теплопроводности. Вывод формулы для скорости производства энтропии при столкновениях частиц в этой задаче. Формулировка вариационного принципа для задачи релаксации простого газа к состоянию термодинамического равновесия. Общие формулы, позволяющие применять вариационный принцип для вычисления кинетических коэффициентов.

Тема 2.3. Теплопроводность и вязкость простого газа.

*Лекции (3 часов)*

Присоединенные полиномы Лагерра—Сонина и их свойства. Вывод вариационного выражения для теплопроводности простого газа путем разложения вариационной функции по полиномам Лагерра. Система уравнений для коэффициентов разложения. Вычисление теплопроводности простого газа в приближении одного полинома Лагерра. Физический смысл полученного решения; диффузия тепла. Вязкие натяжения и коэффициенты вязкости. Скорость роста энтропии за счет столкновений в задаче о вязкости. Вычисление сдвиговой вязкости простого газа в приближении одного полинома Лагерра. Физический смысл решения; вязкость и диффузия импульса.

Тема 2.4. Газодинамика многокомпонентных смесей.

*Лекции (3 часов)*

Уравнения диссипативной газодинамики многокомпонентных смесей. Феноменологические соотношения переноса в многокомпонентном газе. Коэффициенты диффузии и термодиффузии. Схема расчета кинетических коэффициентов путем разложения по полиномам Лагерра. Упрощенное решение уравнений диффузии легкого газа, частицы которого сталкиваются с тяжелыми частицами. Коэффициент диффузии и его простые оценки. Коэффициент термодиффузии как перекрестный кинетический коэффициент. Кинетика электронов в плазме, содержащей ионы одного сорта. Коэффициент диффузии, проводимость и подвижность электронов. Коэффициент термодиффузии и удельная термоэдс. Уравнения магнитной гидродинамики; магнитные силы; анизотропия кинетических коэффициентов в магнитном поле. Кинетика газа с учетом внутренних степеней свободы молекул и химических реакций.

### **Раздел 3. Кинетика и теория флуктуаций**

Тема 3.1. Флуктуации термодинамических величин.

*Лекции (3 часов)*



Основы теории флуктуаций термодинамических величин в системах с большим числом частиц. Гауссовы флуктуации термодинамических величин в выделенный момент времени. Обобщенные термодинамические координаты и канонически сопряженные величины. Корреляционные функции для флуктуаций одной или нескольких термодинамических величин в термодинамически равновесной системе в разные моменты времени. Связь затухания корреляций с затуханием флуктуаций в слабонеоднородной системе при релаксации к равновесию.

Тема 3.2. Принцип Онзагера.

*Лекции (3 часов)*

Обобщенные термодинамические координаты и термодинамические потоки; матрицы обобщенных кинетических коэффициентов. Прямые и перекрестные кинетические коэффициенты. Доказательство принципа Онзагера; устойчивость термодинамического равновесия. Пример применения принципа Онзагера для описания диффузии и термодиффузии бинарной смеси.

Тема 3.3. Формулы Кубо. Молекулярная динамика.

*Лекции (3 часа)*

Формулы Кубо для универсального описания разных кинетических коэффициентов с учетом анизотропии среды, временной и пространственной зависимости вынуждающих воздействий, в том числе для плотной и сильнонеидеальной среды. Расчеты кинетических коэффициентов методами молекулярной динамики.

#### **Раздел 4. Кинетика вырожденного электронного газа**

Тема 4.1. Кинетическое уравнение для вырожденных электронов.

*Лекции (3 часа)*

Кинетическое уравнение и особенности явлений переноса в плотном вырожденном электронном газе. Линеаризованное уравнение. Электрический ток, потоки энергии и тепла. Формальный расчет электро- и теплопроводности, а также удельной термоэдс в вырожденном электронном газе. Соотношения переноса для теоретиков и экспериментаторов. Вывод выражения для скорости производства энтропии при столкновениях вырожденных электронов. Вариационный принцип для вырожденных электронов.

Тема 4.2. Кинетические коэффициенты вырожденных электронов.

*Лекции (3 часов)*

Общая формула для электропроводности – формула Друде. Общая формула для теплопроводности – обобщенный закон Видемана-Франца. Общая формула для удельной термоэдс – связь с электропроводностью. Качественное описание процессов релаксации в вырожденном электронном газе как диффузии электронов по ферми-поверхности. Отличия релаксации в задачах электро- и теплопроводности.

Тема 4.3. Приближение времени релаксации для вырожденных электронов.

*Лекции (3 часа)*

Вычисление кинетических коэффициентов в приближении времени релаксации. Прямое кулоновское рассеяние. Рассеяние на заряженных примесях.

Тема 4.4. Кинетика неупругих столкновений вырожденных электронов.

*Лекции (3 часа)*

Расчет теплопроводности при электрон-электронных столкновениях вариационным методом. Разделение интегрирования по энергиям и направлениям импульсов электронов. Рассеяние электронов на фононах; интеграл столкновений; случаи низких и высоких температур. Общая температурная зависимость кинетических коэффициентов в металлах.

Тема 4.5. Кинетика вырожденного электронного газа в магнитном поле.

*Лекции (3 часа)*

Кинетическое уравнение для вырожденных электронов в магнитном поле в приближении времени релаксации. Решение уравнения и определение тензоров электропроводности и электросопротивления. Продольные, поперечные и холловские кинетические коэффициенты. Термомагнитные явления в вырожденном электронном газе.

## **5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Технология процесса обучения по дисциплине «Физическая кинетика» включает в себя следующие образовательные мероприятия:

- а) аудиторные занятия (лекционно-семинарская форма обучения);
- б) самостоятельная работа студентов;
- в) контрольные мероприятия в процессе обучения и по его окончании;
- г) зачет по окончании изучения дисциплины.

Аудиторные занятия проводятся в интерактивной форме с использованием мультимедийного обеспечения и технологии проблемного обучения.

Презентации позволяют качественно иллюстрировать практические занятия схемами, формулами, чертежами, рисунками. Кроме того, презентации позволяют чётко структурировать материал занятия.

Электронная презентация позволяет отобразить процессы в динамике, что улучшает восприятие материала.

Самостоятельная работа организована в соответствии с технологией проблемного обучения и предполагает следующие формы активности:

- самостоятельная проработка учебно-проблемных задач, выполняемая с привлечением основной и дополнительной литературы;
- поиск научно-технической информации в открытых источниках с целью анализа и



выявления ее ключевых особенностей.

Основные аспекты применяемой технологии проблемного обучения:

- постановка проблемных задач отвечает целям освоения дисциплины «Физическая кинетика» и формирует необходимые компетенции;
- решаемые проблемные задачи стимулируют познавательную деятельность и научно-исследовательскую активность аспирантов.

## **6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ**

### **6.1. Текущий контроль**

Текущий контроль успеваемости, т.е. проверка усвоения учебного материала, регулярно осуществляется на протяжении семестра. Текущий контроль знаний аспирантов организован как выступления на семинарах.

### **6.2. Промежуточная аттестация**

Промежуточная аттестация завершает изучение дисциплины «Физическая кинетика». Форма аттестации – зачет в письменной или устной форме.

#### **Контрольные вопросы для промежуточной аттестации**

1. Функции распределения.
2. Одночастичные состояния и функции распределения.
3. Равновесные одночастичные функции распределения.
4. Теорема Лиувилля.
5. Иерархия функций распределения и цепочка уравнений Боголюбова.
6. Уравнение Больцмана.
7. Кинематика парных упругих столкновений.
8. Интеграл парных упругих столкновений.
9. Свойства интеграла столкновений.
10. Сечения столкновений нейтральных частиц.
11. Сечения столкновений заряженных частиц в плазме.
12. Сумматорные инварианты и их свойства.
13. Скорость изменения энтропии разреженного газа. H-теорема Больцмана.
14. Интеграл столкновений легких частиц с тяжелыми: приближение времени релаксации.
15. Времена релаксации в газе и плазме.
16. Уравнения газодинамики.
17. Бездиссипативная газодинамика.
18. Диссипативная газодинамика.

19. Линеаризованное уравнение Больцмана для простого газа.
20. Теплопроводность. Скорость производства энтропии при переносе тепла.
21. Вариационный принцип (для теплопроводности).
22. Полиномы Лагерра (Сонина).
23. Решение уравнения теплопроводности путем разложения по полиномам Лагерра.
24. Теплопроводность простого газа в приближении одного полинома Лагерра.
25. Вязкость простого разреженного газа. Вязкие натяжения и коэффициенты вязкости. Скорость роста энтропии за счет столкновений.
26. Вычисление вязкости путем разложения по полиномам Лагерра. Сдвиговая вязкость и диффузия импульса.
27. Диссипативная газодинамика многокомпонентных смесей. Феноменологические соотношения переноса в многокомпонентном газе.
28. Основы кинетики газовых смесей. Схема расчета кинетических коэффициентов путем разложения по полиномам Лагерра.
29. Диффузия и термодиффузия легкого газа в тяжелом.
30. Кинетика электронов в разреженной плазме.
31. Магнитная гидродинамика.
32. Кинетика газа с учетом внутренних степеней свободы молекул и химических реакций.
33. Флуктуации термодинамических величин в равновесной системе.
34. Затухание корреляций и релаксация термодинамической величины к равновесию.
35. Затухание корреляций и релаксация нескольких термодинамических величин.
36. Обобщенные кинетические коэффициенты. Принцип Онзагера.
37. Принцип Онзагера для диффузии и термодиффузии в бинарной смеси.
38. Релаксация и флуктуации: формулы Кубо. Молекулярная динамика.
39. Вырожденный электронный газ. Уровень Ферми, поверхность Ферми, закон дисперсии.
40. Кинетическое уравнение для вырожденных электронов.
41. Соотношения переноса для вырожденных электронов. Электро- и теплопроводность, удельная термоэдс.
42. Скорость производства энтропии за счет столкновений вырожденных электронов.
43. Общие свойства кинетических коэффициентов вырожденных электронов. Электропроводность – формула Друде. Теплопроводность – обобщенный закон Видемана-Франца. Удельная термоэдс – связь с электропроводностью.
44. Физика электронного переноса в процессах электро- и теплопроводности.

45. Приближение времени релаксации для вырожденных электронов. Прямое кулоновское рассеяние. Рассеяние на заряженных примесях.
46. Электрон-электронные столкновения вырожденных электронов. Вариационный принцип и скорость производства энтропии.
47. Электрон-электронные столкновения вырожденных электронов. Интегрирование по энергиям и импульсам.
48. Рассеяние электронов на фононах. Интеграл столкновений. Случаи низких и высоких температур. Общая температурная зависимость кинетических коэффициентов в металлах.
49. Кинетика вырожденного электронного газа в магнитном поле.

## **7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **7.1. Основная литература**

1. Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. Физическая кинетика. Москва, Наука, 1979.
2. Дж. Гиршфельдер, Ч. Кертисс, Р. Берд. Кинетическая теория газов и жидкостей. Москва, ИЛ, 1961.
3. Дж. Займан. Электроны и фононы. Москва, ИЛ, 1962.

### **7.2. Дополнительная литература**

1. В.П. Силин. Введение в кинетическую теорию газов. Москва, Издательство ФИАН, 1998.
2. А.Ф. Александров, Л.С. Богданкевич, А.А. Рухадзе. Основы электродинамики плазмы. Москва, Высшая школа, 1978.
3. Б.М. Аскеров. Электронные явления переноса в полупроводниках. Наука, Москва, 1985.

### **7.3. Интернет-ресурсы**

Отечественные журналы:

1. Астрономический вестник ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=7665](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7665);
2. Астрономический журнал ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=7666](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7666);
3. Письма в астрономический журнал ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=79414](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=79414);
4. Геомагнетизм и аэрономия ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=7765](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7765);
5. Исследование Земли из космоса ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=7842](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7842);
6. Космические исследования ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=7859](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7859);
7. Вестник МГУ. Часть 3. Физика, астрономия (<http://vmu.phys.msu.ru/toc/list>;
8. Проблемы передачи информации  
([http://www.mathnet.ru/php/journal.phtml?jrnid=ppi&wshow=details&option\\_lang=rus](http://www.mathnet.ru/php/journal.phtml?jrnid=ppi&wshow=details&option_lang=rus);



9. Земля и Вселенная ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=7808](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7808);

**Отечественные журналы в переводе:**

1. Astronomy Reports (<http://link.springer.com/journal/11444>;

2. Astronomy Letters (<http://www.springerlink.com/content/119837/>;

3. Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory

(<http://link.springer.com/journal/11989>;

4. Cosmic Research (<http://link.springer.com/journal/10604>;

5. Earth and Space Science

(<http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/agu/journal/10.1002/%28ISSN%292333-5084/> ;

6. Geomagnetism and Aeronomy (<http://link.springer.com/journal/11478>;

7. Problems of Information Transmission (<http://link.springer.com/journal/11122>,

8. Solar System Research (<http://link.springer.com/journal/11208>;

9. Radiophysics and Quantum Electronics

(<http://www.springer.com/astronomy/journal/11141> ;

**Международные журналы:**

Gravitation and Cosmology (<http://link.springer.com/journal/12267>.

**Иностранные журналы:**

1. Astronomy and Astrophysics (<http://www.aanda.org/>;

2. Astronomy and Astrophysics Review (<http://link.springer.com/journal/159>;

3. Astronomy & Geophysics (<http://astrogeo.oxfordjournals.org/>;

4. Astroparticle Physics (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09276505/23/1>;

5. Astrophysics (<http://link.springer.com/journal/10511>;

6. Astrophysics and Space Science (<http://link.springer.com/journal/10509>;

7. Classical and Quantum Gravity (<http://iopscience.iop.org/0264-9381/>;

8. Computational Astrophysics and Cosmology (<http://link.springer.com/journal/40668>;

9. Experimental Astronomy (<http://link.springer.com/journal/10686>;

10. Journal of Astrophysics and Astronomy (<http://link.springer.com/journal/12036>;

11. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (<http://iopscience.iop.org/1475-7516/>;

12. Microgravity Science and Technology (<http://link.springer.com/journal/12217>;

13. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (<http://mnras.oxfordjournals.org/>;

(<http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1111/%28ISSN%291365-2966>;

14. Monthly Notices Letters of the Royal Astronomical Society

(<http://mnrasl.oxfordjournals.org/>;

15. Nature (<http://www.nature.com/nature/index.html>;

16. Planetary Science (<http://link.springer.com/journal/13535>;

17. Research in Astronomy and Astrophysics (<http://iopscience.iop.org/1674-4527/>;

18. Space Science Reviews (<http://link.springer.com/journal/11214>;
19. Space Weather  
(<http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/agu/journal/10.1002/%28ISSN%291542-7390/>;
20. Solar Physics (<http://link.springer.com/journal/11207>;
21. The Astronomical Journal (<http://iopscience.iop.org/1538-3881>;
22. The Astrophysical Journal (<http://iopscience.iop.org/0004-637X/>;
23. The Astrophysical Journal Letters (<http://iopscience.iop.org/2041-8205/>;
24. The Astrophysical Journal. Supplement series (<http://iopscience.iop.org/0067-0049/>;

## **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Лекционные аудитории (3 аудитории), оборудованы:

- Столы;
- Стулья;
- Доски магнитно – маркерные;
- Экраны для презентаций;
- Мультимедийные проекторы и (или) LCD панели большого размера;
- Персональные компьютеры;
- Экран для презентаций

Программа разработана:  
главный научный сотрудник-заведующий  
сектором теоретической физики,  
д-р физ.-мат. наук, Яковлев Д.Г.