

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(САО РАН)

ПРИНЯТО

решением Ученого совета

САО РАН № 445

от «06» мая 2026 г.

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора САО РАН,

Г.Т. Валявин /
«28» августа 2026 г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по дисциплине «ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ»

Научная специальность 1.3.1. ФИЗИКА КОСМОСА, АСТРОНОМИЯ

Объем занятий: Итого 72 ч.

Из них:

Лекций 22 ч.

Лабораторных работ ч.

Практических занятий 16 ч.

Самостоятельной работы 34 ч.

Рабочая программа составлена в соответствии с федеральными государственными требованиями, утвержденными приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 20 октября 2021 года № 951, утвержденной Программой кандидатского экзамена по специальной дисциплине, соответствующей научной специальности «1.3.1. Физика космоса, астрономия», принятой на заседании Ученого совета САО РАН.

Автор: кандидат физ.-мат. наук, заместитель директора по научной работе А.И. Колбин.

1. Общие положения

Исследования двойных систем являются очень многогранными. Остаются актуальными наблюдения широких пар, позволяющие находить фундаментальные соотношения между параметрами звезд, и которые имеют важное значение для понимания физики и эволюции как одиночных звезд, так и двойных систем. Успехи астрономии высоких энергий, а также недавнее открытие гравитационных волн, сделали проблему тесных двойных систем одной из центральных проблем современной астрофизики.

Целью освоения дисциплины «Двойные звезды» является формирование у аспирантов фундаментальных знаний, умений и навыков, направленных на сдачу кандидатских экзаменов.

Основной задачей курса «Двойные звезды» является формирование представлений о современных методах изучения двойных звездных систем. В курсе рассматриваются методы исследований как широких пар, где влияние компонент друг на друга ограничивается движением вокруг общего центра масс, так и взаимодействующих двойных систем, в которых происходит обмен массой. Особое внимание уделяется методам синтеза кривых блеска и спектров двойных систем, которые позволяют находить фундаментальные параметры компонент, орбитальные параметры и характеристики аккреции.

Дисциплина «Двойные звезды» – 2.1.5. относится к элективным дисциплинам образовательного компонента.

Предшествующими курсами, на которых непосредственно базируется дисциплина «Двойные звезды», являются базовые дисциплины бакалавриата, магистратуры и специалитета и элективная дисциплина 2.1.2. «Иностранный язык».

Дисциплина «Двойные звезды» логически, содержательно и методически связана с последующими компонентами программы аспирантуры – 1.1. «Научная деятельность, направленная на подготовку диссертации на соискание научной степени кандидата наук к защите», 1.2. «Подготовка публикаций и (или) заявок на государственную регистрацию результатов интеллектуальной деятельности, предусмотренных абзацами первым и третьим пункта 12¹ Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. N 842», 2.1.3. «Физика космоса, астрономия», факультативными дисциплинами 2.1.4. (Ф) «Интерферометрические методы в спектроскопии звезд», 2.1.7. (Ф) «Исследования звездного магнетизма», 2.1.8. (Ф) «История астрономической спектроскопии», 2.1.9. (Ф) «Лабораторная и астрономическая спектроскопия с высоким и средним разрешением», 2.2. «Практика», 3. «Итоговая аттестация».

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесённые с планируемыми результатами освоения программы

№ п/п	Результаты обучения по дисциплине	Результаты освоения программы
Аспирант должен знать:		
1.	Методы определения параметров визуальных, спектральных и затменных двойных систем.	РД-1, РД-2
2.	Способы повышения углового разрешения в наземных наблюдениях и точности доплеровских измерений.	РД-1, РД-2, РД-3, РД-5
3.	Основы моделирования аккреционных дисков и аккреционных колонн.	РД-3, РД-4, РД-5
4.	Методы синтеза кривых блеска и спектров разделенных, полуразделенных и контактных двойных систем.	РД-1, РД-4
5.	Элементы теории эволюции двойных систем.	РД-2
Аспирант должен уметь:		
6.	Проводить сбор фотометрических данных ультрафиолетовых, оптических и инфракрасных обзоров (GALEX, ZTF, PTF, SDSS, Pan-STARRS, GAIA, WISE).	РД-1, РД-2, РД-3, РД-4
7.	Пользоваться методами линейной и нелинейной регрессии для анализа данных астрономических наблюдений.	РД-3
8.	Проводить периодограммный анализ и анализ О-С диаграмм, реализовывать простые алгоритмы синтеза кривых блеска и спектров двойных систем.	РД-3, РД-4
Аспирант должен владеть:		
9.	Методами визуализации данных средствами библиотеки matplotlib.	РД-3, РД-5
10.	Математическими методами программных библиотек numpy, scipy и astropy.	РД-1, РД-3
11.	Методами анализа рентгеновских спектров, реализованных в программе Xspec пакета HEASOFT. Методами моделирования кривых блеска и лучевых скоростей двойных систем, реализованных в библиотеке PHOEBE.	РД-1, РД-3

3. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 1 1/3 недели (72 часа).

№ п/ п	Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу аспирантов и трудоемкость (в часах)			Формы контроля успеваемости
		Лек.	Практ. зан-я	Сам. раб.	
1.	Элементы орбиты визуальной двойной. Наблюдения двойных двойных. Определение масс. Метод динамического параллакса. Вычисление визуальной орбиты: уравнения эллиптического движения, преобразование координат. Методы улучшения углового разрешения: метод удачных экспозиций, адаптивная оптика, спекл-интерферометрия.	2		2	
2.	Элементы орбиты спектральной двойной, моделирование кривой лучевых скоростей. Функция масс и ограничение массы невидимой компоненты. Эффект Росситера-Маклафлена, определение $V \sin(i)$ и ориентации оси вращения звезды. Комбинация методов моделирования визуальной орбиты и лучевых скоростей.	2		2	
3.	Измерения лучевых скоростей: кросс-корреляция, метод уширяющей функции, LSD (Least Square Deconvolution). Астрофизические ограничения: грануляция, пульсации, магнитная активность. Методы прецизионных измерений: I ₂ -ячейка, параллельный спектр калибровочной лампы.	2		2	
4.	Затменные двойные. Синтез кривой блеска: алгоритмы вычисления кривой блеска с учетом и без учета потемнения диска к краю. Алгоритм вычисления кривой блеска двойной с эксцентрической орбитой. Наблюдательные особенности двойных с эксцентрической орбитой.	2		2	
5.	Вращение линии апсид: приливная деформация компонент, третье тело, эффекты ОТО. Определение скорости вращения линии апсид, диаграммы О-С. Определение внутренней структуры	2		2	

№ п/ п	Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу аспирантов и трудоемкость (в часах)			Формы контроля успеваемости
	компонент двойной системы. Определение массы третьего тела.				
6.	Приливная циркуляризация орбит и синхронизация вращения. Изменение орбитального периода в системах с изотропной потерей массы и в системах с консервативным обменом масс. Определение векового изменения периода на основе диаграмм О-С.	2		2	
7.	Двойные системы с эффектами взаимной близости. Определение фигур звезд в составе двойных систем. Поверхности нулевой скорости и интеграл Якоби. Гравитационное потемнение. Эффекты отражения, расчет облучаемых атмосфер. Эффекты отражения в рентгеновских двойных. Синтез кривых блеска и спектров. Учет магнитной активности компонент.	2		2	
8.	Обмен массами в полуразделенных двойных системах. Траектория аккреционной струи. Условие формирования аккреционного диска и радиус циркуляризации. Эволюционные проявления аккреции: парадокс алголей, голубые странники.	2		2	
9.	Аккреционные диски. Пограничный слой. Приливной радиус аккреционного диска. Гидродинамика тонких аккреционных дисков, α -диски Шакуры-Сюняева. Синтез спектра аккреционного диска. Прямая и ретроградная прецессия аккреционного диска.	2		2	
10.	Определение параметров затменных катаклизмических переменных и LMXB. Допплеровская томография и затменное картирование. Определение лучевых скоростей аккретора методом Шафтера.	2		2	
11.	Аккреция на замагниченную звезду. Аккреционная колонна. Гидродинамика аккреционных колонн. Вычисление структуры аккреционной колонны и синтез ее спектра. Квазипериодические осцилляции.	2		2	

№ п/ п	Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу аспирантов и трудоемкость (в часах)			Формы контроля успеваемости
12.	Практическое занятие: моделирование кривой блеска и кривой лучевых скоростей двойной системы.		8	4	текущий контроль
13.	Практическое занятие: периодограммный анализ и анализ диаграмм О-С различных типов двойных систем.		4	4	
14.	Практическое занятие: моделирование рентгеновского спектра аккрецирующей двойной.		4	4	текущий контроль итоговый зачет
Итого:		22 ч	16 ч	34 ч	72 ч

4. Наименование и содержание практических занятий

№ п/п	Наименование работы	Кол- во часов	Форма проведения
1.	Практическое занятие: моделирование кривой блеска и кривой лучевых скоростей двойной системы.	8	разноуровневые индивидуальные задания
2.	Практическое занятие: периодограммный анализ и анализ диаграмм О-С различных типов двойных систем.	4	разноуровневые индивидуальные задания
3.	Практическое занятие: моделирование рентгеновского спектра аккрецирующей двойной.	4	разноуровневые индивидуальные задания
Итого:		16 ч	

5. Текущий контроль успеваемости и промежуточная аттестация

5.1. Форма проведения текущего контроля успеваемости

Текущий контроль осуществляется по результатам работы на практических занятиях. Промежуточный контроль – быстрый опрос на лекциях.

Текущий контроль работы аспирантов проводится преподавателем, ведущим занятия по дисциплине.

Итоговый зачет проводится в рамках промежуточной аттестации.

Перед итоговым зачетом по дисциплине аспиранту необходимо полностью выполнить практические работы по дисциплине. При наличии задолженностей по практическим работам аспирант к итоговому зачету не допускается.

5.2. Форма проведения промежуточной аттестации

Промежуточная аттестация проводится в форме итогового зачета по дисциплине. Итоговый зачет по дисциплине предусмотрен в устной форме.

Оценивание знаний обучающегося происходит по результатам устного ответа на два вопроса из перечня. На подготовку к ответу отводится 30 минут. При подготовке к ответу аспиранту предоставляется право пользования программой дисциплины.

Итоговый контроль работы аспирантов проводится преподавателем, ведущим занятия по дисциплине.

При сдаче итогового зачета по дисциплине отметка «зачет» выставляется, если аспирант демонстрирует знание основного материала, излагает его, применяет теоретические положения при решении практических задач.

Отметка «незачет» выставляется в случае, если аспирант не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки в изложении основного материала, не может увязывать теорию с практикой.

5.3. Вопросы к зачету

1. Элементы орбиты визуальной двойной. Наблюдения двойных двойных. Определение масс. Метод динамического параллакса. Вычисление визуальной орбиты: уравнения эллиптического движения, преобразование координат. Методы улучшения углового разрешения: метод удачных экспозиций, адаптивная оптика, спекл-интерферометрия.
2. Элементы орбиты спектральной двойной, моделирование кривой лучевых скоростей. Функция масс и ограничение массы невидимой компоненты. Эффект Росситера--Маклафлена, определение $V \sin(i)$ и ориентации оси вращения звезды. Комбинация методов моделирования визуальной орбиты и лучевых скоростей.
3. Измерения лучевых скоростей: кросс-корреляция, метод уширяющей функции, LSD (Least Square Deconvolution). Астрофизические ограничения: грануляция, пульсации, магнитная активность. Методы прецизионных измерений: I2-ячейка, параллельный спектр калибровочной лампы.
4. Затменные двойные. Синтез кривой блеска: алгоритмы вычисления кривой блеска с учетом и без учета потемнения диска к краю. Алгоритм вычисления кривой блеска двойной с эксцентрической орбитой. Наблюдательные особенности двойных с эксцентрической орбитой.
5. Вращение линии апсид: приливная деформация компонент, третье тело, эффекты ОТО. Определение скорости вращения линии апсид, диаграммы О-С. Определение внутренней структуры компонент двойной системы. Определение массы третьего тела.
6. Приливная циркуляризация орбит и синхронизация вращения. Изменение орбитального периода в системах с изотропной потерей массы и в системах с консервативным обменом масс. Определение векового изменения периода на основе диаграмм О-С.
7. Двойные системы с эффектами взаимной близости. Определение фигур звезд в составе двойных систем. Поверхности нулевой скорости и интеграл Якоби. Гравитационное потемнение. Эффекты отражения, расчет облучаемых атмосфер. Эффекты отражения в рентгеновских двойных. Синтез кривых блеска и спектров. Учет магнитной активности компонент.
8. Обмен массами в полуразделенных двойных системах. Траектория аккреционной струи. Условие формирования аккреционного диска и радиус циркуляризации. Эволюционные проявления аккреции: парадокс алголей, голубые странники.
9. Аккреционные диски. Пограничный слой. Приливной радиус аккреционного диска. Гидродинамика тонких аккреционных дисков, α -диски Шакуры-Сюняева. Синтез спектра аккреционного диска. Прямая и ретроградная прецессия аккреционного диска.
10. Определение параметров затменных катаклизмических переменных и LMXB. Доплеровская томография и затненное картирование. Определение лучевых скоростей аккретора методом Шафтера.
11. Аккреция на замагниченную звезду. Аккреционная колонна. Гидродинамика аккреционных колонн. Вычисление структуры аккреционной колонны и синтез ее спектра. Квазипериодические осцилляции.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

6.1. Перечень основной литературы, необходимой для освоения дисциплины

1. А.М. Черепашук. Тесные двойные звезды. Часть I. – М.: Физматлит, 2013.
2. А.М. Черепашук. Тесные двойные звезды. Часть II. – М.: Физматлит, 2013.
3. В.П. Цесевич (ред). Затменные переменные звезды. – М.: Наука, 1971.
4. Д.В. Бисикало, А.Г. Жилкин, А.А. Боярчук. Газодинамика тесных двойных звезд. – М.: Физматлит, 2016.
5. Дж. Е. Прингл, Р.А. Уэйд (ред.). Взаимодействующие двойные звезды. – М.: Физматлит, 1993.
6. B. Warner. Cataclysmic Variable Stars. – Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1995.
7. J. Frank, A. King, D. Raine. Accretion Power in Astrophysics: Third Edition. – Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2002.
8. A. Prsa. Modeling and Analysis of Eclipsing Binary Stars. The Theory and design principles of PHOEBE. – IOP Publishing, Bristol, UK, 2018.
9. А.А. Токовинин, П.В. Щеглов. Проблема достижения высокого разрешения в наземной оптической астрономии. УФН, 129, 645 (1979).
10. J. Pringle, A. King. Astrophysical flows. – Cambridge Univ. Press, 2007.
11. P. Eggleton. Evolutionary processes in binary and multiple stars. – Cambridge Univ. Press, 2006.
12. S. Chaty. Accreting Binaries. Nature, formation, and evolution. – IOP Publishing, Bristol, UK, 2022.

6.2. Перечень дополнительной литературы, рекомендуемой для освоения дисциплины

1. П. Куто. Наблюдения визуально-двойных звезд. – М.: Мир, 1981.
2. А.В. Гончарский, А.М. Черепашук, А.Г. Ягола. Численные методы решения обратных задач астрофизики. – М.: Наука, 1978.
3. В.М. Липунов. В мире двойных звезд. Изд. 2-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009.
4. А.М. Фридман, Д.В. Бисикало. Природа аккреционных дисков тесных двойных звезд: неустойчивость сверхотражения и развитая турбулентность. УФН, 178, 577 (2008).
5. C. Knigge, I. Baraffe, J. Patterson. The Evolution of Cataclysmic Variables as Revealed by Their Donor Stars. ApJS, 194, 28 (2011).
6. M. Cropper. The Polars. SSRv, 54, 195 (1990).

6.3. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

- Сеть Астронет: <http://www.astronet.ru/db/msg/1169494/index.html#Contents>
- Астрофизическая информационная система ADS - <https://ui.adsabs.harvard.edu/>
- База данных объектов за пределами Солнечной с-мы SIMBAD <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
- Звёздный каталог VIZIER - <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>
- Цифровой обзор неба DSS - <http://archive.eso.org/dss/dss>
- Слоановский цифровой небесный обзор SDSS: <http://www.sdss.org/>
- Инфракрасный научный архив: <https://irsa.ipac.caltech.edu/frontpage/>

7. Перечень информационных технологий, включая перечень программного

обеспечения и информационных справочных систем, профессиональных баз данных

Математические программные python-библиотеки numpy, scipy, matplotlib, pandas. Специализированные астрономические python-библиотеки astropy, phoebe. Пакет обработки и анализа рентгеновских данных HEASOFT.

8. Материально-техническое обеспечение

- экран;
- мультимедийный проектор;
- компьютер;
- выход в Интернет и интранет CAO РАН в лабораторных корпусах;
- сервер общего доступа для обработки и хранения данных;
- текстовые и электронные ресурсы Научной библиотеки CAO РАН;
- оборудование научно-исследовательских лабораторий CAO РАН;
- маркерная доска.

9. Особенности освоения дисциплины лицами с ограниченными возможностями здоровья

Освоение дисциплины лицами с ограниченными возможностями здоровья осуществляется на основе адаптированной рабочей программы с использованием специальных методов обучения и дидактических материалов, составленных с учетом особенностей психофизического развития, индивидуальных возможностей и состояния здоровья таких аспирантов.

Адаптированная рабочая программа входит в структуру адаптированной программы аспирантуры, которая разрабатывается под потребности конкретного обучающегося по его личному заявлению или решению комиссии по определению вида инклюзии и условий обучения сразу после зачисления такого аспиранта на 1 курс.

Порядок разработки адаптированной рабочей программы определяется локальным нормативным актом.