

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АСТРОФИЗИКИ И ЗВЕЗДНОЙ АСТРОНОМИИ

УТВЕРЖДАЮ
Декан физического факультета
МГУ
_____ / Н.Н. Сысоев /
«__» _____ 20__ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины:

РЕНТГЕНОВСКАЯ АСТРОНОМИЯ: ТЕОРИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ

Уровень высшего образования:

Специалитет

Направление подготовки:

03.05.01 Астрономия

Направленность (профиль) ОПОП:

Общая специальность

Квалификация «Специалист»

Форма обучения: Очная форма обучения

Рабочая программа рассмотрена и одобрена
Ученым советом физического факультета МГУ

(протокол №_____, _____)

Москва 20____

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по специальности 03.05.01 Астрономия.

Год (годы) приема на обучение _____

Авторы–составители:

1. Д.ф.-м.н., Сейфина Елена Викторовна, в.н.с. отдела звездной астрофизики ГАИШ МГУ

Заведующий кафедрой

Д.ф.-м.н. профессор Постнов Константин Александрович

Аннотация к рабочей программе дисциплины «Рентгеновская астрономия: теория и наблюдения»

Дисциплина «Рентгеновская астрономия: теория и наблюдения» является вводным курсом в астрофизику высоких энергий. На лекциях студенты знакомятся с процессами формирования тепловых и нетепловых спектров в условиях высокотемпературной и релятивистской плазмы в реальных космических источниках (в горячем газе в скоплениях галактик, вокруг релятивистских объектов – нейтронных звёзд и чёрных дыр в тесных двойных системах, пульсарах, ядрах активных галактик, квазарах и т.д.). В курсе систематически рассматриваются синхротронное излучение, комптоновское рассеяние, многократное комптоновское рассеяние, ускорение и формирование нетепловых спектров релятивистских заряженных частиц. На лекциях студенты знакомятся с основными принципами детектирования рентгеновского космического излучения. Изучаются основы обработки рентгеновских космических данных, в том числе спектральный и временной анализ.

Разделы рабочей программы

1. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
4. Форма обучения.
5. Язык обучения.
6. Содержание дисциплины.
7. Объем дисциплины
8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.
10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
11. Шкала оценивания.
12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Рентгеновская астрономия: теория и наблюдения» реализуется на 4-ом курсе специалитета в 8-ом семестре и является составной частью профессионального блока вариативной части.

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Знакомство с основами атомной физики, теоретической астрофизики, методами спектральных и фотометрических наблюдений звезд, элементами теории звездной эволюции. Эти знания студенты получают в курсах «Галактическая астрономия», «Общая астрофизика», «Практическая астрофизика», «Атомная физика», «Физика и эволюция звезд», «Молекулярная физика», «Термодинамика и статистическая физика».

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
УК-1.Б	<p>З-1 Знать: основные процессы рентгеновского излучения в горячей плазме</p> <p>З-2 Знать: основные современные научные достижения в области рентгеновской астрономии, основные методы критического анализа и оценки современных научных достижений</p> <p>У-1 Уметь: проводить анализ литературных данных по теме рентгеновская астрономия, выявлять основные вопросы и проблемы, используя критически анализ данных</p> <p>У-2 Уметь: находить в архивах рентгеновские наблюдения, анализировать рентгеновские данные, вычислять синтетические спектры, классифицировать спектральные состояния черных дыр и нейтронных звезд по рентгеновским спектрам</p> <p>В-1 Владеть: навыками критического анализа и оценки современных научных достижений, методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике и звездной астрономии</p> <p>В-2 Владеть: математическим аппаратом, применяемым в астрономии для обработки и анализа рентгеновских спектров и кривых блеска</p>
ОПК-1.Б	<p>З-1 Знать: основные математические методы, используемые при анализе рентгеновских данных</p> <p>У-1 Уметь: решать типовые задачи, связанные с явлениями, относящимися к рентгеновской переменности излучения компактных объектов</p> <p>У-2 Уметь: строить математические модели основных явлений и процессов, типичных в рентгеновской астрономии</p> <p>В-1 Владеть: навыками статистического анализа, применяемого для обработки астрономических данных</p>

2. **Форма обучения:** очная.

3. **Язык обучения:** русский.

4. **Содержание дисциплины**

Тема 1. Обзор основных проблем рентгеновской астрономии.

Основные источники космического рентгеновского излучения (нейтронные звезды, черные дыры, белые карлики, Солнце, квазары, микроквазары, активные ядра галактик, приливные разрушения звезд черными дырами). История открытия рентгеновской астрономии. Поглощение рентгеновского излучения земной атмосферой. Свойства космического рентгеновского фонового излучения. Формирование рентгеновского излучения в тесных двойных системах. Основные процессы рентгеновского излучения в горячей плазме.

Тема 2. Обработка рентгеновских данных. Примеры использования программы XSPEC

Основные базы данных рентгеновских орбитальных обсерваторий. Приемы обработки рентгеновских наблюдений. Пакет подпрограмм LHEASOFT. Необходимые дополнительные скрипты. Респонс- и ARF-матрицы. Спектральный анализ. Основные команды и модели XSPEC. Добавление и удаление компонент модели. Комбинированные спектры: аддитивные и мультипликативные модели XSPEC. Добавление и удаление сетов данных. Перебинивание спектров по энергии и перегруппировка спектральных каналов. Применение XSPEC к реальным данным. Подготовка к компьютерному практикуму с отработкой команд XSPEC (во время практических занятий).

Тема 3. Инструменты рентгеновской и гамма астрономии.

Принципы детектирования рентгеновского космического излучения. Зеркала косого падения, пропорциональные счетчики, коллиматоры, кодирующие маски. Примеры космических телескопов, на которых применяются эти системы и их характеристики.

Тема 4. Особенности излучения микроквазаров.

Основные характеристики микроквазаров. Примеры микроквазаров. Наблюдательные свойства микроквазаров. История открытия. “Подвижные” эмиссионные линии в спектре SS433. Орбитальная и прецессионная переменность. Струйные радиовыбросы. Особенности рентгеновских кривых блеска. Выбор XSPEC-моделей для спектрального анализа. Альтернативные модели. Смена спектральных состояний черных дыр. Спектры мощности. Квазипериодические осцилляции. Типы переменности GRS1915+105 по Belloni. Сопоставление переменности микроквазаров в радио и рентгеновском диапазонах.

Тема 5. Наблюдательные проявления кандидатов в черные дыры.

Рентгеновские источники. Наблюдения черных дыр. Сценарии образования черных дыр. Типы черных дыр. Спектральные признаки отличия черных дыр от нейтронных звезд. Сверхкритический режим аккреции. Условие запуска ветра. Вторичный обмен масс в тесных двойных системах. Классификация спектральных состояний черных дыр. Наиболее часто встречающиеся эмиссионные линии в рентгеновских спектрах. Правило Хунда. Формирование рентгеновских линий нейтрального, водородо- и гелиеподобного ионов железа.

Тема 6. Комптонизационные модели.

Обмен энергией между фотонами и электронами. Передача энергии для повторных рассеяний в конечной тепловой среде. Параметр комптонизации y и его физический смысл. Формирование степенного спектра в оптически тонких источниках. Спектры в случае обратного комптоновского рассеяния для малых и больших оптических глубин.

Спектральный индекс. Многократное комптоновское рассеяние. Анализ спектров в Комптонизационных моделях. Насыщение фотонного индекса. Оценка массы черных дыр. Метод скалирования.

Тема 7. Уравнение Компанейца.

Вывод уравнение Компанейца и приложения его решения. Решение диффузионного уравнения по пространству и по энергии. Интерпретация наблюдений рентгеновских источников. Спектральные режимы для многократного рассеяния. Модифицированные чернотельные спектры для $y \gg 1$. Модифицированные чернотельные спектры для $y \ll 1$. Ненасыщенная комптонизация в случае источника излучения мягких фотонов.

Тема 8. Модель переходного слоя.

Перенос углового момента в кепплеровском аккреционном диске за счет сил вязкости. Краевые условия на внутренней и внешней границах диска. Решение уравнения переноса в зависимости от параметра вязкости α или турбулентного числа Рейнольдса γ . Формирование переходного слоя, как результат подстройки кепплеровского и суб-кепплеровского вращения в диске.

Тема 9. Аннигиляционные линии в спектрах черных дыр

Предсказания теории. Условие рождения и аннигиляции пар. Наблюдение космического аннигиляционного излучения в спектрах активных ядер галактик, галактического центра, вспышек на Солнце и космических гамма-всплесков. Поиск красномещенных аннигиляционных линий в спектрах черных дыр звездной массы.

Тема 10. Черные дыры промежуточных масс.

Ультрарякие рентгеновские источники. Методы поиска черных дыр промежуточных масс. Их характеристики и определение их масс различными методами. Фундаментальная плоскость для черных дыр. Сценарии образования таких черных дыр.

Тема 11. Черные дыры в центрах Галактик.

Классификация активных ядер галактик. Метод скалирования в применении к внегалактическим источникам. Наблюдательные проверки. Блазары. Струйные выбросы. Основные наблюдаемые характеристики и феноменологические зависимости. Возможные механизмы активности блазаров. Квазары. Пузыри Ферми.

Тема 12. Приливное разрушение звезд черными дырами

Гамма-рентгеновские вспышки, обусловленные событиями приливного разрушения. Особенности рентгеновской кривой блеска.

Тема 13. Особенности поведения и классификация слабо-замагниченных нейтронных звезд.

Atoll- и Z-источники. Спектральный и временной анализ излучения аккрецирующих нейтронных звезд, входящих в состав двойных систем.

7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах				
		Общая трудоемкость	в том числе			Самостоятельная работа студентов
			ауд. занятий			
		Общая	аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров	
Рентгеновская астрономия: теория и наблюдения	2	72	34	34	0	38

8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «Рентгеновская астрономия: теория и наблюдения» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным и практическим занятиям. Темы, рассматриваемые на лекциях и изучаемые самостоятельно, закрепляются на практических занятиях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы					Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Всего часов	Лекции	Научно-практические занятия	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Обзор основных проблем рентгеновской астрономии	2	2	-			Собеседование, опрос
2	Обработка рентгеновских данных. Примеры использования программы XSPEC	2	2	2			
3	Инструменты рентгеновской и гамма астрономии.	2	2	-			
4	Особенности излучения микроквазаров	4	4	-			
5	Наблюдательные проявления кандидатов в черные дыры	4	2	-		2	
6	Комптонизационные модели	2	2	-			
7	Уравнение Компанейца	2	2	-			
8	Модель переходного слоя	2	2	-			

9	Аннигиляционные линии в спектрах черных дыр	2	2	-			
10	Черные дыры промежуточных масс	2	2	-			
11	Черные дыры в центрах Галактик	2	2	-			
12	Приливное разрушение звезд черными дырами	2	2	-			
13	Особенности поведения и классификация слабо-замагниченных нейтронных звезд	2	2	-			
	Аттестация по итогам занятий	4				4	Устный зачет с последующим собеседованием
ИТОГО:		34	34	2		2	

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Рентгеновская астрономия: теория и наблюдения» осуществляется на лекциях и практических занятиях и заключается в оценке активности и качества участия в опросах и собеседованиях по проблемам, изучаемых в рамках тем лекционных занятий, аргументированности позиции; оценивается широта используемых теоретических знаний.

Аттестация по итогам занятий по дисциплине «Рентгеновская астрономия: теория и наблюдения» проводится в форме зачета. Зачет проводится в устной форме, с последующим собеседованием по программе.

10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

Требования к структуре и содержанию фонда оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и аттестации по итогам занятий по дисциплине «Рентгеновская астрономия: теория и наблюдения», представлен в таблице.

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
Оценочные средства текущего контроля		
Тестирование	Средство контроля, позволяющее получить оценку уровня фактических знаний студента по изученной теме.	Образцы тестов
Оценочные средства промежуточной аттестации		
Устный зачет	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к зачету
Собеседование	Средство, позволяющее получить экспертную оценку знаний, умений и навыков по для оценивания и анализа различных фактов и	Требования к порядку проведения

	явлений в своей профессиональной области.	собеседования
--	---	---------------

11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	Незачет	Зачет		
Знания (виды оценочных средств: устный опрос, тестирующий знание основных законов и соотношений)	Отсутствие знаний	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Сформированные систематические знания
Умения (виды оценочных средств: устный опрос, тестирующий знание принципов получения основных законов и соотношений, практические контрольные задания и т.п.)	Отсутствие умений	В целом успешное, но не систематическое умение	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение (допускает неточности непринципиального характера)	Успешное и систематическое умение
Навыки (владения, опыт деятельности) (Виды оценочных средств: решение новых (не разобранных на лекциях или в литературе) задач, вывод новых соотношений и т.п.)	Отсутствие навыков (владений, опыта)	Наличие отдельных навыков (наличие фрагментарного опыта)	В целом, сформированные навыки (владения), но используемые не в активной форме	Сформированные навыки (владения), применяемые при решении задач

12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Вопросы по пройденному материалу.

1. Какие объекты излучают в рентгеновском диапазоне в нашей Галактике?
2. Что мешает рентгеновским наблюдениям с поверхности Земли?
3. Рабочий диапазон длин волн рентгеновской аппаратуры на примере телескопов, действующих на орбите.
4. Какую толщину должен иметь слой свинца, чтобы имитировать атмосферу Земли в плане поглощения рентгеновского космического излучения?
5. Перечислите принципы и схемы детектирования рентгеновского космического излучения. Преимущества и недостатки зеркал косого падения, коллиматоров и кодирующих масок. Чем внешне отличаются рентгеновские спутники с зеркалами косого падения от систем с коллиматорами?
8. Рентгеновская переменность двойных систем с нейтронными звездами и черными дырами.
9. Примеры микроквазаров (из лекционного курса).
10. Где встречаются "подвижные" эмиссионные линии и что это такое?
11. Механизм запуска ветра в двойных рентгеновских системах на стадии обмена массы?
12. Чему равна Эддингтоновская светимость для объекта $10 M_{\odot}$?
15. Типы черных дыр.
16. Области формирования рентгеновского излучения в ТДС на стадии обмена масс в случае дисковой аккреции.
17. Перечислите несколько основных команд и моделей XSPEC.
18. Приведите примеры типов переменности GRS1915+105 по Belloni.
19. Чем вызваны квазипериодические осцилляции в спектрах мощности двойных рентгеновских систем?
20. Перечислите известные наблюдательные признаки черных дыр.
21. Классификация спектральных состояний черных дыр и нейтронных звезд.
22. Классификация слабозамагниченных нейтронных звезд.
23. Наиболее часто встречающиеся эмиссионные линии в рентгеновских спектрах. Формирование рентгеновских линий нейтрального, водородо- и гелиеподобного ионов железа.
24. Ультраяркие рентгеновские источники и гипотезы их происхождения.
25. Сценарии образования черных дыр промежуточной массы.
26. Основные предположения и принципы метода «скалирования».
27. Диаграммы жесткости.
28. Основные процессы излучения в горячей плазме.
29. С какими объектами в основном связаны Галактические космические лучи?
30. Что такое пузыри Ферми?
31. Приливное разрушение звезд «дремлющими» черными дырами (теоретические сценарии и наблюдения).
32. Классификация активных галактических ядер. Блазары. Струйные выбросы.
33. Условие рождения и аннигиляции пар. Наблюдения космического аннигиционного излучения.
34. Чем обусловлено излучение крабовообразных остатков вспышек сверхновых (с пульсаром в центре)?

13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Вопросы для устного зачета.

1. Примеры микроквазаров (из лекционного курса).
2. Какие объекты излучают в рентгеновском диапазоне в нашей Галактике?
3. Какой высоты должен быть слой свинца, чтобы имитировать атмосферу Земли в плане поглощения рентгеновского космического излучения?
5. Перечислите принципы и схемы детектирования рентгеновского космического излучения. Преимущества и недостатки зеркал косого падения, коллиматоров и кодирующих масок. Чем внешне отличаются рентгеновские спутники с зеркалами косого падения от систем с коллиматорами?
6. Перечислите несколько основных команд и моделей XSPEC.
7. Механизм запуска ветра в двойных рентгеновских системах на стадии обмена массы?
8. Чему равна Эддингтоновская светимость для объекта $10 M_{\odot}$?
9. Чему равен критический поток аккреции для черной дыры массы M ?
10. Образование компактных источников в зависимости от начальной массы объекта.
11. Типы черных дыр.
12. Рентгеновская переменность двойных систем с нейтронными звездами и черными дырами.
13. Где встречаются "подвижные" эмиссионные линии и что это такое?
14. Как отличить аккрецирующую черную дыру от аккрецирующей нейтронной звезды по их рентгеновскому спектру в активном состоянии объекта? Перечислите спектральные признаки черных дыр и нейтронных звезд.
15. Чем обусловлено насыщение фотонного индекса в спектрах черных дыр в максимуме вспышки?
16. Классификация спектральных состояний черных дыр и нейтронных звезд во время вспышек.
17. Классификация слабозамагниченных нейтронных звезд.
18. Как назывался модуль станции «МИР», на котором космонавты проводили астрономические наблюдения?
19. Основные процессы излучения в горячей плазме.
20. Ультраяркие рентгеновские источники и гипотезы их происхождения.
21. Сценарии образования черных дыр промежуточной массы.
22. Чем обусловлено излучение крабоподобных остатков вспышек сверхновых (с пульсаром в центре)?
23. Формулы «скалирования» для определения массы черных дыр.
24. Физический смысл комптонизационного параметра u . Схема вывода уравнения Компанейца.
25. Обратное Комптоновское рассеяние. Основные положения Комптонизационной модели в приложении к анализу рентгеновского излучения двойных систем.
26. Приливное разрушение звезд «дремлющими» черными дырами (теоретические сценарии и наблюдения).
27. Классификация активных галактических ядер. Блазары. Струйные выбросы.
28. Какие Вам известны интернет-ресурсы, предоставляющие рентгеновские наблюдения?

14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

Основная литература.

1. Сейфина Е.В., Титарчук Л.Г. «Спектральные признаки отличия рентгеновских двойных систем с черными дырами и нейтронными звездами (или как отличить нейтронную звезду от черной дыры в аккрецирующих рентгеновских двойных системах?)» www.astronet.ru, № 1308165, www.astronet.ru/db/msg/1308165 (2014)
2. М. Лонгейр «Астрофизика высоких энергий», М.: Мир, 1985
3. J. Rybicki, A. Lightman "Radiative Processes in Astrophysics", Wiley and sons, 1979
4. В.В. Соболев «Курс теоретической астрофизики» (Изд. 3е), М.: Наука, 1985
5. А.В. Засов, К.А. Постнов «Общая астрофизика» (2е изд), Фрязино: Век-2, 2011

Дополнительная литература.

1. А.М. Черепашук «Чёрные дыры в двойных звёздных системах и ядрах галактик» УФН **184** 387–407 (2014)
2. Я.Б. Зельдович «Взаимодействие свободных электронов с электромагнитным излучением» УФН **115** 161–197 (1975)
3. М.С. Лонгейр, Р.А. Сюняев «Электромагнитное излучение во Вселенной» УФН **105** 41–96 (1971)
5. Begelman M.C., Blandford R., Rees M.J. Theory of extragalactic radio sources. Rev. Mod. Phys. 56, 255 (1984).
6. Titarchuk, Seifina, Chekhtman, Ocampo «Spectral Index-Mass Accretion Rate Correlation and Evaluation of Black Hole Masses in AGNs 3C 454.3 and M87», Astron. Astrophys., 633, с. 73-98 (2020)
7. Titarchuk., Seifina «BL Lacertae: X-ray spectral evolution and a black-hole mass estimate», Astron. Astrophys., 602, с. 113-129 (2017)
8. Seifina, Titarchuk, Virgili «Swift J164449.3+573451 and Swift J2058.4+0516: Black hole mass estimates for tidal disruption event sources», Astron. Astrophys., 607, с. 38-52 (2017)
9. Titarchuk L., Seifina E. «Scaling of the photon index vs. mass accretion rate correlation and estimate of black hole mass in M101 ULX-1», Astron. Astrophys., 585, 94 (2016)
10. Seifina E., Titarchuk L., Shrader C., Shaposhnikov N. «BeppoSAX and RXTE spectral study of the low-mass X-ray binary 4U 1705-44: spectral hardening during the banana branch», Astrophys. J., 808, 142 (2015)
11. Seifina E., Titarchuk L., Shaposhnikov N. "Black hole mass determination in the X-ray binary 4U 1630–47: scaling of spectral and variability characteristics" Astrophys. J., 789, 57 (2014)
12. Titarchuk L., Seifina E., Shrader C. "X-ray spectral and timing behavior of Scorpius X-1. Spectral hardening during the flaring branch" Astrophys. J., 789, 98 (2014)
13. Seifina E., Titarchuk L. "On the constancy of the photon index of X-ray spectra of 4U1728-34 through all spectral states" Astrophys. J., 738, 128-148 (2011)
14. Seifina E., Titarchuk L. "On the nature of the compact object in SS433: observational evidence of X-ray photon index saturation" Astrophys. J., 722, 586-604 (2010)

Интернет-ресурсы.

1. www.genphys.phys.msu.ru
2. Arxiv.org
3. <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>
4. Библиографическая система NASA ADS

Материально-техническое обеспечение

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

Курс может быть прочитан в поточной аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски.