

## **1. Сферическая астрономия**

### **2. Лектор:**

2.1. Д.ф.-м.н., профессор Жаров Владимир Евгеньевич  
кафедра небесной механики, астрометрии и гравиметрии физического  
факультета МГУ, [zharov@sai.msu.ru](mailto:zharov@sai.msu.ru), (495) 939-3764

### **3. Аннотация дисциплины.**

Курс является одним из базовых общеобразовательных курсов астрономической специальности. В нем формулируется главная задача сферической астрономии как одного из разделов астрометрии - определение положения наблюдателя в пространстве и во времени, а также изучаются вопросы, связанные с взаимным расположением различных объектов на небесной сфере.

Курс делится на шесть частей. Первая часть курса посвящена определению систем координат на небесной сфере и преобразованию координат вектора из одной системы в другую.

Во второй части рассматриваются различные шкалы времени, используемые в современной астрометрии.

Третья часть курса посвящена определению топоцентрической, геоцентрической, гелиоцентрической и барицентрической систем координат.

Четвертая часть курса посвящена вопросам исправления наблюдаемых координат и приведению их к барицентрической системе.

Основы теории прецессии и нутации даются в пятой части курса.

В шестой части курса рассматриваются основы метода РСДБ, дается характеристика небесной и земной систем координат, которые задаются координатами радиоисточников и радиотелескопов, соответственно.

### **4. Цели освоения дисциплины.**

В результате освоения дисциплины студент приобретает следующие компетенции: способность к самостоятельному обучению и разработке новых методов исследования, владение навыками использования программных средств и работы в компьютерных сетях, знание базовых астрономических и физико-математических теорий и применение их в научных исследованиях, самостоятельное приобретение с помощью информационных и наблюдательных технологий и использование в практической деятельности новых знаний и умений, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности владение навыками самостоятельной работы, самостоятельная оценка результатов своей деятельности, самостоятельное или в составе группы ведение научного поиска.

### **5. Задачи дисциплины**

Курс является основой всех астрономических курсов, поскольку в нем идет речь об основополагающих понятиях: системах координат, шкалах времени, о преобразовании координат и времени, об эффектах, искажающих положение светил на небесной сфере, и учете этих эффектов при обработке наблюдений. Курс, поэтому, читается первым из обязательных на астрономическом отделении.

### **6. Компетенции.**

**Компетенции необходимые для освоения дисциплины:**

С-ОНК-1, С-ОНК-4, С-ОНК-5, С-ОНК-6

**Компетенции формируемые в результате освоения дисциплины:**

С-СК-3, С-ИК-3, С-ПК-1, С-ПК-2, С-ПК-4

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

В результате освоения дисциплины студент должен **знать** базовые астрономические и физико-математические теории и применять их в научных исследованиях, знать основные понятия и математический аппарат, используемый в задачах сферической астрономии.

**уметь** работать в коллективе исследователей, в т.ч. и над междисциплинарными проектами, уметь формировать цели работы, принимать решения;

**владеть** навыками самостоятельной работы;

**иметь опыт деятельности** в профессиональной сфере

### **8. Содержание и структура дисциплины.**

Вид работы	семестр	Всего
	2	
Общая трудоёмкость, акад. часов	51	51
Аудиторная работа:		
Лекции, акад. часов	34	34
Семинары, акад. часов	17	17
Лаб. работы, акад. часов	0	0
Самостоятельная работа, акад. часов	21	21
Вид итогового контроля	Экз.	

N ра з- де ла	Наименование раздела  Разделы могут объединять несколько лекций	Трудоёмкость (академических часов) и содержание занятий Распределение общей трудоёмкости по семестрам указано в рабочих планах (приложение 7)			Форма текущего контроля	
		Аудиторная работа				Самостоятельная работа Содержание самостоятельной работы должно быть обеспечено, например, пособиями, интернет-ресурсами, домашними заданиями и т.п.
		Лекции	Семинары	Лабораторные работы		
1	раздел 1  <b>Введение. Основы сферической тригонометрии</b>	2 часа. Предмет сферической астрономии и межпредметные связи курса. Краткий исторический обзор развития сферической астрономии как раздела астрометрии. Структура курса. Основные задачи, решаемые сферической астрономией: определение сферических систем координат, определение шкал времени и единиц времени, преобразование между системами координат и между шкалами времени, учет эффектов, искажающих положение небесных объектов. Рост точности наблюдений и точность редуцированных вычислений.	Семинар 1. 2 часа. <i>Тема: Основы линейной алгебры и сферической тригонометрии.</i>  Задачи на математический аппарат линейной алгебры (скалярное и векторное произведение, ортогональные матрицы).	нет	2 часа. <i>Работа с лекционным материалом: Сферическая тригонометрия</i>	Он, Об

		<p>2 часа.</p> <p>Основные понятия: небесная сфера, основные круги и точки на небесной сфере, двугранный угол, сферический треугольник. Основные свойства сферического треугольника. Вывод основных формул сферической тригонометрии: формул синусов, косинусов и подобия. Сферические и прямоугольные координаты точки на небесной сфере.</p>				
2	<p>Раздел 2.</p> <p><b>Определение координатных систем на небе и Земле.</b></p> <p><b>Позиционная астрономия.</b></p>	<p>2 часа.</p> <p>Горизонтальная, экваториальная, эклиптическая и галактическая системы координат. Определение основных кругов и точек. Выделенные направления: отвесная линия и ось вращения Земли. Определение координат: азимута и высоты источника над горизонтом, прямого восхождения и склонения, эклиптической долготы и широты, галактической долготы и широты. Определение начала отсчета прямых восхождений. Определение эклиптики. Преобразование координат из одной системы в другую. Углы Эйлера. Матрицы преобразования координат.</p>	<p><i>Семинар 2.</i></p> <p>2 часа.</p> <p>Тема: Сферическая тригонометрия</p> <p>Задачи: связь углов и сторон в сферических треугольниках, формулы синусов и косинусов.</p>	нет	<p>3 часа.</p> <p><i>Работа с лекционным материалом:</i></p> <p>Основные формулы сферической тригонометрии, решение задач по данной теме.</p>	<p>ДЗ, Оп, Об</p>

		<p>2 часа. Топоцентрическая, геоцентрическая, гелиоцентрическая и барицентрическая системы координат. Понятие о небесной (ICRS) и земной (ITRS) системах координат. Изменение координат наземных пунктов. Модели тектонического движения плит. Основные параметры фигуры Земли. Геоид и референц-эллипсоид. Определение геодезических координат. Связь геодезических координат с геоцентрическими. Астрономические координаты и локальное отклонение отвесной линии.</p>				
		<p>2 часа. Определение барицентрической системы. Основные сведения о эфемеридах DE200/LE200, DE403/LE403. Структура Астрономического Ежегодника. Суточное вращение небесной сферы. Восход и заход звезд.</p>	<p>Семинар3.. 2 часа. Тема: Преобразование координат вектора при переходе из одной системы координат в другую. Задачи: вычисление матриц поворота, углов Эйлера.</p>	нет	<p>3 часа. Работа с лекционным материалом: Определение систем координат, решение задач на вычисление матриц поворота.</p>	
3	<p>Раздел 3. <b>Шкалы времени. Неравномерность вращения Земли.</b></p>	<p>2 часа. Кульминация звезды. Определение момента прохождения источника через меридиан. Солнечное истинное и среднее время. Уравнение времени. Всемирное время. Системы Всемирного времени: UT0, UT1, UT2, Всемирное координированное UTC. Атомное время. Принцип формирования шкалы атомного времени. Стабильность шкалы атомного времени. Атомная секунда (секунда СИ). Местное, поясное и декретное время. Часовые пояса.</p>				<p>ДЗ, Оп, Об</p>

		<p>2 часа. Звездное время: истинное и среднее. Связь Всемирного и звездного времени. Вычисление истинного или среднего звездного времени по местному времени и обратно. Летосчисление. Юлианская дата. Юлианский год. Тропический и звездный год.</p>	<p><i>Семинар 4.</i> 2 часа. Тема: Звездное время Задачи на вычисление местного времени, звёздного времени, вычисление моментов кульминации, восхода и захода светил.</p>		<p>3 часа. <i>Работа с лекционным материалом</i> Связь Всемирного и звездного времени, <i>Задачи на вычисление звёздного времени.</i></p>	<p>ДЗ, Оп, Об, КР.</p>
		<p>2 часа. Динамические шкалы времени. Эфемеридное время. Эфемеридная секунда. Бариецентрическое и земное динамическое время. Преобразование от шкалы Всемирного времени к бариецентрическому динамическому времени. Пульсарная шкала времени. Стабильность пульсарной шкалы времени.</p>				
		<p>2 часа. Причины изменения угловой скорости вращения Земли. Вековые, декадные, периодические изменения продолжительности суток. Движение полюса. Редукция за движение полюса.</p>				
4	<p>Раздел 4. <b>Редукция астрометрических наблюдений</b> <b>Эффекты, искажающие положение источников на небесной сфере.</b></p>	<p>2 часа. Рефракция. Вывод уравнения рефракции для плоскопараллельной и сферически-симметричной атмосферы. Таблицы рефракции. Влияние рефракции на прямое восхождение и склонение звезды. Рефракция при наблюдениях в радиодиапазоне. Задержка радиосигнала в ионосфере и тропосфере. Методы и точность учета задержки радиосигнала.</p>	<p><i>Семинар 5.</i> 2 часа. Тема: Рефракция в атмосфере Земли. Задачи на учет рефракции.</p>		<p>3 часа. <i>Работа с лекционным материалом по теме редукция астрометрических наблюдений. Решение задач на вычисление рефракции.</i></p>	<p>ДЗ, Оп, Об</p>

		<p><i>2 часа.</i> Аберрация. Историческая справка. Причины аберрационного смещения звезд. Суточная, годовая и вековая аберрация. Изменение координат звезды из-за аберрации. Приближенные и точные формулы учета годичной аберрации. Планетная аберрация.</p>				
		<p><i>2 часа.</i> Параллактическое смещение звезд. Тригонометрические параллаксы. Изменение экваториальных координат звезд из-за параллактического смещения. Горизонтальный параллакс. Определение астрономической единицы. Отрицательные параллаксы.</p>	<p><i>Семинар 6.</i> <i>2 часа.</i> Тема: Параллактическое смещение и собственное движение звёзд. Задачи на вычисление координат звёзд с учетом параллактического смещения и собственного движения при переходе от одной эпохи к другой.</p>		<p><i>4 часа.</i> <i>Работа с лекционным материалом:</i> <i>Параллактическое смещение и собственное движение звёзд.</i> <i>Решение задач на определение положения звёзд на произвольную эпоху.</i></p>	<p>ДЗ Оп, Об</p>
		<p><i>2 часа.</i> Собственные движения звезд. Преобразование координат звезд от одной эпохи наблюдений к другой. Вековой параллакс. Метод Шлезингера определения относительных тригонометрических параллакс и собственных движений. Абсолютизация тригонометрических параллакс и собственных движений. Космические астрометрические проекты. Проект HIPPARCOS и его результаты. Каталоги тригонометрических параллакс и собственных движений. Точность измерения. Редукция наблюдений.</p>				

5	раздел 5 <b>Учет прецессии и нутации при астрометрических наблюдениях</b>	2 часа. Историческая справка. Причины прецессии и нутации. Основы математической теории прецессии и нутации. Прецессия от планет.	Семинар 7 . 2 часа. Тема: Прецессия и нутация. Вычисление прецессионных и нутационных углов, матриц прецессии и нутации.			
		2 часа. Понятие эпохи наблюдения, эпохи каталога, эпохи равноденствия. Средняя и истинная системы координат. Точные формулы учета влияния прецессии и нутации на координаты источников. Матрицы прецессии и нутации. Использование Ежегодника для учета прецессии и нутации. Уравнение равноденствий. Вычисление истинного звездного времени.				
6	раздел 6 <b>Основы редукции радиоинтерферометрических наблюдений</b>	4 часа. Принципы наблюдений на РСДБ. Редукция наблюдений. Методы определения координат радиоисточников и радиотелескопов. Принципы построения земной (ITRF) и небесной (ICRF) систем координат. Микросекундная точность наблюдений и проблема стабильности небесной системы координат.	Семинар 7 . 2 часа. Тема: Коллоквиум.		3 часа. <i>Работа с лекционным материалом</i> <i>По теме Редукция наблюдений.</i>	К, Об



**Семинары и лабораторные работы указываются только при их наличии в учебном плане (приложение 6). Остальные позиции заполняются в обязательном порядке.**

**Предусмотрены следующие формы текущего контроля успеваемости.**

- |  |                    |                            |                              |                               |
|--|--------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 1. Защита лабораторной работы (ЛР);    | 4. Реферат (Р);    | 7. Рубежный контроль (РК); | 10. Контрольная работа (КР); | 15. Рейтинговая система (РС); |
| 2. Расчетно-графическое задание (РГЗ); | 5. Эссе (Э);       | 8. Тестирование (Т);       | 11. Деловая игра (ДИ);       | 16. Обсуждение (Об).          |
| 3. Домашнее задание (ДЗ);              | 6. Коллоквиум (К); | 9. Проект (П);             | 12. Опрос (Оп);              |                               |

## 9. Место дисциплины в структуре ООП ВПО

1. обязательная дисциплина
2. базовая часть, профессиональный блок, модуль «Астрономия»
3. Курс является основой всех астрономических курсов, поскольку в нем идет речь об основополагающих понятиях: системах координат, шкалах времени, о преобразовании координат и времени, об эффектах, искажающих положение светил на небесной сфере, и учете этих эффектов при обработке наблюдений. Курс, поэтому, читается первым из обязательных на астрономическом отделении.

3.1 Курс «Общей астрономии», курсы «Аналитической геометрии» и «Линейной

алгебры»

3.2 Остальные курсы из модуля «Астрономия»

## 10. Образовательные технологии

Курс имеет электронную версию для презентации. Лекции читаются с использованием современных мультимедийных возможностей и проекционного оборудования. Занятия могут проходить на русском или английском языках.

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

**Промежуточная аттестация** проводится на 8 неделе в форме контрольной работы с оценкой. Критерии формирования оценки – уровень знаний пройденной части курса.

**Текущая аттестация** проводится еженедельно. Критерии формирования оценки – посещаемость занятий, активность студентов на лекциях.

### Список задач для контрольной работы

#### 1 вариант

1) 21 июня склонение Солнца равно  $23^{\circ}27'$ .

На какой широте продолжительность дня для 21 июня равна трём часам.

2) Незаходящая звезда имеет высоту  $20^{\circ}$  в нижней кульминации и  $50^{\circ}$  в верхней. Найти склонение этой звезды и широту места наблюдения.

(Чертёж обязателен.)

3) Задана долгота Солнца  $L$ . Доказать, что  $\operatorname{tg}\alpha = \operatorname{tg}L \cos\varepsilon$ . ( $\alpha$  – прямое восхождение Солнца,  $\varepsilon$  - наклонение эклиптики к экватору).

#### 2 вариант

1) Вычислить прямое восхождение Солнца, зная его долготу  $L=39^{\circ}55'47''$  и наклонение эклиптики к экватору  $\varepsilon = 23^{\circ}26'52''$ .

2) Получить матрицу преобразования координат вектора из локальной топоцентрической системы (ось  $x$  к востоку, ось  $y$  – к северу, ось  $z$  - вверх) к системе координат ITRF, жестко связанной с Землёй ( $X, Y, Z$ ).

3) Наблюдатель находится в Иркутске ( $\lambda = 105^\circ$ , 8 часовой пояс). В какой момент по московскому времени Солнце кульминирует в Иркутске?

### 3 вариант

1) Широта Москвы  $\varphi = 55^\circ 45'$ . Определить угловое расстояние от точки зенита в Москве до полюса Мира.

2) Преобразовать из экваториальной в эклиптическую систему координаты звезды  $\alpha = 305,5^\circ$   $\delta = 40,5^\circ$ .

3) Доказать, что если в сферическом треугольнике сторона  $a = 90^\circ$ , то  $\operatorname{tg}C = -\operatorname{tg}A \cos b$ .

### 4 вариант

1) Найти те точки сферы, для которых эклиптическая долгота равна прямому восхождению, а эклиптическая широта равна склонению.

2) Доказать, что если в сферическом треугольнике сторона  $a = 90^\circ$ , то  $\operatorname{tg}B = \operatorname{tg}b \sin C$ .

3) Преобразовать координаты звезды  $X, Y, Z$  (ось  $Z$  – направлена в точку весеннего равноденствия,  $X$  – в северный полюс мира,  $Y$  – дополняет систему до правой) в экваториальную систему координат ( $\alpha, \delta$ ). Ответ записать в виде матрицы.

Форма отчетности: **экзамен**

### Экзаменационные билеты:

1. Задачи, решаемые сферической астрономией.
2. Основные формулы сферической тригонометрии.
3. Горизонтальная система координат (определения основных кругов, точек)
4. Экваториальная система координат (определения основных кругов, точек)
5. Эклиптическая система координат (определения основных кругов, точек)
6. Преобразования между системами координат
7. Шкалы Всемирного времени
8. Солнечное и звездное время: истинное и среднее
9. Переход от Всемирного времени и звездному времени и обратно

10. Шкалы динамического времени
11. Явления суточного вращения Земли (восход и заход светил)
12. Понятия эпохи наблюдения, эпохи каталога, эпохи равноденствия
13. Геоцентрические, геодезические и астрономические координаты
14. Рефракция. Влияние рефракции на координаты звезд
15. Абберация. Влияние абберации на координаты звезд
16. Параллакс (суточный, годичный и вековой).
17. Изменение координат звезд из-за собственного движения
18. Прецессия и нутация
19. Учет прецессии (преобразование между средними системами координат)
20. Учет нутации (преобразование между истинными системами координат)
21. Процедура приведения на видимое место
22. Неравномерность вращения Земли
23. Основы редукции радиоинтерферометрических наблюдений
24. Принципы построения земной (ITRF) и небесной (ICRF) систем координат

## **12. Учебно-методическое обеспечение дисциплины**

### **Основная литература**

1. Жаров В.Е. Сферическая астрономия. Рекомендовано УМО по классическому университетскому образованию в качестве учебника для студентов ВУЗ'ов, обучающихся по специальности "Астрономия". Фрязино, Век-2. 2006. 480 с.
2. Green R.M. Spherical astronomy. Cambridge University Press. 1985. 520 p.
3. Куликов К.А. Курс сферической астрономии. М.: Наука, 1976. 232 с.

### **Дополнительная литература**

- Жаров В.Е. Время. Большая Российская энциклопедия. 2006. Т.6. С.24.
- Куимов К.В., Жаров В.Е. Астрономическая навигация, Земля и Вселенная, «Наука», 2008, т. 5, с. 3-15.

### **Периодическая литература**

1. Жаров В.Е., Сажин М.В., Семенцов В.Н., Куимов К.В., Сажина О.С., Ашимбаева Н.Т. Принципы формирования списка опорных радиоисточников для небесной системы координат. *Астрономический журнал* Том 87, Номер 2, Февраль 2010, С. 132-140, 2010
2. V. E. Zharov, M. V. Sazhin, V. N. Sementsov, K. V. Kuimov, O. S. Sazhina and N. T. Ashimbaeva.  
«The celestial reference frame stability and apparent motions of the radio sources». *Relativity in Fundamental Astronomy Proceedings IAU Symposium No. 261, 2009*. S. A. Klioner, P. K. Seidelman & M. H. Soffel, eds. P.50 – 55.
3. В. Е. Жаров, М. В. Сажин, В. Н. Семенцов, К. В. Куимов, О. С. Сажина «Физические причины вариации видимого положения квазаров». *Астрономический журнал*. 2009, том 86, №7, с. 627–637.
4. Sazhin, M. V.; Sementsov, V. N.; Zharov, V. E.; Kuimov, K. V.; Ashimbaeva, N. T.; Sazhina, O. S. «Cosmological and kinematical criteria for the ICRF2 sources selection», e-print arXiv: 0904.2146 , 2009.

### **Интернет-ресурсы**

1. <http://lnfm1.sai.msu.ru/grav/russian/lecture/lecture.htm>

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

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по специальности «Астрономия» имеются:

аудитории №26 и № 48 в здании ГАИШ МГУ, проекционное оборудование и ноутбуки.