

Лабораторный практикум по астрономии

Лабораторная работа № 1

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НЕБЕСНОЙ СФЕРЫ. СИСТЕМЫ НЕБЕСНЫХ КООРДИНАТ. УСЛОВИЯ ВИДИМОСТИ СВЕТИЛ НА РАЗЛИЧНЫХ ШИРОТАХ

Цель работы: изучение основных элементов и суточного вращения небесной сферы на ее модели. Знакомство с системами небесных координат. Изучение условий видимости светил на различных широтах.

Оборудование: модель небесной сферы, черный глобус.

Вопросы к допуску:

1. Небесная сфера, ее основные линии и плоскости.
2. Системы небесных координат.
3. Условия видимости светил на разных широтах.

Основные теоретические сведения

Небесная сфера и ее основные элементы. Для определения видимого положения небесных тел и изучения их движения в астрономии вводится понятие *небесной сферы*.

Сфера произвольного радиуса с центром, помещенным в произвольной точке пространства, называется *небесной сферой*.

Вращение небесной сферы повторяет вращение небесного свода.

Прямая ZOZ' (рис. 1.), проходящая через центр O небесной сферы и совпадающая с направлением нити отвеса в месте наблюдения, называется *вертикальной линией*.

Вертикальная линия пересекает небесную сферу в точках *Зенита* Z и *Надира* Z' .

Большой круг небесной сферы $SWNE$, плоскость которого перпендикулярна к вертикальной линии, называется *математическим* или *истинным горизонтом*.

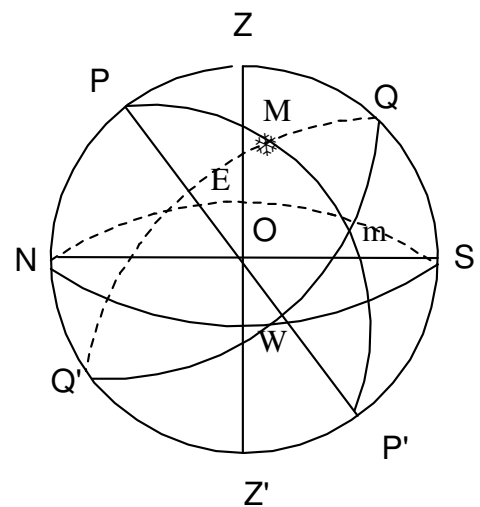


Рис.1

Основные элементы небесной сферы

том. Математический горизонт делит небесную сферу на две половины: видимую и не видимую для наблюдателя.

Диаметр PP' , вокруг которого происходит вращение небесной сферы, называется *осью мира*. Ось мира пересекается с небесной сферой в *северном P и южном P' полюсах мира*. Большой круг небесной сферы $QWQ'E$, плоскость которого перпендикулярна к оси мира, называется *небесным экватором*. Небесный экватор делит поверхность небесной сферы на два полушария — *северное и южное*.

Небесный экватор пересекается с математическим горизонтом в двух точках — *точке востока E и точке запада W* .

Большой круг небесной сферы $PZQSP'Z'Q'N$, плоскость которого проходит через отвесную линию и ось мира, называется *небесным меридианом*. Небесный меридиан делит поверхность небесной сферы на *восточное и западное полушария*.

Плоскость небесного меридиана и плоскость математического горизонта пересекаются по прямой линии NOS , которая называется *полуденной линией*. Небесный меридиан пересекается с математическим горизонтом в двух точках — *точке севера N и точке юга S* .

Явление пересечения светилом небесного меридиана называется *кульминацией* светила. Если светило пересекает верхнюю часть меридиана — наступает *верхняя кульминация*, если нижнюю — *нижняя кульминация*.

Дуга большого круга небесной сферы ZMZ' (рис.2), проходящая через зенит, светило M и надир, называется *кругом высот* или *вертикалом* светила M .

Круги высот, проходящие через точки востока и запада, называются *первыми вертикалами* — *восточным и западным*.

Малый круг небесной сферы (bMb') (рис.3), плоскость которого параллельна плоскости небесного экватора, называется *небесной или суточной параллелью светила*. Видимые суточные движения светил совершаются по суточным параллелям.

Дуга большого круга небесной сферы PMP' , проходящая через полюсы мира и светило M , называется *часовым кругом* или *кругом склонения* светила.

Системы небесных координат. Положение светила на небе однозначно определяется по отношению к основным плоскостям и связанным с ними линиям и точкам небесной сферы и выражается количественно двумя величинами (центральными углами или дугами больших кругов), которые называются *небесными координатами*.

Горизонтальная система. Основной плоскостью является плоскость математического горизонта $NWSE$, а отсчет ве-

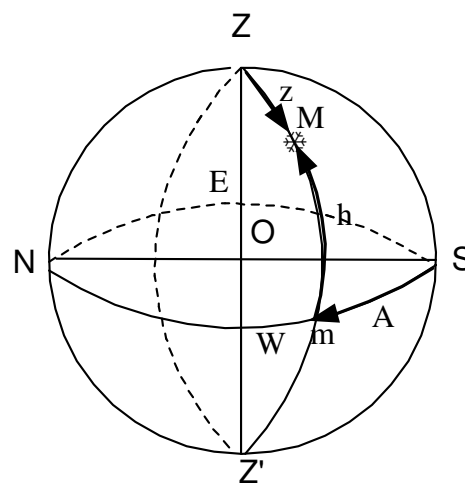


Рис.2

Горизонтальная система координат

дется от зенита и от одной из точек математического горизонта. Одной координатой является *зенитное расстояние* z , или *высота* светила над горизонтом h (рис.2).

Высотой h светила M называется дуга круга высот mM от математического горизонта до светила, или центральный угол mOM между плоскостью математического горизонта и направлением на светило M . Высоты отсчитываются в пределах от 0 до 90° к зениту и от 0 до -90° к надиру.

Зенитным расстоянием светила называется дуга вертикального круга ZM от зенита до светила.

$$z + h = 90^\circ$$

Положение самого вертикального круга определяется другой координатой — *азимутом* A . *Азимут* A светила называется дуга математического горизонта Sm от точки юга S до вертикального круга, проходящего через светило. Азимуты отсчитываются в сторону суточного вращения небесной сферы, т.е. к западу от точки юга, в пределах от 0 до 360° .

Эта система координат используется для непосредственных определений видимых положений светил с помощью угломерных инструментов.

Первая экваториальная система координат. Основной плоскостью в этой системе является плоскость небесного экватора. Начало отсчета — верхняя точка небесного экватора Q . Одной координатой является *склонение*. *Склонением* δ называется дуга mM часового круга $PMmP'$ от небесного экватора до светила. Отсчитываются склонения от 0 до $+90^\circ$ к северному полюсу и от 0 до -90° к южному. Кроме склонения можно использовать полярное расстояние p — дугу от северного полюса мира до светила.

$$p + \delta = 90^\circ.$$

Положение часового круга определяется *часовым углом* t .

Часовым углом светила M называется дуга небесного экватора Qm от верхней точки Q небесного экватора до часового круга $PMmP'$, проходящего через светило. Часовые углы отсчитываются в сторону суточного обращения небесной сферы, к западу от Q , в пределах от 0 до 360° или от 0 до 24 часов.

Эта система координат используется в практической астрономии для определения точного времени.

Вторая экваториальная система координат. Основной плоскостью этой системы координат является плоскость небесного экватора. Одной координатой является склонение δ , другой — прямое восхождение α .

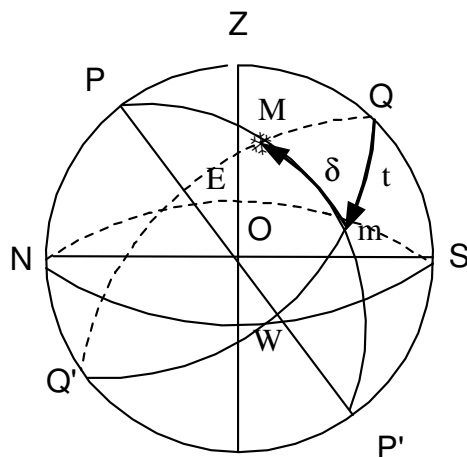


Рис.3

Первая экваториальная
система координат

Прямым восхождением α светила M называется дуга небесного экватора Υm от точки весеннего равноденствия Υ до часового круга, проходящего через светило. Отсчитываются α в сторону противоположную суточному вращению небесной сферы, в пределах от 0 до 360° или от 0 до 24 часов.

Эта система используется для определения неизменных при суточном вращении небесной сферы координат и составления каталогов небесных объектов.

Высота полюса мира над горизонтом, высота светила в меридиане. Высота полюса мира над горизонтом всегда равна географической широте φ места наблюдения.

Если склонение светила меньше географической широты, то оно кульминирует к югу от зенита на зенитном расстоянии

$$z = \varphi - \delta,$$

или на высоте

$$h = 90^\circ - \varphi + \delta.$$

Если склонение светила равно географической широте, то оно кульминирует в зените и $z = 0$, а $h = +90^\circ$.

Если склонение светила больше географической широты, то оно кульминирует к северу от зенита на $z = \delta - \varphi$, или на высоте:

$$h = 90^\circ + \varphi - \delta.$$

Условия для восхода и заката светил. Если мы внимательно понаблюдаем за суточным движением светил, то заметим, что некоторые из них восходят, проходят через небесный меридиан (кульминируют) и заходят. Другие же за горизонт не опускаются, например, созвездие Большой Медведицы на средних широтах северного полушария Земли. Древние греки даже отразили это в легенде, посвященной созвездию. Богиня Гера сделала так, что Медведица никогда не может окунуться в океан и освежиться. В то же время часть звезд южной полусферы небосвода вообще никогда не восходят в северном полушарии. Можно определить точные условия восхода небесных объектов по приведенным ниже формулам.

Светило восходит и заходит на данной широте, если

$$|\delta| < (90^\circ - |\varphi|).$$

Светило будет незаходящим или невосходящим, если

$$|\delta| > (90^\circ - |\varphi|).$$

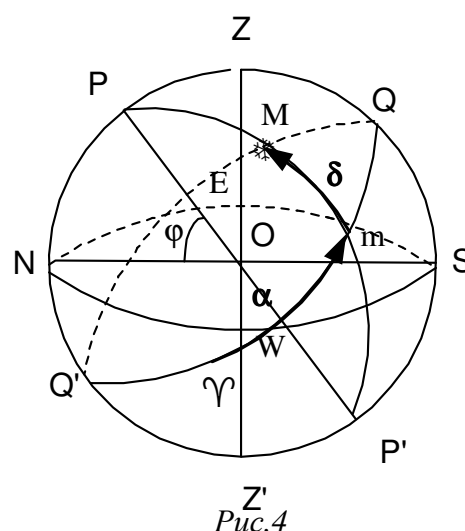


Рис.4
Вторая экваториальная
система координат

Для наблюдателя на земном экваторе все светила восходящие и заходящие. На полюсах наблюдатели могут созерцать только полусферы, соответствующие данному полюсу.

Литература:

1. *Астрономический календарь. Постоянная часть.* М., 1981.
2. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. *Курс общей астрономии.* М., 1983.

Для получения зачета необходимо:

1. Свободно владеть моделью небесной сферы с целью определения на ней видимых положений светил.
2. Уметь изобразить на чертеже небесной сферы точку с известными горизонтальными и экваториальными координатами.
3. Знать условия видимости светил на различных географических широтах.

Образец заданий

1. По модели небесной сферы изучить ее основные элементы и изменение их положения относительно наблюдателя в процессе суточного вращения небесной сферы.
2. Начертить мелом на черном глобусе небесный экватор, небесный меридиан, эклиптику, горизонт, северный и южный полюса мира, зенит и надир.
3. Изобразить мелом на черном глобусе:
 - а) горизонтальную систему небесных координат;
 - б) экваториальную систему небесных координат.
4. Изобразить на чертеже землю и положение небесной сферы, ее основных элементов для наблюдателя на широте $\varphi = 30^\circ$.
5. Изобразить на чертеже небесную сферу и положения ее основных элементов для широты $\varphi = -15^\circ$ и показать на ней точки, имеющие следующие координаты:
 - а) горизонтальные: $A = 135^\circ$, $h = 45^\circ$;
 - б) экваториальные: $t = 2^h$, $\delta = -45^\circ$ и $\alpha = 12^h$, $\delta = +45^\circ$.
6. Определить высоту, зенитное расстояние и азимут точки запада.
7. Вычислить зенитное расстояние и высоту в верхней и нижней кульминации звезд Денеб и Толиман на экваторе, северном полюсе и в Минске.
8. Определить склонение δ звезд, доступных наблюдению в Гомеле.

Примеры выполнения некоторых заданий

1. Изобразить на чертеже небесную сферу и положения ее основных элементов для широты $\varphi = -15^\circ$ и показать на ней точки, имеющие следующие координаты:

а) горизонтальные: $A = 135^\circ$, $h = 45^\circ$;

б) экваториальные: $t = 2^h$, $\delta = -45^\circ$ и $\alpha = 9^h$, $\delta = +75^\circ$.

Итак, элементы небесной сферы можно условно разделить на две группы: расположение одних – зависит от географической широты φ места наблюдения, других – не зависит. К первым относятся: меридиан, отвесная линия, зенит Z и надир Z' , полуденная линия NS , математический горизонт (точки севера N и юга S). Эти элементы изображаем в первую очередь (рис а). Ко вторым относятся в первую очередь ось мира PP' , которую располагаем под углом φ к математическому горизонту. В нашем случае угол географической широты $\varphi < 0$, значит, ось мира располагаем таким образом, чтобы Северный полюс мира P оказался под математическим горизонтом. Дуга PN должна быть равна $|\varphi|$. Далее наносим на чертеж небесный экватор, перпендикулярный оси мира; обозначаем точки пересечения: Q , Q' , востока E , запада W (рис. б).

Теперь найдем точки по заданным координатам. Точка $M1$ ($A = 135^\circ$, $h =$

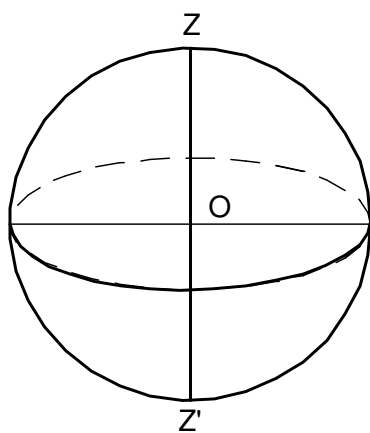


Рис. а.

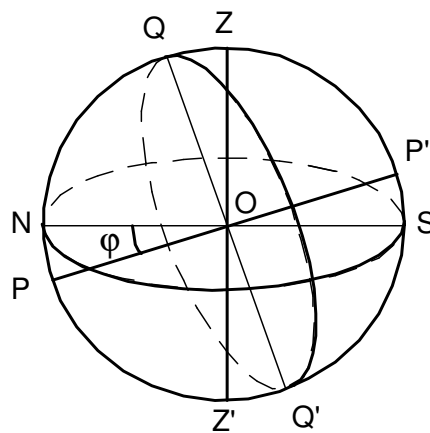


Рис. а.

45°); $M2$ ($t = 2^h$, $\delta = -45^\circ$) и $M3$ ($\alpha = 9^h$, $\delta = +75^\circ$). Прямое восхождение α отсчитывается от точки весеннего равноденствия Υ , которая является точкой пересечения эклиптики и небесного экватора. Однако эклиптику мы не имеем, поэтому в качестве точки в. р. Υ можно взять любую точку экватора (Рис. в).

2. Определить на чертеже небесной сферы примерные положения звезды Денеб в верхней и нижней кульминациях и вычислить зенитное расстояние и высоту в данных положениях для географической широты 60° .

а значит – на небесном меридиане, если в верхней кульминации, то – над осью мира, в нижней – под осью мира.

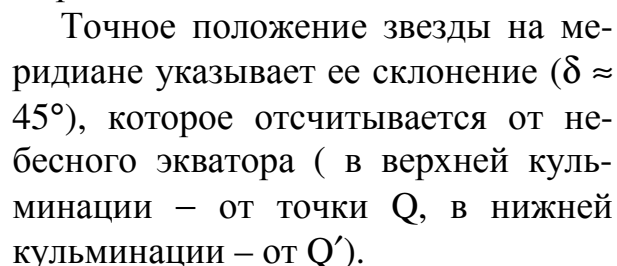


Рис. в.

В нижней кульминации зенитное расстояние звезды Денеб z_H – это угол ZOD_H , величину которого можно найти, если от величины угла ZOZ' (180°) отнять величины угла $Z'OQ'$ (который является вертикальным с ZOQ и равен φ) и угла $Q'OD_H$ (который равен δ). Т. е., $z_H = 180^\circ - \varphi - \delta = 75^\circ$. Тогда высота звезды Денеб в нижней кульминации (угол NOD_H) $h_H = 90^\circ - z_H = 15^\circ$.



Лабораторная работа № 2

ЗВЕЗДНЫЕ АТЛАСЫ, ПОДВИЖНАЯ КАРТА ЗВЕЗДНОГО НЕБА, АСТРОНОМИЧЕСКИЕ КАЛЕНДАРИ И СПРАВОЧНИКИ

Цель работы: ознакомление с содержанием звездных атласов и их использованием при изучении звездного неба. Использование подвижной карты при изучении звездного неба. Ознакомление с содержанием и использованием астрономических календарей и справочников.

Оборудование: атлас звездного неба А. А. Михайлова, Астрономический календарь (постоянная и переменная части), подвижная карта звездного неба, школьный астрономический календарь. Электронные справочники и базы данных.

Вопросы к допуску:

1. Понятие созвездия.
2. Устройство и назначение подвижной карты звездного неба.
3. Астрономические календари.

Основные теоретические сведения

Звездные атласы служат пособием при изучении звездного неба и при выполнении научно-исследовательских работ по астрономии. На каждой карте атласа изображен определенный участок звездного неба, спроектированный на плоскость. Атлас звездного неба А. А. Михайлова состоит из 20 карт и содержит все звезды обоих полушарий до 6,5 звездной величины. Координаты звезд даны для эпохи 1950 года. К атласу прилагается общий каталог звезд, который содержит не только координаты звезд, но также их видимую звездную величину и тип спектра.

Видимый блеск звезд различен и выражается в условных единицах, называемых звездными величинами (m). Наиболее яркие звезды считаются звездами нулевой видимой звездной величины (0^m). Звезды, блеск которых приблизительно в 2,5 раза слабее блеска звезд 0^m , считаются звездами первой видимой величины (1^m). На пределе видимости невооруженным глазом находятся звезды 6-й видимой звездной величины (6^m), которые слабее звезд 1-й видимой звездной величины в 100 раз.

Поправка на прецессию. Вследствие возмущающего действия, оказываемого на вращение Земли Луной и Солнцем, ось вращения Земли совершает в пространстве очень сложное движение. Она медленно описывает конус, оставаясь все время наклоненной к плоскости движения Земли под углом около $66^\circ,5$. Это

движение называется *прецессионным*, период его около 26 000 лет. Оно определяет среднее направление оси в пространстве в различные эпохи.

Вследствие изменения положения земной оси в пространстве из-за явления прецессии меняет свое положение ось мира и небесный экватор. Сетка экваториальных координат, связанная с небесным экватором, медленно поворачивается в пространстве, изменяются экваториальные координаты звезд.

Чтобы определить координаты звезд в произвольный год, нужно к координатам звезды, данным в каталоге на 1950 г., прибавить изменение координат вследствие прецессии за столько лет, сколько прошло с 1950 г. до данного года. Для этой цели служит таблица прецессии за 100 лет, имеющаяся в звездном каталоге. Поправка по прямому восхождению на 100 лет $\Delta\alpha_{100}$ находится по значению α_{1950} и δ_{1950} ; δ_{1950} определяет нужную строку, α_{1950} — нужный столбец. Поправка на данный год находится из соотношения:

$$\Delta\alpha_n = \Delta\alpha_{100} \cdot n/100,$$

где n — количество лет, прошедшее с 1950 года. Поправка по склонению на 100 лет находится по значению α_{1950} . Дальнейшие операции аналогичны предыдущим.

Подвижная звездная карта служит пособием для общей ориентировки на небе. Пользуясь ею, можно решить целый ряд задач и, в частности, определить расположение созвездий относительно истинного горизонта. На карте изображены: сетка небесных экваториальных координат и основные созвездия, состоящие из сравнительно ярких звезд. Карта составлена в проекции, в которой небесные параллели изображаются концентрическими окружностями, а круги склонения — лучами, выходящими из северного полюса мира, расположенного в центре карты. Рядом с ним находится звезда α Малой Медведицы, называемая Полярной звездой.

Круги склонения проведены через 15° (1^h) и оцифрованы в часах по одной из небесных параллелей вблизи внутреннего обреза карты. Небесный экватор и три небесных параллели в 30° оцифрованы в точках их пересечения с начальным кругом склонения ($\alpha = 0^h$) и с диаметрально противоположным ему кругом склонения ($\alpha = 12^h$). Оцифровка кругов склонения и небесных параллелей позволяет грубо оценивать значения экваториальных координат небесных светил. Эксцентрический овал, пересекающийся с небесным экватором в двух диаметрально противоположных точках, изображает эклиптику.

Область карты, заключенная внутри небесного экватора, представляет северную небесную полусферу. По наружному обреза карты, называемому лимбом дат, нанесены календарные числа и названия месяцев года. Накладной круг, прикладываемый к карте, позволяет установить вид звездного неба для любого времени суток произвольного дня года. Для этого внешний обрез круга, называемый часовым лимбом, разделен на 24 часа, по числу часов в сутках.

Часовой лимб оцифрован в системе среднего времени. В накладном круге имеется вырез, положение которого определяется географической широтой места наблюдения. Контур овального выреза изображает истинный, или математический горизонт, на котором нанесены названия четырех его главных точек — точек

юга, запада, севера и востока. Прямая, соединяющая точки севера и юга, изображает небесный меридиан. Положение зенита определяется точкой пересечения этой прямой с небесной параллелью, склонение которой равно широте места наблюдения.

Подвижная карта звездного неба позволяет приближенно решать ряд задач практической астрономии. Например, чтобы определить вид звездного неба в некоторый момент времени заданного дня года, нужно наложить накладной круг концентрично на звездную карту, чтобы штрих часового лимба, указывающий данный момент времени, совпал со штрихом заданной даты, а небесный меридиан всегда проходил через северный полюс мира. Тогда внутри овального выреза окажутся те звезды, которые в заданный момент времени видны над горизонтом.

Светила, которые окажутся на прямой, соединяющей точки севера и юга, проходят в данный момент через меридиан, т.е. кульминируют. В верхней кульминации будут те светила, которые располагаются на этой прямой между северным полюсом мира и точкой юга. Те светила, которые располагаются на небесном меридиане между северным полюсом мира и точкой севера, находятся в данный момент в нижней кульминации.

С помощью подвижной карты звездного неба можно получить положение Солнца на любой день года. Для этого необходимо соединить прямой полюс мира со штрихом, отмечающим заданную дату месяца. Точка пересечения этой прямой с эклиптической и будет местом нахождения на небе Солнца в данный день года.

Астрономические календари содержат сведения, необходимые для астрономических наблюдений, их обработки и решения многих других задач. По содержанию астрономические календари делятся на две группы. Первая содержит краткое изложение теоретических основ различных разделов астрономии, справочные таблицы и сведения постоянного характера. К этой группе принадлежит “Астрономический календарь (постоянная часть) ВАГО”. Справочные сведения постоянного характера содержатся в “Справочнике любителя астрономии” П.Г. Куликовского, в различных каталогах и справочных таблицах. В последнее время появилось много электронных справочников, таблиц и баз данных.

К другой группе астрономических календарей относятся астрономические ежегодники, содержащие сведения об астрономических явлениях текущего года: “Астрономический календарь-ежегодник (переменная часть) ВАГО”, “Астрономический ежегодник”, “Авиационный астрономический ежегодник” и др. Существует много астрономических программ для ЭВМ, позволяющих находить различную информацию о небесных явлениях в нужный момент времени.

Литература:

1. *Астрономический календарь. Постоянная часть.* М., 1981.
2. *Астрономический календарь ежегодник. Переменная часть.* М.
3. *Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии.* М., 1983.

4. Куликовский П.Г. Справочник любителя астрономии. М., 1971.

Для получения зачета необходимо:

1. Уметь пользоваться звездным атласом.
2. Свободно владеть подвижной звездной картой при решении различных задач.
3. Уметь пользоваться астрономическими календарями и справочниками для нахождения необходимых сведений.

Образец заданий

1. По картам звездного атласа определить экваториальные координаты и видимую звездную величину двух наиболее ярких звезд в созвездии Кассиопеи.
2. Выписать названия ярких созвездий, по которым проходит Млечный Путь.
3. Найти на звездной карте созвездие Малого Пса.
По карте определить координаты α и δ звезды Процион (α Малого Пса).
Найти эту звезду в общем каталоге звезд, определить точные координаты α и δ , звездную величину (mag) и тип спектра (sp).
4. Взять из общего каталога координаты звезды Дубхе и определить ее координаты на 2004 год, пользуясь таблицей прецессии за 100 лет.
5. Установить подвижную звездную карту на день и час занятий для Минска и указать, какие созвездия будут в верхней и нижней кульминации.
6. В день 15 июля найти момент восхода, верхней кульминации и захода звезды Сириус (α Большого Пса).
7. Определить день года, в который в $20^{\text{h}}30^{\text{m}}$ в верхней кульминации находится звезда Альдебаран.
8. По таблицам в “Астрономическом календаре” (постоянной части) найти названия и видимую звездную величину звезд, положения которых определяются экваториальными координатами:

1. $\alpha = 46^{\circ}38'1,5''$	2. $\alpha = 151^{\circ}45'37,5''$
$\delta = +40^{\circ}51'38''$	$\delta = +12^{\circ}05'24''$
9. Из эфемерид Солнца и Луны найти моменты времени восхода и захода этих светил в пункте $\lambda = 0^{\text{h}}$, $\varphi = 56^{\circ}$, азимуты точек их восхода и захода, найти моменты их верхней кульминации на текущий день.

10. Из эфемерид Луны выписать даты и моменты времени четырех основных ее фаз в текущем месяце.
11. Найти положение и моменты времени восхода и захода планеты Юпитер в данный день.

Примеры выполнения некоторых заданий

4. Взять из общего каталога звезд атласа координаты (α и δ) звезды Дубхе и определить ее координаты на 2004 год, используя таблицу прецессии за 100 лет.

Итак, прежде всего необходимо найти примерные координаты данной звезды по звездной карте атласа для того, чтобы определить, в какой части общего каталога звезд искать заданную звезду.

Но сначала определим, какому созвездию принадлежит звезда Дубхе. Ответ находится в таблице «Собственные имена звезд» атласа звездного неба А. А. Михайлова: α UMa. Сокращенное латинское название созвездия (Uma), найденное в данной таблице, можно расшифровать с помощью следующей таблицы «Названия созвездий»: Uma – Большая Медведица. Здесь же находим номера карт атласа, на которых частично изображена Большая Медведица. На 4-й карте находим α Uma. По верхней и нижней дуговым шкалам определяем прямое восхождение ($\alpha \approx 11^h$), а по левой и правой – склонение ($\delta \approx 62^\circ$). В общем каталоге звезд (в этом же атласе) по прямому восхождению находим α Uma и уточняем координаты ($\alpha_{1950} = 11^h 0.7^m$; $\delta_{1950} = 62^\circ 1'$). Данные координаты в общем каталоге звезд соответствуют равноденствию 1950 года. Поэтому, для уточнения их на заданный год необходимо найти разницу в годах между заданным и 1950-ым: $\Delta t = 2004 - 1950 = 54 \text{ года}$ и воспользоваться таблицей прецессии за 100 лет (в конце атласа). Данная таблица состоит из двух частей: “по прямому восхождению”, где содержатся приращения координат $\Delta\alpha_{100}$, и “по склонению”, где – приращения координат $\Delta\delta_{100}$ за 100 лет. В таблице “по прямому восхождению” по координатам ($\alpha_{1950} = 11^h 0.7^m$; $\delta_{1950} = 62^\circ 1'$) находим соответствующее приращение: $\Delta\alpha_{100} = 6.2^m$ (4-й столбец, 8-я строка). В таблице “по склонению” по координате α_{1950} находим соответствующее приращение: $\Delta\delta_{100} = -32'$ (4-я строка снизу). Но нам необходимо приращение координат не за 100 лет, а за $\Delta t = 54 \text{ года}$, т.е. $\Delta\alpha_{54}$ и $\Delta\delta_{54}$, значения которых находим по формулам:

$$\Delta\alpha_n = (\Delta\alpha_{100} / 100) \times n \text{ и } \Delta\delta_n = (\Delta\delta_{100} / 100) \times n.$$

Таким образом, $\Delta\alpha_{54} = 3.35^m$ и $\Delta\delta_{54} = -17.3'$, а координаты на заданный год $\alpha_{2004} = \alpha_{1950} + \Delta\alpha_{54} = 11^h 0.7^m + 3.35^m = 11^h 3.42^m$; а $\delta_{2004} = 62^\circ 1' - 17.3' = 61^\circ 43.7'$.

Лабораторная работа № 3

ИЗУЧЕНИЕ СИСТЕМ СЧЕТА ВРЕМЕНИ

Цель работы: изучение различных систем счета времени.

Оборудование: модель небесной сферы, астрономический календарь (постоянная и переменная части), подвижная звездная карта.

Вопросы к допуску:

1. Понятие звездного времени.
2. Среднее и истинное солнечное время.
3. Уравнение времени.
4. Связь местного времени с географической долготой.

Основные теоретические сведения

Измерение времени основано на наблюдениях суточного вращения небесного свода и годового движения Солнца, т.е. на вращении Земли вокруг оси и на обращении Земли вокруг Солнца.

Вращение Земли вокруг оси происходит почти равномерно, с периодом, равным периоду вращения небесного свода. Поэтому по углу поворота Земли от некоторого начального положения можно судить о протекшем времени. За начальное положение Земли принимается момент прохождения плоскости земного меридиана места наблюдения через избранную точку на небе, или, что одно и то же, момент верхней кульминации этой точки на данном меридиане.

Продолжительность основной единицы времени, называемой сутками, зависит от избранной точки на небе. В астрономии за такие точки принимаются:

- точка весеннего равноденствия (*звездное время*),
- центр видимого диска Солнца (*истинное Солнце*, истинное солнечное время),
- *среднее Солнце* — фиктивная точка, положение которой на небе может быть вычислено теоретически для любого момента времени (среднее солнечное время).

Для измерения длинных промежутков времени служит тропический год, основанный на движении Земли вокруг Солнца.

Тропический год — промежуток времени между двумя последовательными прохождениями центра истинного Солнца через точку весеннего равноденствия. Содержит 365,2422 средних солнечных суток.

Из-за медленного движения точки весеннего равноденствия навстречу Солнцу, вызванного прецессией, относительно звезд Солнце оказывается в той же точке неба через промежуток времени на 20 мин. 24 с. больший, чем тропический год. Он называется *звездным годом* и содержит 365,2564 средних солнечных суток.

Звездное время. Промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями точки весеннего равноденствия на одном и том же географическом меридиане называется *звездными сутками*.

За начало звездных суток на данном меридиане принимают момент верхней кульминации точки весеннего равноденствия.

Время, протекшее от верхней кульминации точки Υ до любого другого ее положения, выраженное в долях звездных суток, называется *звездным временем* S .

Угол, на который Земля повернется от момента верхней кульминации точки весеннего равноденствия до какого-нибудь другого момента, равен часовому углу точки Υ в этот момент.

$$S = t_{\Upsilon}.$$

Практически для установления начала звездных суток или звездного времени в какой-то момент надо измерить часовой угол t какого-либо светила M , прямое восхождение которого известно. Тогда звездное время:

$$S = \alpha + t,$$

где $t = \lambda - Q_m$, $\alpha = \lambda_{\Upsilon m}$, а $t_{\Upsilon} = \lambda - Q_{\Upsilon} = S$.

Звездное время в любой момент равно прямому восхождению какого-либо светила плюс его часовой угол. В момент верхней кульминации светила его часовой угол $t = 0$, тогда $S = \alpha$.

Звездное время для наблюдателей, находящихся на разных меридианах, будет разным. Разность звездного времени в двух пунктах земной поверхности в один и тот же физический момент равна разности *географических долгот* этих пунктов.

$$S_2 - S_1 = \lambda_2 - \lambda_1.$$

Истинное солнечное время. Промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями Солнца (центра солнечного диска) на одном и том же географическом меридиане называется *истинными солнечными сутками*. За начало истинных солнечных суток на данном меридиане принимают момент нижней кульминации Солнца (*истинная полночь*).

Время, протекшее от нижней кульминации Солнца до любого другого его положения, выраженное в долях истинных солнечных суток называется *истинным солнечным временем* T_c .

Истинное солнечное время T_c на данном меридиане в любой момент:

$$T_c = t_c + 12^h,$$

где t_c – часовой угол Солнца.

Истинные солнечные сутки имеют различную продолжительность, так как:

1. Солнце движется не по небесному экватору, а по эклиптике, наклоненной к экватору под углом $23^{\circ}26'$.
2. Движение Солнца по эклиптике неравномерно.

Среднее солнечное время. Чтобы получить сутки постоянной продолжительности и в то же время связанные с движением Солнца, в астрономии введены понятия двух фиктивных точек — среднего эклиптического и среднего экваториального Солнца.

Среднее эклиптическое Солнце равномерно движется по эклиптике со средней скоростью Солнца.

Среднее экваториальное Солнце равномерно движется по экватору с постоянной скоростью среднего эклиптического Солнца и одновременно с ним проходит точку весеннего равноденствия.

Промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями среднего экваториального Солнца на одном и том же географическом меридиане называется *средними солнечными сутками*.

Продолжительность средних солнечных суток равна среднему значению продолжительности истинных солнечных суток за год.

За начало средних солнечных суток на данном меридиане принимают момент нижней кульминации среднего экваториального Солнца (*средняя полночь*).

Время, протекшее от нижней кульминации среднего экваториального Солнца до любого другого его положения, выраженное в долях средних солнечных суток, называется *средним солнечным временем* T_m .

Среднее солнечное время T_m на данном меридиане в любой момент:

$$T_m = t_m + 12^h,$$

где t_m – часовой угол Солнца.

Разность между средним и истинным солнечным временем в один и тот же момент называется **уравнением времени η** .

$$\eta = T_m - T_c = t_m - t_c = \alpha_c - \alpha_m,$$

где t – часовой угол, а α — прямое восхождение.

Отсюда следует

$$T_m = T_c + \eta = t_c + 12^h + \eta.$$

Уравнение времени обращается в нуль около 15 апреля, 14 июля, 1 сентября и 24 декабря, и четыре раза в году принимает экстремальные значения, из них наиболее значительные около 11 февраля ($\eta = +14^m$) и 2 ноября ($\eta = -16^m$).

Уравнение времени публикуется в астрономических календарях - ежегодниках ВАГО для каждой средней полуночи на меридиане Гринвича. Если в календаре дан момент верхней кульминации центра истинного Солнца, то имея

в виду, что этот момент дан по среднему времени, и что в данный момент истинное солнечное время равно 12^h , получим уравнение:

$$\eta = T_m - 12^h.$$

Всемирное время. Местное среднее солнечное время гринвичского меридиана называется *всемирным, или мировым временем* T_0 .

Местное среднее солнечное время любого пункта на Земле определяется:

$$T_m = T_0 + \lambda^h,$$

где λ^h – долгота данного пункта, выраженная в часовой мере (h).

Поясное время. Местных систем счета времени бесчисленное множество, как и меридианов.

В 1884 году была предложена поясная система счета среднего времени. Счет времени ведется только на 24 основных географических меридианах, расположенных друг от друга по долготе точно через 15° , приблизительно *посередине* каждого часового пояса. *За основной меридиан нулевого пояса принят Гринвичский.*

Местное среднее солнечное время основного меридиана какого-либо часового пояса называется *поясным временем* T_n . Связь поясного времени с местным и всемирным выражается следующим образом:

$$\begin{aligned} T_m - T_n &= \lambda^h - n^h, \\ T_n &= T_0 + n^h \end{aligned}$$

где n^h – число целых часов, равное номеру часового пояса (долгота основного меридиана часового пояса).

Декретное время. В целях более рационального распределения электроэнергии, идущей на освещение предприятий и жилых домов, в летнее время вводят летнее время. В СССР 16.07.1930г. декретом правительства стрелки часов перевели на 1 час вперед против поясного времени.

Литература:

1. *Астрономический календарь. Постоянная часть.* М., 1981
2. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. *Курс общей астрономии.* М., 1983
4. Куликовский П.Г. *Справочник любителя астрономии.* М., 1971

Для получения зачета необходимо:

1. Уметь свободно ориентироваться в разных системах счета времени.
2. С помощью подвижной звездной карты уметь определить звездное время, зная в этот момент среднее местное время, а также уметь решать и обратную задачу.
3. Представить преподавателю оформленные вычисления, требуемые в задании.

Образец заданий

1. На модели небесной сферы показать взаимосвязь прямого восхождения и часового угла светила со звездным временем.
2. Найти звездное время в момент захода точки весеннего равноденствия.
3. Определить звездное время в Екатеринбурге и Минске, если в Бишкеке звездное время равно $2^{\text{h}}40^{\text{m}}25^{\text{s}}$.
4. Для того же момента времени в тех же городах вычислить часовые углы звезд Альдебаран и Спика, выразив их в угловой мере и в единицах времени.
5. По подвижной карте звездного неба определить приближенное значение звездного времени в среднюю полночь и средний полдень 25 февраля, 25 мая, 25 августа и 25 ноября.
6. По подвижной карте звездного неба определить для тех же дней приближенное значение среднего времени в момент 18^{h} звездного времени.
7. Определить, с точностью до 1 минуты, момент верхней кульминации Солнца по звездному, истинному солнечному, среднему местному, поясному, декретному времени в Берлине 2 ноября. ($\lambda = 13^{\circ}25'$).
8. В момент кульминации звезды Ригель ($\alpha = 5^{\text{h}}13^{\text{m}}$) часы, идущие точно по звездному гринвичскому времени, показывают $15^{\text{h}}9^{\text{m}}$; определить долготу данного места.

Примеры выполнения некоторых заданий

1. *Определить, с точностью до 1 минуты, момент верхней кульминации Солнца по звездному, истинному солнечному, среднему местному, поясному времени в Берлине 2 ноября. ($\lambda = 13^{\circ}25'$).*

В данном случае удобнее начать с истинного солнечного времени T_c . т. к. Солнце в верхней кульминации, то по истинному солнечному времени будет полдень, т.е. $T_c = 12^{\text{h}}$. Среднее солнечное время отличается от истинного солнечного на поправку «уравнение времени» ($\eta = T_m - T_c$), которая содержится в эфемеридах Солнца в астрономическом календаре-ежегоднике: $\eta_{0(2)} = -16^{\text{m}}$. Поэтому $T_m = T_c + \eta = 12^{\text{h}}00^{\text{m}} - 16^{\text{m}} = 11^{\text{h}}44^{\text{m}}$. Поясное время T_n связано с местным средним солнечным T_m соотношением: $T_m - T_n = \lambda^{\text{h}} - n^{\text{h}}$, где λ^{h} — географическая долгота пункта, выраженная в часовой мере, а n^{h} — номер часового пояса в часах. Откуда $T_n = T_m - \lambda^{\text{h}} + n^{\text{h}}$. Но прежде необходимо перевести в часовую

меру λ^h , воспользовавшись таблицей перевода (АК, постоянная часть) или соотношениями: $1^h = 15^\circ$, $1^m = 15'$, $1^s = 15''$. Итак, $\lambda^h = 0^h 53^m 40^s$. А поясное время $T_n = 11^h 44^m - 0^h 53^m 40^s + 1^h = 11^h 50^m 20^s$. Звездное время $S = \alpha_c + t_c$, где α_c – прямое восхождение Солнца, содержится в эфемеридах Солнца в астрономическом календаре-ежегоднике: $\alpha_c = 14^h 30^m$. А часовой угол Солнца в верхней кульминации $t_c = 0^h$. Поэтому звездное время $S = \alpha_c = 14^h 30^m$.

2. В момент верхней кульминации звезды Ригель ($\alpha = 5^h 13^m$) в некотором географическом пункте часы, идущие точно по звездному гринвичскому времени, показывают $15^h 9^m$. Определить долготу данного пункта.

Звездное время на данном меридиане можно найти по координатам звезды: $S = \alpha + t$. Звезда Ригель находится в верхней кульминации, значит ее часовой угол $t = 0$. Следовательно, в данном пункте $S_1 = \alpha_c = 5^h 13^m$. А по звездному гринвичскому времени в этот момент $S_0 = 15^h 9^m$. Но известно, что $S_0 - S_1 = \lambda_0 - \lambda_1$, поэтому $\lambda_1 = \lambda_0 - S_0 + S_1$. Для Гринвича $\lambda_0 = 0$. Следовательно, $\lambda_1 = 0 - 15^h 9^m + 5^h 13^m = -9^h 56^m$. (Минус показывает, что отсчет долготы происходит к западу от гринвичского меридиана). Долготу можно записать и положительной, но для этого нужно добавить 24^h . То есть, $24^h - 9^h 56^m = 14^h 4^m$ и отсчет долготы происходит к западу от гринвичского меридиана.

Лабораторная работа № 4

ВИДИМОЕ ГОДОВОЕ ДВИЖЕНИЕ СОЛНЦА И ЕГО СЛЕДСТВИЯ

Цель работы: изучение закономерностей, связанных с обращением Земли вокруг Солнца.

Оборудование: модель небесной сферы, малый звездный атлас, подвижная карта звездного неба, астрономический календарь - ежегодник.

Вопросы к допуску:

1. Понятие эклиптики.
2. Наклон эклиптики к экватору и его объяснение.
3. Точки равноденствий и солнцестояний.
4. Связь между видимым движением Солнца на разных широтах и границами тепловых поясов на Земле.

Основные теоретические сведения

Земля обращается вокруг Солнца в плоскости, которую называют плоскостью земной орбиты, и поэтому видимое годовое движение Солнца происходит в этой же самой плоскости, которая пересекает небесную сферу по большому кругу, называемому эклиптикой. Таким образом, плоскость эклиптики и плоскость земной орбиты идентичны.

В любой момент времени Солнце видно с Земли, проецирующимся в некоторую точку небесной сферы. Эклиптика и небесный экватор пересекаются под определенным углом ϵ в двух диаметрально противоположных точках, называемых точками равноденствий. Эти точки носят такое название потому, что, когда в них находится Солнце, день равен ночи. Угол ϵ называется наклоном эклиптики к экватору. По наклонению можно вычислить угол наклона земной оси к плоскости земной орбиты.

Учитывая, что на всех географических широтах φ северного полушария Земли, удовлетворяющих условию $90^\circ > \varphi > \epsilon$, Солнце всегда кульминирует к югу от зенита, наклонение эклиптики к экватору можно определить, используя формулу, справедливую для момента верхней кульминации,

$$z = \varphi - \delta,$$

где z — зенитное расстояние Солнца, φ — широта места наблюдения, δ — склонение Солнца. В день летнего солнцестояния склонение Солнца макси-

мально и равно $\delta = \varepsilon$. В этот момент его зенитное расстояние будет минимальным, т. е. $z_{\min} = \varphi - \varepsilon$. Следовательно, $\varepsilon = \delta_{\max} = \varphi - z_{\min}$. В день зимнего солнцестояния зенитное расстояние Солнца будет максимально, а склонение минимально и равно $\delta = -\varepsilon$.

Экваториальные координаты Солнца α и δ содержатся в астрономических календарях - ежегодниках.

Видимое движение Солнца легко уяснить на модели небесной сферы. Нужно помнить, что Солнце всегда находится на эклиптике. В дни весеннего и осеннего равноденствий продолжительность пребывания Солнца над горизонтом и под горизонтом одинакова и равна 12 часам. Отсюда происходит название этих точек. При нахождении Солнца около точки летнего солнцестояния высота его над горизонтом в полдень будет максимальной в это время в северных широтах самый длинный день и самая короткая ночь.

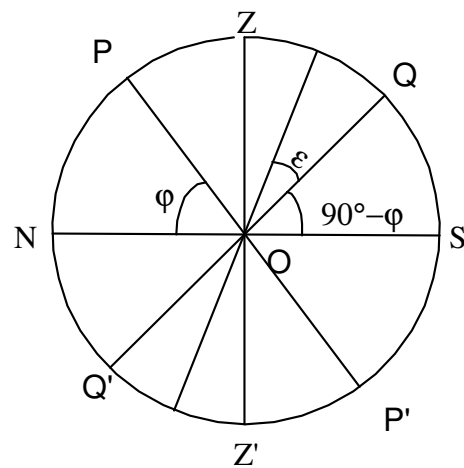


Рис.5

Годовое движение Солнца

Вблизи дня зимнего солнцестояния высота Солнца над горизонтом минимальна, день самый короткий в году, а ночь самая длинная.

На иных географических широтах земного шара продолжительность дня и ночи разная. На экваторе день всегда равен ночи и это соотношение не меняется в течение года. На полюсах бывает долгая полярная ночь, когда Солнце не поднимается над горизонтом в течение месяцев, и полярный день, когда Солнце не заходит.

Моменты восхода и захода Солнца, а также азимуты точек восхода и захода его зависят от географической широты места наблюдения. Поставив небесную сферу на разные широты, можно проследить зависимость видимого годового движения Солнца от широты места.

Точные значения моментов восхода, захода, а также азимуты этих точек вычисляются по соответствующим формулам сферической астрономии. В Астрономическом календаре - ежегоднике приведены значения этих величин для места с географической долготой $\lambda = 0^{\text{h}}0^{\text{m}}0^{\text{s}}$ и географической широтой $\varphi = 56^{\circ}0'0''$.

Моменты даны по гринвичскому (всемирному) времени. Приближенные значения тех же величин для определения географической широты могут быть найдены по подвижной карте звездного неба и помогают уяснить закономерность и причину их изменения на протяжении года.

На картах звездных атласов основные точки эклиптики ничем не обозначены, но легко отождествляются по их экваториальным координатам.

В зависимости от положения Солнца на эклиптике условия видимости созвездий на протяжении года непрерывно изменяются, и одно и то же созвездие в разные времена года видно в различное время суток. Условия видимости зодиакальных созвездий лучше всего могут быть выяснены по подвижной карте звездного неба, причем необходимо помнить, что звезды, расположенные в пределах около 15° к востоку и западу от Солнца, недоступны наблюдениям, так как темное время суток наступает не сразу после захода Солнца.

Границы тепловых поясов на Земле проведены по астрономическим признакам. В жарком поясе, границы которого простираются по обе стороны от экватора от $\varphi = +23^\circ 26'$ (северный тропик) до $\varphi = -23^\circ 26'$ (южный тропик), Солнце всегда восходящее и заходящее светило и два раза в году (на тропиках один раз) в полдень бывает в зените в тех местах, географическая широта φ которых равна его склонению δ в данный день ($\varphi = \delta$).

Так как склонение Солнца не бывает больше $\varepsilon = 23^\circ 26'$, то и границы жаркого пояса, называемые тропиками, расположены на географических параллелях с такой же широтой.

В умеренных поясах, лежащих между тропиками и полярными кругами (от $\varphi = \pm 23^\circ 26'$ до $\varphi = \pm 66^\circ 34'$), Солнце каждый день восходит и заходит, но никогда не бывает в зените. Полярных дней и ночей здесь не бывает. Полгода продолжительность дня здесь больше продолжительности ночи, а полгода — наоборот. Полуденная высота Солнца всегда меньше 90° (кроме тропиков) и больше 0° (кроме полярных кругов).

В холодных поясах (от $\varphi = \pm 66^\circ 37'$ до $\varphi = \pm 90^\circ$) Солнце может быть незаходящим и невосходящим светилом. Полярный день и полярная ночь могут длиться от 24 часов до полугода.

Литература:

1. *Астрономический календарь. Постоянная часть.* М., 1981.
2. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. *Курс общей астрономии.* М., 1983.

Для получения зачета необходимо:

1. Уметь продемонстрировать на небесной сфере видимое движение Солнца на различных широтах.
2. Пользуясь подвижной картой, уметь определить местонахождение Солнца в разное время года.
3. Представить преподавателю оформленные необходимые чертежи и расчеты.

Образец заданий

1. Определить наклонение эклиптики по измеренному зенитному расстоянию Солнца в верхней кульминации в дни солнцестояний 22 июня — $19^{\circ}23'$; 22 декабря — $66^{\circ}17'$.
2. По картам звездного атласа найти основные точки эклиптики и определить их экваториальные координаты. Определить названия и границы зодиакальных созвездий, на которые проецируются эти точки.
3. Пользуясь подвижной звездной картой, указать точку эклиптики, в которой Солнце находится в текущий день.
4. Пользуясь небесной сферой, определить полуденную высоту Солнца и азимуты точек восхода и захода его в дни равноденствий и солнцестояний для Витебска.
5. Найти азимуты точек восхода и захода Солнца в день занятий для Минска по формуле:
$$\cos A = -\frac{\sin \delta}{\cos \varphi},$$
 где δ — склонение Солнца, а φ — широта места наблюдения.
6. Определить наклонение эклиптики около 3000 лет назад, если по наблюдениям в ту эпоху в некотором месте полуденная высота Солнца в день летнего солнцестояния равнялась $+63^{\circ}48'$, а в день зимнего солнцестояния — $+16^{\circ}00'$ к югу от зенита.
7. Определить, на каких широтах земного шара Солнце бывает точно в зените.

Примеры выполнения некоторых заданий

1. Найти азимуты точек восхода и захода Солнца в день занятий для Минска по формуле:
$$\cos A = -\frac{\sin \delta}{\cos \varphi},$$
 где δ — склонение Солнца, а φ — широта места наблюдения.

В эфемеридах Солнца находим на указанную дату склонение Солнца. Например, 1 октября $\delta = -3^{\circ}4'$. Широта Минска $53^{\circ}54'$. Подставляя в формулу, получаем: $\cos A = -(\sin (-3^{\circ}4') / \cos (53^{\circ}54')) = 0.09$. Находим $A = \arccos (0.09) = \pm 84^{\circ}8' = \pm 84^{\circ}48'$. Знак “+” относится к точке захода, а знак “-” — к точке восхода. Таким образом, $A_{\text{восхода}} = -84^{\circ}48'$ или $A_{\text{восхода}} = 360^{\circ} - 84^{\circ}48' = 275^{\circ}12'$, а $A_{\text{захода}} = 84^{\circ}48'$.

Лабораторная работа № 5

ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА И КОНФИГУРАЦИИ ПЛАНЕТ

Цель работы: изучение закономерностей в движении планет и вычисление их конфигураций с помощью модели Солнечной системы.

Оборудование: модель Солнечной системы, астрономический календарь (постоянная часть), астрономический календарь-ежегодник.

Вопросы к допуску:

1. Формулировка законов Кеплера.
2. Эклиптическая система координат.
3. Конфигурации планет.

Основные теоретические сведения

Движение планет вокруг Солнца описывается законами Кеплера, которые были сформулированы Иоганном Кеплером так:

1. *Все планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых (общем для всех планет) находится Солнце.*
2. *Радиус-вектор планеты в равные промежутки времени описывает равновеликие площади.*
3. *Квадраты сидерических периодов обращений планет вокруг Солнца пропорциональны кубам больших полуосей их эллиптических орбит.*

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

где T_1, T_2 — сидерические периоды обращений планет, a_1, a_2 — большие полуоси их орбит.

Если большие полуоси орбит выражать в единицах среднего расстояния от Земли до Солнца (в а.е.), а периоды обращений в годах, то для Земли $a = 1$, $T = 1$, и период обращения любой планеты вокруг Солнца равен:

$$T = \sqrt{a^3}.$$

Благодаря работам И. Ньютона получены обобщенные законы Кеплера, которые в настоящее время имеют вид:

1. *Под действием силы притяжения одно небесное тело движется в поле тяготения другого небесного тела по одному из конических сечений — кругу, эллипсу, параболе или гиперболе.*

Эта формулировка подходит для описания движения всех небесных тел: спутников, комет, двойных звезд и др.

2. *Площадь, описанная радиусом вектором за единицу времени есть величина постоянная.*

$$r^2 \frac{d\theta}{dt} = \text{const},$$

где θ — полярный угол (истинная аномалия).

3.

$$\frac{T_1^2 (M_1 + m_1)}{T_2^2 (M_2 + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

где M и m — массы центрального тела и спутника, индексы 1 и 2 относятся к различным парам “тело-спутник”.

В данной работе предполагается проверка третьего закона Кеплера в первом приближении, при этом можно считать орбиты планет круговыми и лежащими в одной плоскости.

При своём движении по орбитам планеты могут занимать различные положения относительно Солнца и Земли. Эти положения называются конфигурации. Конфигурации различаются для нижних и для верхних планет. Нижними являются планеты, находящиеся ближе к Солнцу, чем Земля, верхними — те, которые дальше.

Для нижних планет выделяют конфигурации: нижнее и верхнее соединение с Солнцем, наибольшая западная и восточная элонгации. Слово элонгация означает удаление. Смысл двух элонгаций заключается в том, что если мы будем наблюдать нижние планеты с Земли, то они будут находиться на самом большом угловом расстоянии от Солнца. Когда планета находится в соединении, то она с Земли не наблюдается, так как максимально сближается с Солнцем и теряется в его лучах.

Конфигурации для верхних планет несколько иные. Верхние планеты имеют соединение, противостояние (оппозицию), западную и восточную квадратуру. Смысл этих конфигураций можно понять аналогично, как и для нижних

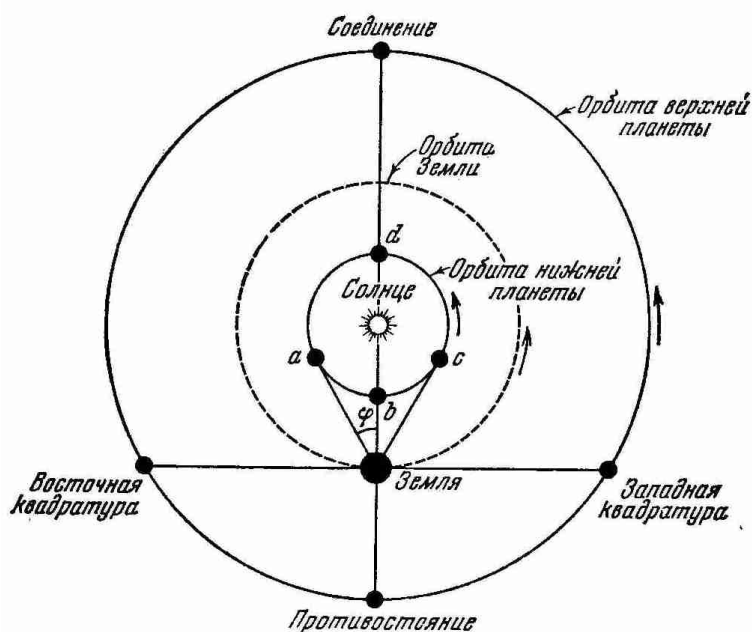


Рис.6
Конфигурации планет

планет. Соединение означает соединение с Солнцем при наблюдении планеты с Земли. Значит, во время нахождения планеты в этой конфигурации, она наблюдаться не может, так как теряется в солнечных лучах. В противостоянии, наоборот, планета будет видна лучше всего, так как противостоит Солнцу, а значит наблюдается на обратной стороне неба. В это время планета ближе всего подходит к Земле и видна почти всю ночь. Нижняя планета находится ближе всего к Земле в момент нижнего соединения и дальше всего в момент верхнего. Верхняя планета приближается в момент противостояния и удаляется в момент соединения.

Прямые и попятные движения планет объясняются различием орбитальных линейных скоростей планеты и Земли, а также различными радиусами орбит планет, и могут быть поняты из рисунка. В нижней части изображена траектория движения планеты на небе, показывающая, как планета делает петлю, а в верхней части видно, что эта петлю кажущаяся, обусловленная тем, что Земля планету догоняет и перегоняет, или же наоборот, планета догоняет и перегоняет Землю.

В движении планет вокруг Солнца выделяют синодический и сидерический периоды обращения.

Синодический период обращения (S) планеты — промежуток времени между её двумя последовательными одноименными конфигурациями.

Сидерический или звёздный период обращения (T) — промежуток времени, в течение которого планета совершает один полный оборот вокруг Солнца по своей орбите.

Сидерический период обращения Земли называется звёздным годом (T_3).

Угловое перемещение по орбите за сутки у планеты $= 360/T$, а у Земли $= 360/T_3$. Разность суточных угловых перемещений планеты и Земли есть видимое смещение планеты за сутки, т.е. $360/S$.

Получаем для нижних планет

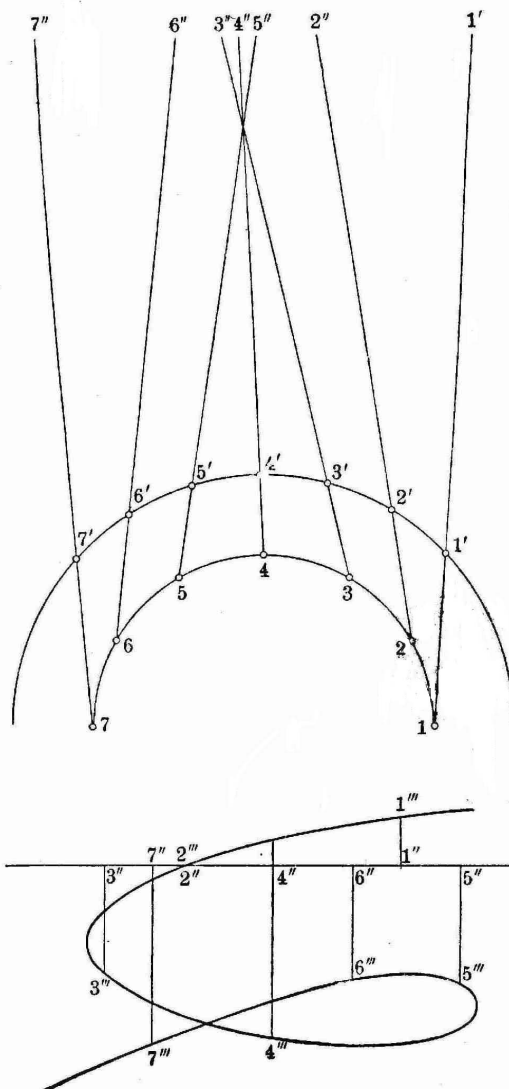


Рис.7

Прямое и попятное движение планеты

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_k}.$$

Для верхних планет:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_k} - \frac{1}{T}.$$

Это уравнения синодического движения.

Непосредственно из наблюдений могут быть определены только синодические периоды обращений планет S и сидерический период обращения Земли. Сидерические же периоды обращений планет вычисляются по уравнению синодического движения.

Продолжительность сидерического периода Земли, или звёздного года равна 365,256 средних солнечных суток.

Взаимное расположение планет легко устанавливается по их гелиоцентрическим эклиптическим координатам, значения которых на различные дни года публикуются в астрономических календарях-ежегодниках, в таблице под названием “Гелиоцентрические долготы планет”.

Центром этой системы координат является центр Солнца, а основным кругом — эклиптика, полюсы которой Π и Π' отстоят от нее на 90° .

Большие круги, проведенные через полюсы эклиптики, называются кругами эклиптических широт, и по ним отсчитывается от эклиптики гелиоцентрическая широта b , которая считается положительной в северном эклиптическом полушарии и отрицательной — в южном эклиптическом полушарии небесной сферы.

Гелиоцентрическая долгота l отсчитывается по эклиптике от точки весеннего равноденствия против часовой стрелки до основания круга широты светила и имеет значения в пределах от 0 до 360° . Из-за малого наклона орбит больших планет к плоскости эклиптики эти планеты всегда находятся вблизи эклиптики, и в первом приближении можно считать их гелиоцентрическую широту $b = 0$. Тогда положение планеты относительно Солнца определяется лишь одной ее гелиоцентрической долготой.

По гелиоцентрической долготе планет легко вычислить дни (даты) наступления различных конфигураций. Пусть в некоторый день года t_1 гелиоцентрическая долгота верхней планеты есть l_1 .

Гелиоцентрическая долгота Земли — l_{01} , n — средняя суточная

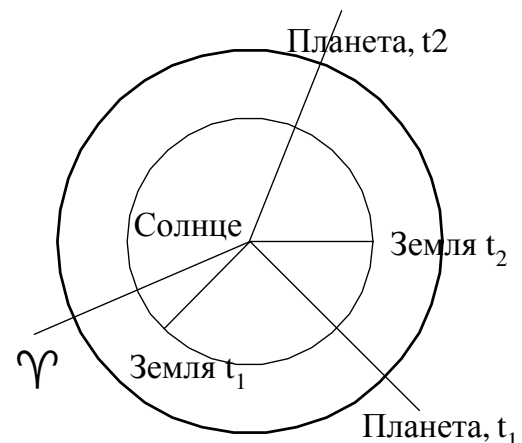


Рис.8
Гелиоцентрические долготы планет

угловая скорость планеты, n_0 — средняя суточная угловая скорость Земли. Верхняя планета движется вокруг Солнца медленнее Земли ($n < n_0$), Земля догоняет планету, и в какой-то день года t_2 , при гелиоцентрической долготе планеты l_2 и Земли l_{02} , наступает искомая конфигурация планеты.

При этом $l_2 = l_1 + n(t_2 - t_1) = l_1 + n\Delta t$. $l_{02} = l_{01} + n_0(t_2 - t_1) = l_{01} + n_0\Delta t$.

Откуда, обозначив $l_2 - l_1 = \Delta l$, $l_{02} - l_{01} = \Delta l_0$, $n_0 - n = \Delta n$, получим

$$\Delta t = \frac{\Delta l_0 - \Delta l}{\Delta n} = \frac{1}{\Delta n}.$$

Тогда $t_2 = t_1 + \Delta t$.

Аналогично вычисляются дни наступления конфигураций нижних планет с учетом того, что нижняя планета движется быстрее Земли.

Наглядно продемонстрировать и проверить расчет момента конфигураций планет можно с помощью модели Солнечной системы. Модель позволяет также осуществить проверку 3-го закона Кеплера.

Планеты на модели располагаются на расстояниях, пропорциональных действительным. Относительные размеры планет также соответствуют действительным.

На поверхности крышки прибора крепятся две шкалы:

- временная, с указанием месяцев года, с ценой деления 5 дней.
- гелиоцентрическая долгот, с ценой деления 5° .

Работа прибора основана на воспроизведении гелиоцентрических движений планет, что позволяет проводить демонстрации движений планет с сохранением их относительных синодических и сидерических периодов обращения.

Включая и выключая двигатель, можно определить взаимное расположение планет и их конфигурации в последующие моменты. При этом следует сравнить данные, получаемые на модели, с данными в астрономическом календаре - ежегоднике.

Рассмотрим, например, работу с прибором при проверке уравнения синодического движения для Марса:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_z} - \frac{1}{T} \quad \text{или} \quad S = \frac{T \cdot T_k}{T - T_k}.$$

Для этого, установив Марс в противостоянии с Землей, например на 1 января, включают двигатель и выключают его в тот момент, когда Марс сделает один оборот, т.е. займет прежнее положение. За один оборот Марса Земля сделает 1 оборот + 321 сутки и остановится на дате 17 ноября, т.е. $365 + 321 = 686$ суток. Следовательно, сидерический период Марса равен 686 земных суток, или 1,88 года.

Далее включают двигатель и следят, когда Марс вновь будет в противостоянии; в этот момент двигатель выключают. Это должно произойти 19 февраля, Земля к этому времени повернется на $(2 \times 365 + 50) = 780$ суток, что соответствует синодическому периоду Марса.

Подставив данные в формулу из уравнения синодического движения, убеждаемся в ее справедливости. Эту же проверку можно осуществить с помощью секундомера, отмечая предварительно время одного оборота Земли, Марса, а затем синодический период. При этом за единицу времени следует брать время оборота Земли.

Аналогично проверяется 3-й закон Кеплера. Расстояния до планет измеряются линейкой, за единицу принимается расстояние от Земли до Солнца.

К зачету необходимо:

1. Знать формулировки законов Кеплера.
2. Уметь различать конфигурации планет.
3. Уметь находить условия видимости планет в различных конфигурациях.
4. Знать уравнение синодического движения.

Образец заданий

1. Считая орбиты планет круговыми, определить гелиоцентрическую долготу Земли и планет по их конфигурациям:
21 марта – Меркурий в нижнем соединении, Венера в наибольшей западной элонгации, Марс в восточной квадратуре, Юпитер в соединении;
22 июня — Меркурий в верхнем соединении, Венера в наибольшей восточной элонгации, Марс в противостоянии, Юпитер в западной квадратуре.
(Сделать схематические рисунки, учитывая масштаб.)
2. С помощью подвижной карты звездного неба определить созвездия, в которых находятся вышеуказанные планеты на данные даты.
3. Используя модель Солнечной системы, установить заданную планету в указанную конфигурацию и определить ее гелиоцентрическую долготу на 1993 год (гелиоцентрическую долготу Земли взять из Астрономического календаря-ежегодника): а) 28 января Меркурий в верхнем соединении;
б) 7 января Марс в противостоянии.
4. По известной дате указанной ниже конфигурации вычислить дату очередной такой же конфигурации планеты: а) 27 декабря Марс в соединении;
б) 23 октября Юпитер в противостоянии.
5. Вычислить синодический период обращения астероида Офелии. $a = 3.13$ а.е.
6. Считая орбиты планет круговыми, определить линейную скорость движения по орбите планет Меркурий, Земля и Юпитер.
7. Определить звездный период обращения Марса, зная, что его синодический период равен 779.94 суток.

8. По точной формулировке третьего закона Кеплера определить массу Юпитера, зная, что расстояние 1-го спутника от Юпитера равно 422000 км, время его обращения вокруг Юпитера 1.77 суток, расстояние от Луны до Земли равно 384000 км, время обращения Луны вокруг Земли 27.32 суток.

Примеры выполнения некоторых заданий

1. Считая орбиты планет круговыми, определить гелиоцентрическую долготу Земли и планет по их конфигурациям: 21 марта – Венера в наибольшей восточной элонгации, Марс в западной квадратуре.

а) С помощью масштабного чертежа и транспортира.

б) С помощью вычислений.

а) Масштабный чертеж – это изображение орбит планет в виде концентрических окружностей, радиусы которых соотносятся как большие полуоси орбит данных планет. В данном случае:

$a_B : a_3 : a_M = 0.72 : 1 : 1.52$ (рис.а).

Допустим, Земля находится в точке T , тогда Венера – в точке V (в наибольшей восточной элонгации), а Марс – в точке M (в западной квадратуре). По условию (21 марта) направление на точку весеннего равноденствия будет проходить через Солнце. А отсчет гелиоцентрической долготы осуществляется от направления на точку весеннего равноденствия по часовой стрелке. Используя транспортир, находим для Земли $l_3 = 180^\circ$, для Венеры $l_B = 136^\circ$, для Марса $l_M = 229^\circ$.

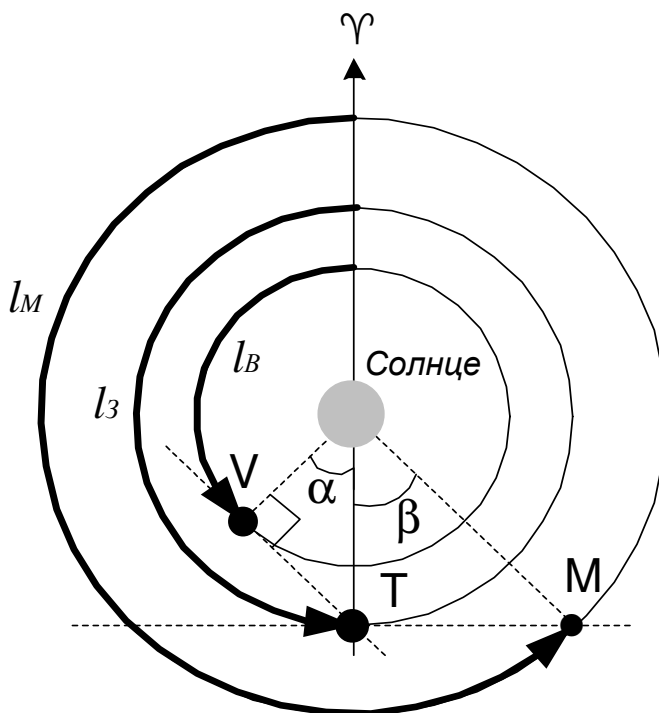


Рис. а.

б) А теперь определим гелиоцентрическую долготу Земли и данных планет с помощью вычислений. По чертежу видно, что для Земли $l_3 = 180^\circ$.

Для Венеры $l_B = 180^\circ - \alpha$, а $\cos(\alpha) = a_B / a_3$, где a_B – большая полуось орбиты Венеры, а a_3 – большая полуось орбиты Земли. Тогда $l_B = 180^\circ - \arccos(a_B / a_3)$. Итак, $l_B = 136^\circ$.

Для Марса $l_M = 180^\circ + \beta$, а $\cos(\beta) = a_3 / a_M$. Тогда $l_M = 180^\circ + \arccos(a_3 / a_M)$. Итак, $l_M = 228^\circ.86$.

Лабораторная работа № 6

ИЗУЧЕНИЕ НЕБОЛЬШИХ ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ

Цель работы: изучение характеристик небольших телескопов.

Оборудование: телескоп-рефрактор школьного типа, телескопы-рефлекторы "Мицар" и "Алькор".

Вопросы к допуску:

1. Назначение телескопа.
2. Виды оптических телескопов.
3. Характеристики телескопов.

Основные теоретические сведения

Оптические телескопы являются основными астрономическими инструментами. Они предназначены для того, чтобы:

1. Собрать как можно больше света от далекого предмета.
2. Создать вблизи от наблюдателя изображение далекого предмета и позволить таким образом различить подробности, недоступные невооруженному глазу.

Существуют весьма сложные системы оптических телескопов, объединенные в три группы:

- линзовые телескопы-рефракторы;
- зеркальные телескопы-рефлекторы;
- зеркально-линзовые.

В рефракторах свет собирается объективом, состоящим из линз. В рефлекторах объективом служит вогнутое зеркало, которое называется главным зеркалом.

В зеркально-линзовых телескопах одновременно применяются линза и зеркало.

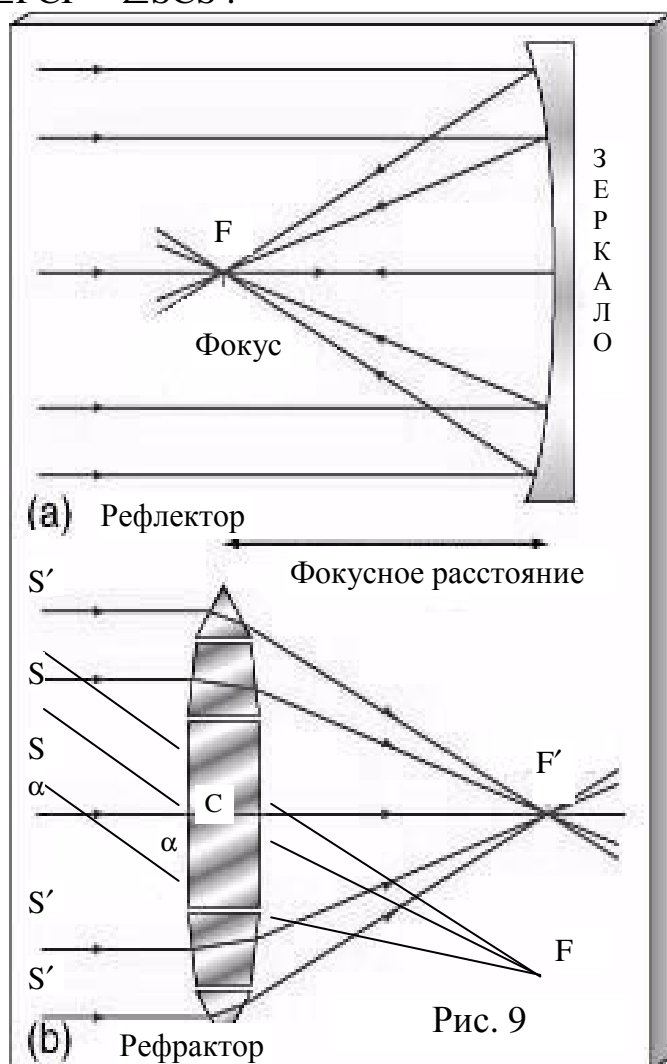
При визуальном наблюдении в фокальной плоскости объектива устанавливается окуляр — короткофокусная система линз.

Вместо окуляра можно установить чувствительный приемник излучения: фотопластинку, ФЭУ и т.д.

Фокусное расстояние F . Пусть линза (рис.9) есть объектив, на который падают лучи от звезды. Прямая, проведенная через центры кривизны обеих поверхностей объектива, будет его главной оптической осью; в точке F' расположен главный фокус.

На рисунке 9 показаны лучи, идущие от другой звезды, находящейся в стороне от главной оси. Изображение этой звезды окажется в стороне от главной оси в точке F' , лежащей в фокальной плоскости. Из чертежа ясно, что если смотреть из центра объектива, то угловые расстояния между небесными тела-

ми (или между двумя точками одного тела) и их изображениями равны, т.к. $\angle FCF' = \angle SCS'$.



Обозначив эти углы буквой α , мы можем написать уравнение:

$$FF' = F'C \operatorname{tg} \alpha.$$

Ввиду малости угла α : $\operatorname{tg} \alpha = \alpha$. Тогда $FF' = F'C \alpha$, где α выражается в радианах. Из этого уравнения следует, что одному и тому же угловому расстоянию на небе будет соответствовать тем большее изображение FF' , чем большее расстояние $F'C$, т.е. фокусное расстояние объектива.

Фокусное расстояние F объектива можно найти, воспользовавшись формулой тонкой линзы. Поместив предмет (например, лампу накаливания) на расстоянии 5-10 м от объектива, находят изображение (например, спирали на тонком листе бумаги, расположенном в месте нахождения окуляра). Далее, измерив расстояния от объектива до предмета (d) b и расстояние от объектива до изображения (f), подставляют в формулу и находят фо-

кусное расстояние F .

Диаметр входного отверстия D . Диаметр входного отверстия D объектива, т.е. его рабочей части, не закрытой оправой, определяет количество света, которое пропорционально D^2 .

Проницающая сила телескопа. Видимая звездная величина наиболее слабой звезды, доступной телескопу, определяет его проницающую силу. У зрачка глаза человека при наблюдении ночного неба диаметр $d = 6$ мм, и для человека со средним зрением доступны наблюдению звезды до $6^m,5$ видимой звездной величины. Объектив диаметром D мм собирает света в $(D/d)^2$ раз больше, и поэтому в него видны звезды во столько же раз более слабые. Видимая звездная величина таких звезд определяется формулой Погсона:

$$m_t = m + 5 (\lg D - \lg d), \text{ откуда}$$

$$m_t = 5 \lg D + 2,1.$$

Диаметр выражен в мм. В таблице приводятся приближенные значения проницающей силы телескопа с различными входными отверстиями.

Диаметр входного отверстия мм.	50	70	100	140	200	250	500	1000
Проницающая сила телескопа	5 ^m 0	10.3	11.1	11.9	12.6	13.4	13.9	16.9

Относительное отверстие А. Важнейшей величиной, характеризующей объектив, является отношение диаметра входного отверстия объектива к его фокусному расстоянию, которое называется относительным отверстием.

$$A=D/F.$$

Количество света, собранное объективом от звезды (точечного источника), будет зависеть только от входного отверстия ($\sim D^2$). Иначе обстоит дело с объектами, имеющими заметные угловые размеры, например с планетами. В этом случае видимая яркость изображения будет уменьшаться, в то время как при наблюдении точечных объектов увеличивается $\sim D^2$. В самом деле, при увеличении фокусного расстояния F пропорционально увеличиваются и линейные размеры изображения такого светила. При этом количество света, собираемое объективом при неизменном D , остается прежним. Одно и то же количество света распределяется, следовательно, на большую площадь изображения, которое растет $\sim F^2$. Таким образом, при увеличении F (или, что то же: при уменьшении A) вдвое, площадь изображения увеличивается вчетверо. Количество света на единицу площади, которое определяет яркость изображения, уменьшается в том же отношении. Поэтому изображение будет тускнеть при уменьшении относительного отверстия.

Совершенно такое же действие окажет и окулярное увеличение, понижающее яркость изображения в том же отношении, что и уменьшение относительного отверстия A объектива.

Поэтому для наблюдения самых протяженных объектов (туманностей, комет) предпочтительно слабое увеличение, но, конечно, не ниже наименьшего полезного. Оно может быть значительно повышено при наблюдении ярких планет и в особенности Луны.

Увеличение телескопа. Если обозначить фокусное расстояние объектива через F и фокусное расстояние окуляра через f , то увеличение M определится формулой:

$$M = F/f.$$

Увеличение, даваемое телескопом, можно оценить, глядя на предмет одним глазом через телескоп, а другим – непосредственно.

Тогда увеличение телескопа:

$$M = B / b,$$

где B – размер изображения, b – размер предмета.

Можно найти увеличение телескопа, используя метровую линейку с дециметровыми делениями. Для этого необходимо линейку поместить от телескопа на расстояние порядка 10 м и получить четкое изображение части предмета (линейки). Глядя одновременно одним глазом на изображение, другим – на предмет, выбрать на изображении несколько делений (n') и определить, скольким делениям (n) на предмете они соответствуют. В этом случае:

$$M = n / n'.$$

Наибольшее допускаемое увеличение при спокойном состоянии атмосферы не превышает $2D$, где D — диаметр входного отверстия.

Диаметр выходного зрачка. Наблюдаемый предмет виден в телескоп отчетливо лишь в том случае, если окуляр установлен на строго определенном расстоянии от фокуса объектива. Это такое положение, при котором фокальная плоскость окуляра совмещена с фокальной плоскостью объектива. Приведение окуляра в такое положение называется наводкой на фокус или фокусировкой. Когда телескоп наведен на фокус, то лучи от каждой точки предмета выходят из окуляра параллельными (для нормального глаза). Световые лучи от изображений звезд, образованные в фокальной плоскости объектива, превращаются окуляром в параллельные пучки.

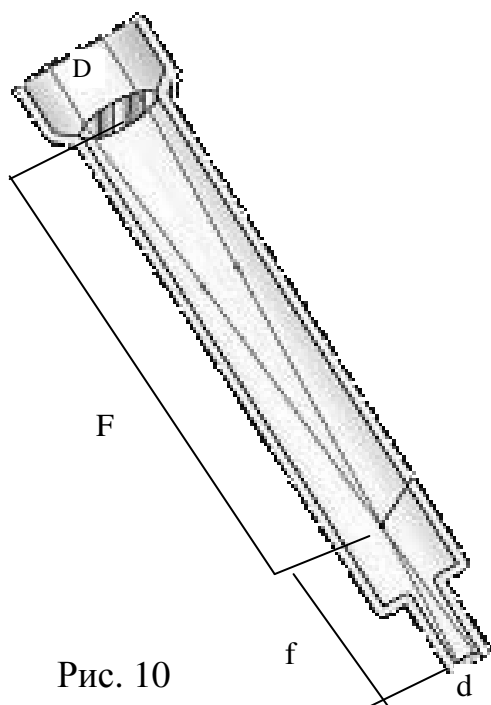


Рис. 10

Площадка где пересекаются световые пучки звезд, называется *выходным зрачком*. Наведя телескоп на светлое небо, мы легко можем увидеть выходной зрачок, поднеся к окуляру экран из кусочка белой бумаги. Приближая и удаляя этот экран, мы найдем такое положение, при котором светлый кружочек имеет наименьшие размеры и в то же время наиболее отчетлив. Легко понять, что выходной зрачок есть не что иное, как изображение входного отверстия объектива, образованное окуляром. Из рисунка 10 видно, что

$$\frac{D}{d} = \frac{F}{f} = M \Rightarrow d = \frac{D}{M}.$$

Последнее отношение позволяет определить увеличение, даваемое телескопом, если не известны ни фокусное расстояние

объектива, ни фокусное расстояние окуляра.

В выходном зрачке концентрируется весь свет, собираемый объективом. Поэтому, заслоняя часть выходного зрачка, мы как бы заслоняем часть объектива. Отсюда вытекает одно из важнейших правил: *выходной зрачок не должен быть больше зрачка глаза наблюдателя, иначе часть света, собранная объективом, будет потеряна.*

Из определения выходного зрачка следует, что величина его тем меньше и он тем ближе к окуляру, чем короче фокусное расстояние окуляра (чем "сильнее" окуляр), и наоборот.

Определим увеличение, которое дает окуляр, образующий выходной зрачок, равный зрачку глаза (наименьшее полезное или равнозрачковое увеличение m):

$$m = D/\delta,$$

где δ — диаметр зрачка глаза или

$$m = \frac{D}{d} = \frac{F}{f};$$

$$f = \frac{f \cdot \delta}{D}.$$

При рассмотрении изображения в фокусе объектива невооруженным глазом, без окуляра, с расстояния ясного зрения мы сможем использовать отверстие объектива лишь в том случае, если его относительное отверстие A не превышает 1:40, т.к. глаз будет находиться на расстоянии 25 см позади фокуса объектива. В самом деле, приняв $\delta = 6$ мм, имеем:

$$\frac{1}{A} = \frac{f}{\delta} = \frac{256}{6} = 42,$$

т.к. диаметр зрачка глаза меняется от 6-8 мм (при полной темноте) до 2 мм (при ярком дневном освещении), то наименьшее полезное увеличение будет различно при разных условиях и при наблюдении предметов различной яркости. Положим, что наблюдается слабый объект (туманность) в темную ночь в телескоп с $D = 100$ мм. Принимая $\delta = 6$ мм, имеем: $m = 100/6 = 16.7$.

При наблюдении днем, например, Венеры с тем же объективом увеличение m повысилось бы по крайней мере втрое, т.е. до 50, т.к. $\delta = 2$ мм.

Фокусное расстояние нужных в этих случаях окуляров легко найти по формулам:

$$f = \frac{\delta}{A} = \frac{F}{m}.$$

Если у нашего телескопа $1/A = 15$ (обычное отношение у рефракторов), то фокусное расстояние слабейшего полезного окуляра будет в случае ночного наблюдения туманности равно $15 \cdot 6 = 90$ мм, а для дневных наблюдений Венеры $15 \cdot 2 = 30$ мм.

Величина поля зрения. Угол, под которым диафрагма окуляра видна наблюдателю, называется *угловым полем зрения* окуляра, в отличие от углового поля зрения телескопа, представляющего угловой поперечник видимого в телескоп кружка на небе. Если бы в окуляре не было диафрагмы, то поле зрения ограничилось бы оправой его передней линзы, т.к. оправа находится не в фокальной плоскости объектива, то лучи от объектов, находящихся достаточно далеко от оптической оси, частично заслонялись бы ею и, следовательно, предметы, находящиеся у края поля зрения телескопа, выглядели бы тусклее, чем центральные. Такое частичное преграждение света, вызывающее снижение яркости на краю поля зрения, называется *виньетированием*. Во избежание этого диафрагма окуляра, называемая *диафрагмой поля*, помещается так, чтобы она

совпала с фокальной плоскостью объектива. Все, что попадает в отверстие диафрагмы, будет посылать весь свой свет в глаз наблюдателя.

Величина поля зрения телескопа равна величине поля зрения окуляра, деленной на увеличение.

При обычном окуляре с полем зрения в 40° при увеличении в 40 раз действительное поле зрения телескопа будет равно 1° . Телескоп с фокусным расстоянием в 1600 мм, снабженный таким окуляром с фокусным расстоянием в 20 мм, будет обладать полем зрения в $30'$. Тот же окуляр, примененный к 30-дюймовому пулковскому рефрактору ($F = 14,06$ м), даст увеличение в 703 раза, и его поле зрения будет $40^\circ/703 \sim 3.4'$ (5 поперечников Юпитера).

Разрешающая способность телескопа. Из-за явления дифракции на краях объектива звезды видны в телескоп в виде дифракционных дисков, окруженных несколькими кольцами убывающей интенсивности. Угловой диаметр дифракционного диска:

$$\Theta = \lambda/D,$$

где λ — длина световой волны и D — диаметр объектива.

Если диаметр объектива выражен в мм, длина волны в нм а разрешающая способность — в секундах дуги, то последняя формула примет вид:

$$\Theta = 0.25 \lambda / D.$$

Два точечных объекта с видимым угловым расстоянием Θ находятся на пределе раздельной видимости, что определяет теоретическую разрешающую способность телескопа. Атмосферное дрожание снижает разрешающую способность телескопа до:

$$\Theta = 1.22 \lambda / D.$$

Разрешающая способность определяет возможность различить два смежных объекта на небе. Телескоп с большей разрешающей способностью позволяет лучше увидеть два близко расположенных друг к другу объекта, например компоненты двойной звезды.

Лучше также можно увидеть детали любого одиночного объекта.

Рисунок 11 иллюстрирует, как вид двух близлежащих объектов мог бы изменяться с увеличением разрешающей способности телескопа.

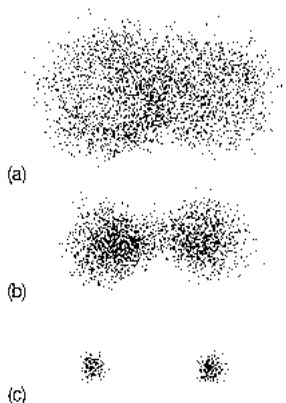


Рис. 11

Когда угловая разрешающая способность мала, объекты выглядят как одиночное размытое пятно. С увеличением разрешающей способности два источника света станут различимыми как отдельные объекты.

Литература:

1. *Астрономический календарь. Постоянная часть.* М., 1981.
2. *Сикорук Л.Л. Телескопы для любителей астрономии.* М., 1982.
3. *Цесевич В.П. Что и как наблюдать на небе.* М., 1979.

К зачету необходимо:

1. Знать характеристики объектива и телескопа.
2. Уметь объяснить их назначение.
3. Уметь находить увеличение, фокусное расстояние, выходной зрачок и разрешающую способность телескопа.
4. Уметь дать сравнительный анализ возможностей телескопов: рефрактора школьного, рефлекторов "Мицар" и "Алькор".

Образец заданий

1. Определить диаметр объектива данного телескопа.
2. Определить фокусное расстояние телескопа.
3. Определить относительное отверстие телескопа.
4. Определить возможные увеличения телескопа с предложенными окулярами.
5. Определить проникающую силу телескопа.
6. Определить диаметр выходного зрачка телескопа с предложенным окуляром.
7. Определить разрешающую способность телескопа для длины волны, к которой более чувствителен глаз $\lambda = 0,555$ мкм по формуле:

$$\theta = \frac{140}{D} (").$$

8. Определить поле зрения телескопа по формуле:

$$W = \frac{w}{M},$$

где w — поле зрения окуляра, M — увеличение телескопа.

Лабораторная работа № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ И УСЛОВИЙ ВИДИМОСТИ ПЛАНЕТ

Цель работы: изучить положение планет на небе в заданный период времени, определить условия видимости и наблюдений заданной планеты.

Оборудование: IBM - совместимый компьютер типа XT/AT 286 и выше, с монитором не хуже EGA 256 К, DOS версии не ниже 3.0, пакет программ ASTRONOM, звездная карта зодиакальных созвездий, подвижная карта звездного неба.

Вопросы к допуску:

1. Условия видимости планет.
2. Подвижная карта звездного неба.

Основные теоретические сведения

Мы наблюдаем движение планет Солнечной системы с движущейся вокруг Солнца Земли и это приводит к ряду особенностей в их видимых перемещениях на небе. Траектории движения планет проецируются на неподвижные звезды. Планеты, как и Солнце, движутся только по зодиакальным созвездиям, постоянно пересекая эклиптику, но никогда сильно не удаляются от нее.

Хорошие условия для наблюдений имеют только те планеты, которые находятся на значительном удалении от Солнца, при проекции их положений на эклиптику.

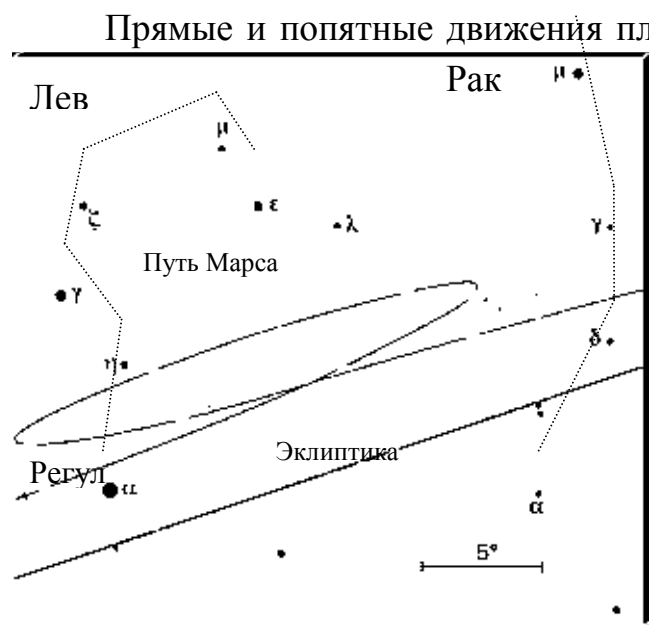
Меркурий и Венера, имеющие свои орбиты внутри орбиты Земли, никогда не отходят далеко от Солнца. Меркурий может удалиться на 28⁰, Венера – на 48⁰. Поэтому условия для наблюдения Меркурия редко бывают благоприятными. Он почти все время теряется в лучах Солнца. Венера видна всегда перед восходом Солнца или сразу после его захода. Различают периоды утренней и вечерней видимости Венеры. Некоторые древние народы, которые слабо знали астрономию, считали, что это два разных светила и называли Венеру Утренней и Вечерней звездой, в зависимости от того, когда она наблюдалась.

Внешние планеты, т.е. имеющие орбиты за орбитой Земли, удаляются от Солнца, в проекции на эклиптику, в любых пределах. Однако бывают времена, когда Солнце проходит по тем же зодиакальным знакам, где в данный момент находится та или иная планета. В этот период условия для наблюдения планеты

неблагоприятные, потому что она бывает на видимой части неба днем и теряется в ярких лучах Солнца.

Планеты обладают разной скоростью движения. Самые быстрые — Меркурий, Венера, Марс. Планеты, находящиеся далеко от Солнца, движутся медленно. К ним относятся: Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон. Так, Меркурий имеет сидерический период обращения 87,97 суток, значит один зодиакальный знак он проходит примерно за неделю. Юпитер же, с сидерическим периодом 11,86 лет, будет двигаться по одному знаку около года.

Планеты движутся прямо, в направлении движения Солнца по эклиптике, потом замедляют свой ход, останавливаются и движутся в противоположном направлении. Через какое-то время направление движения снова меняется. Эти движения называются прямыми и попятными. Древние астрономы называли планеты из-за их сложного движения "блуждающими светилами".



Прямые и попятные движения планет объясняются различием орбитальных линейных скоростей планеты и Земли. При этом планеты имеют петлеобразные траектории. Размер петли зависит от отношения радиусов орбит планеты и Земли. У Юпитера угловой размер петли около 11° , а у Плутона — всего 3° .

При некоторых положениях Земли и планеты, которые можно заранее вычислить, диск планеты проектируется на яркий диск Солнца. Происходит явление прохождения планеты по диску Солнца. У Меркурия такие прохождения бывают часто, в среднем одно за 15 лет. У Венеры прохождения по диску Солнца случаются реже. Ближайшее произойдет в 2004 году. Сведения о прохождениях даются в астрономических календарях.

Фаза планеты измеряется отношением площади освещенной части видимого диска ко всей его площади. Угол между направлением с планеты на Солнце и Землю называется фазовым углом. При фазовом угле $\psi = 180^\circ$ планета находится между Солнцем и Землей, фаза равна нулю, планета не освещена совсем.

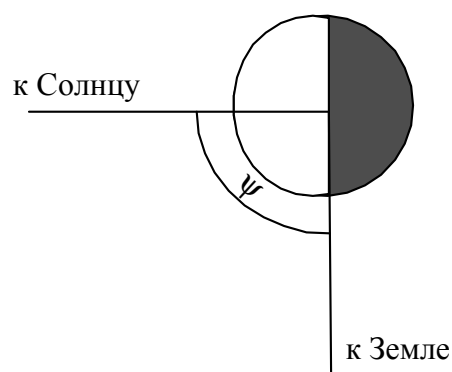


Рис.12
Фазовый угол планеты 39

При фазовом угле $\psi = 0^\circ$ Земля и Солнце находятся по одну сторону от планеты, фаза равна 1, видимый диск планеты освещен полностью.

Связь между фазой и фазовым углом:

$$\Phi = \cos^2 \frac{\Psi}{2}.$$

Для нижних планет фазовый угол изменяется от 0 до 180° . Для Марса — не более $48^\circ,3$, для Юпитера — 11° , для остальных меньше 11° . Для верхних планет фаза близка к 1.

В среднем планета становится видимой при удалении от Солнца на угол не менее 10° в весеннее и осеннее время и на угол 15° – в зимнее и летнее время года. Поэтому в первом приближении, считая орбиты планет круговыми, можно рассчитать угловое удаление планеты от Солнца, т.е. будет планета наблюдаема в данный момент или нет.

Литература:

1. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. М., 1983.
2. Уипл Ф.Л. Семья Солнца. М., 1984.
1. Цесевич В.П. Что и как наблюдать на небе. М., 1979.

Образец заданий

1. С помощью программного пакета ASTRONOM определить экваториальные координаты Меркурия (15-20 опорных точек) с 1 октября по 1 декабря 1999 года и Юпитера с 1 августа 1999 года по 1 декабря 2000 года.
2. Нанести по полученным координатам опорные точки на звездную карту зодиакальных созвездий и построить траекторию видимого движения планеты, отмечая даты нахождения планеты в данных точках.
3. Провести анализ полученной траектории. Отметить: даты прямого и попятного движения; созвездия и яркие звезды, среди которых лежит путь планеты, даты максимального углового удаления от Солнца.
4. Определить, в каких конфигурациях находится планета в указанный период.
5. С помощью масштабного чертежа, считая орбиты планет круговыми, определить, наблюдаемы ли 20 декабря планеты, если они ранее были в следующих конфигурация:
 - а) 15 июня Венера в нижнем соединении;
 - б) 10 мая Юпитер в противостоянии.

6. С помощью подвижной карты звездного неба определить, в какое время суток и в каком направлении наблюдаема Венера в наибольшей восточной элонгации.
7. Используя программный пакет ASTRONOMY LAB, определить даты наилучшей видимости вышеуказанных планет с 1 сентября по 31 декабря текущего года. Найти для данных дат моменты восхода и захода планет, угловое удаление от Солнца, расстояние от Земли и видимую звездную величину.

Примеры выполнения некоторых заданий

1. С помощью масштабного чертежа, считая орбиты планет круговыми, определить, наблюдаемы ли 1 сентября планеты, если они ранее были в следующих конфигурациях: а) 1 декабря Венера в верхнем соединении; б) 1 декабря Марс в западной квадратуре.

Определить, будут ли наблюдаемы 1 сентября планеты, можно при помощи масштабного чертежа и транспортира. Чертеж в масштабе обозначает изображение орбит планет в виде концентрических окружностей, радиусы которых соотносятся как большие полуоси орбит данных планет (рис.а).

Допустим, 1 декабря Земля находилась в точке T_1 , тогда Венера – в точке V_1 , а Марс – в точке M_1 . Спустя 9 месяцев (точнее 274 суток) Земля пройдет по своей орбите ($l = n \times \Delta t$, где n – средняя угловая скорость орбитального движения, Δt – время движения.) $0^\circ.9856 \times 274 \approx 270^\circ$ и окажется в точке T_2 , Венера пройдет $1^\circ.6021 \times 274 \approx 439^\circ$ (точка V_2), а Марс – $0^\circ.524 \times 274 \approx 143^\circ.5$ (точка M_2). Теперь, измерив угол $\angle V_2T_2S$ ($\Delta\lambda_V$) и угол $\angle M_2T_2S$ ($\Delta\lambda_M$), можно в первом приближении говорить о видимости этих планет на данную дату.

Итак, $\Delta\lambda_V \approx 34^\circ$, а $\Delta\lambda_M \approx 65^\circ$, т.е. в данном случае обе планеты наблюдаемы.

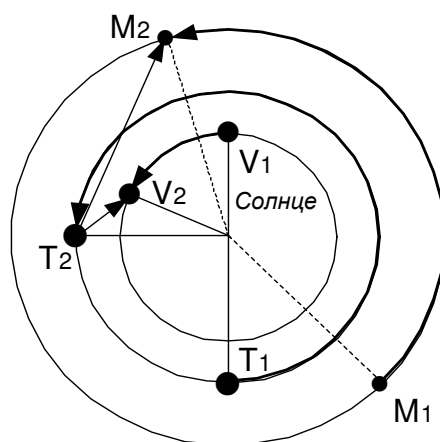


Рис. а.

Лабораторная работа № 8

СПЕКТРЫ И СВЕТИМОСТЬ ЗВЕЗД

Цель работы: изучение классификации звездных спектров, диаграммы Герцшпрунга-Рессела, определение светимостей звезд.

Оборудование и пособия: IBM - совместимый компьютер типа XT/AT 286 и выше, с монитором не хуже EGA 256 К, DOS версии не ниже 3.0, пакет программ ASTRONOM, астрономический календарь (постоянная часть), щелевые спектрограммы звезд.

Вопросы к допуску:

1. Гарвардская классификация звездных спектров.
2. Диаграмма Герцшпрунга-Рессела.

Основные теоретические сведения

Спектральная классификация. Звездные спектры позволяют изучать физические характеристики звезд и судить о процессах, происходящих в их недрах.

Звезды имеют непрерывные спектры, на которые накладываются темные и яркие спектральные линии. Различия спектров звезд заключаются в количестве и интенсивности наблюдаемых спектральных линий, а также в распределении энергии в непрерывном спектре.

Часть лучей, проходящих через атмосферу звезды, поглощается, причем это поглощение может быть непрерывным, когда ослабляется некоторый более или менее протяженный участок спектра, и избирательным, когда поглощаются узкие участки спектра.

Спектры большинства звезд удалось расположить в виде последовательности, вдоль которой линии одних химических элементов постепенно ослабевают, а других — усиливаются. Сходные между собой спектры объединяются в спектральные классы. Тонкие различия между ними позволяют выделить подклассы.

Звезды, принадлежащие различным спектральным классам, отличаются своими температурами.

Эта классификация была впервые применена на Гарвардской обсерватории в начале XX века. Позднее Гарвардская классификация дополнялась, видоизменялась и сегодня — это сложная схема с множеством индексов и подразделов. В результате работы гарвардских астрономов появился “Каталог Генри Дрэпера”, содержащий спектральные характеристики 225 320 звезд северного и

южного полушария неба и включающий практически все звезды до 9 зв. величины.

В Гарвардской классификации спектральные типы обозначены буквами латинского алфавита

		WN				C	R - N
Q -	P -	W -	O -	B -	A -	F -	G -
		WC					K -
							S
							M.

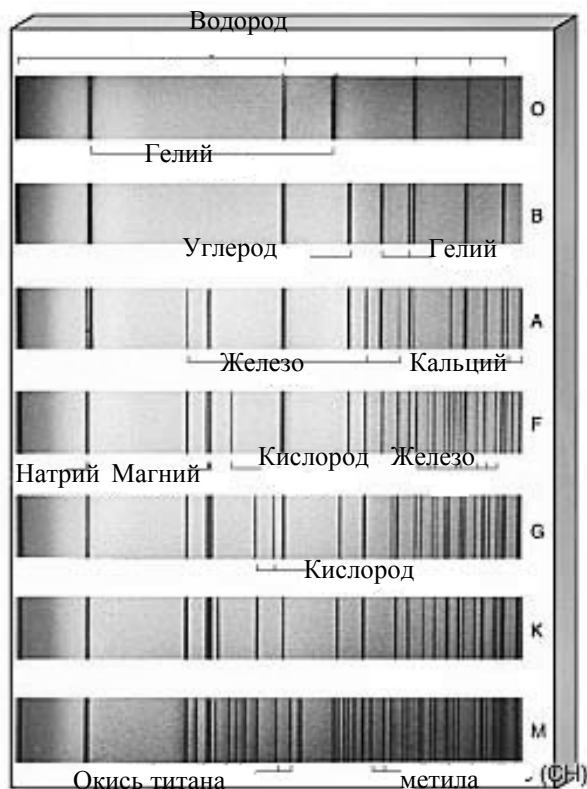


Рис. 13
Спектры

Класс О. Большая интенсивность ультрафиолетовой области свидетельствует о высокой температуре. Свет этих звезд кажется голубоватым. Наиболее интенсивны линии ионизованного гелия и, многократно ионизованных, углерода, кремния, азота, кислорода. Есть слабые линии нейтрального гелия и водорода. Температура фотосферы - 30 000 К.

Класс В. Наибольшую интенсивность имеют линии нейтрального гелия. Хорошо видны линии водорода. Цвет голубовато-белый. Температура - 20 000 К. Типичная звезда — Спика.

Класс А. Линии водорода достигают наибольшей интенсивности. Хорошо видны линии ионизованного кальция. Цвет белый. Температура — 10 000 К. Типичные звезды — Вега, Сириус.

Класс F. Линии водорода ослабевают. Усиливаются линии ионизованных металлов (кальция, железа, титана). Цвет желтоватый. Температура — 7 000 К. Типичная звезда — Прокцион.

Класс G. Очень интенсивны линии ионизованного кальция. Цвет желтый. Температура — 6 000 К. Типичная звезда — Солнце.

Класс К. Фиолетовый конец ослаблен, что свидетельствует о сильном уменьшении температуры. Цвет красноватый. Температура — 4 000 К. Типичные звезды — Арктур, Альдебаран.

Класс М. Линии металлов ослабевают. Спектр пересечен полосами поглощения молекул окиси титана и других молекулярных соединений. Цвет красный. Температура — 3 000 К. Типичная звезда — Бетельгейзе (альфа Ориона).

Кроме основных классов есть ответвления от классов G и K, представляющие собой звезды с аномальным химическим составом, отличающимся от химического состава большинства других звезд.

Класс C. Содержит углеродные звезды. В спектрах выделены линии поглощения атомов и полос поглощения молекул углерода.

Класс S. Циркониевые звезды. Вместо полос окиси титана присутствуют полосы окиси циркония.

В классах R и N заметны различные молекулярные соединения.

Буквой Q обозначаются спектральные классы новых звезд.

Буквой P обозначаются спектральные классы спектров планетарных туманностей.

Буквой W обозначаются спектры звезд типа Вольфа-Райе — очень горячие звезды, в спектрах которых много эмиссионных линий.

В спектрах звезд WN видны спектральные линии азота.

В спектрах звезд WC видны спектральные линии углерода. Температуры фотосфер этих звезд очень высоки: от 60 000 до 100 000 К.

Внутри каждого спектрального класса можно установить плавную последовательность подклассов, переходящих из одного в другой. Каждый класс (кроме O) делится на 10 подклассов, обозначаемых цифрами от 0 до 9, которые ставятся после буквы.

Спектральный класс O делится на подклассы от O4 до O9,5.

После таких обозначений ставятся разные значки, если спектр обладает особенностями. Если присутствуют эмиссионные линии, ставится буква e. Звезды-сверхгиганты часто отличаются глубокими узкими линиями. Это отмечается буквой s (сF0). Давление газа в той области звездной оболочки, где образуются спектральные линии, влияет на их ширину. При малой плотности и малом давлении спектральные линии тонкие и резко очерченные. Эта особенность указывает на высокую светимость.

Интенсивность избранных линий поглощения позволяет судить о светимости звезды, является она гигантом или карликом. В первом случае перед спектральным классом ставится индекс g (гигант), во втором — d (карлик). Другие особенности, нетипичные для данного класса обозначаются буквой p (pecular) — пекулярные спектры (A5p).

Осевое вращение звезд приводит к расширению и размыванию спектральных линий. Поэтому введены индексы n — диффузные линии, и s — резкие линии, они пишутся рядом с обычным символом спектрального класса.

Сравнивая спектрограмму звезды со стандартными звездными спектрами, можно установить подкласс звезды и приблизительно оценить ее температуру.

Различия в деталях спектров одного и того же подкласса позволяют оценить светимость звезд. *Светимостью* называется поток энергии, излучаемый звездой по всем направлениям.

$$\lg(L_3/L_c) = 0,4 (M_c - M_3),$$

где M_c и M_z — абсолютные звездные величины Солнца и любой звезды соответственно, а L_c и L_z — их светимости. Обычно светимость Солнца принимается равной единице и светимости звезд выражаются в единицах светимости Солнца. Тогда:

$$\lg L_z = 0,4 (M_c - M_z).$$

Абсолютную звездную величину звезды можно найти по формуле.

$$M = m + 5 - \lg r.$$

А если она известна, можно найти расстояние до звезды.

$$\lg r = \frac{m - M}{5} + 1$$

Разность между фотографической и визуальной звездными величинами называется *показателем цвета* C .

$$C = m_{\text{фот}} - m_{\text{виз}} = M_{\text{фот}} - M_{\text{виз}}.$$

Температура может быть найдена по формуле:

$$T = \frac{7200^0}{C + 0,64}.$$

Помимо Гарвардской классификации была разработана еще спектральная классификация звезд по светимостям. Она называется Йеркская классификация или “классификация МКК” по имени разработчиков — Моргана, Кинана и Колльмана.

В этой классификации оставлены спектральные классы Гарвардской классификации, но введено понятие о классе светимости, который определяется по виду и относительной интенсивности некоторых избранных для этой цели спектральных линий. Класс светимости — это характеристика абсолютной звездной величины.

Ia — яркие сверхгиганты (светимость около 10 000).

Iab — промежуточные сверхгиганты.

Ib — слабые сверхгиганты (светимость 5 000).

II — яркие гиганты.

III — слабые (нормальные) гиганты.

IV — субгиганты.

V — главная последовательность (до спектрального класса F — гиганты, после — карлики)

VI — субкарлики.

VIIa и VIIb — белые карлики.



Рис.14
Диаграмма
Герцшпрунга-Рассела

Диаграмма Герцшпрунга-Рассела. В 1905 году Эйна́р Герцшпру́нг и в 1910 году Генри Рассел установили существование зависимости между видом спектра и светимостью звезд.

Эта зависимость иллюстрируется графиком, по одной оси которого откладывается спектральный класс, по другой — абсолютная звездная величина. Эта диаграмма называется *диаграммой спектр-светимость* или *диаграммой Герцшпрунга-Рассела*.

Положение каждой звезды на диаграмме определяется ее физической природой и стадией эволюции. Поэтому на диаграмме запечатлена вся история рассматриваемой системы звезд.

Диаграмма позволяет выделить различные группы звезд, объединенные общими физическими свойствами, и установить зависимость между некоторыми их физическими характеристиками. С помощью диаграммы можно исследовать химический состав и эволюцию звезд.

Верхняя часть диаграммы соответствует звездам большой светимости, которые при данном значении температуры отличаются большими размерами. Здесь располагаются гиганты и сверхгиганты.

Нижняя часть диаграммы занята звездами малой светимости. Здесь находятся карлики.

В левой части располагаются горячие звезды более ранних спектральных классов, а в правой — более холодные звезды, соответствующие более поздним спектральным классам.

Диагональ идущая слева вниз направо, называется главной последовательностью. Вдоль нее расположены звезды, начиная от самых горячих до наиболее холодных.

Литература:

1. *Астрономический календарь. Постоянная часть.* М. 1981.
2. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. *Курс общей астрономии.* М., 1983.
3. Цесевич В.П. *Что и как наблюдать на небе.* М., 1979.

Для получения зачета необходимо:

1. Знать основные спектральные классы звезд.
2. Уметь работать с диаграммой Герцшпрунга - Рассела.
3. Выполнить задания.

Образец заданий

1. Классифицировать сфотографированные щелевым спектрографом предложенные спектры звезд.

2. Вычислить расстояние, абсолютную визуальную и фотографическую величину предложенных звезд по формулам, приведенным в описании.
3. Найти значения абсолютной звездной величины и светимости предложенных звезд с помощью программного пакета ASTRONOM.
4. Изучить положение этих звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рассела, определить, к каким классам светимости они относятся.
5. Перейти к диаграмме “спектр-масса”, найти значение массы, радиуса и плотности.
6. Пользуясь нижеприведенной таблицей, построить график зависимости между показателем цвета и температурой звезд, указав на том же графике основные спектральные классы.

Шкала эффективных температур звезд

Спектр	Показатель цвета	Эффективная температура
O 5	- 0,45	35 000°
B 0	- 0,31	21 000°
B 5	- 0,117	13 500°
A 0	0,00	10 000°
A 5	+ 0,16	8 100°
F 0	+ 0,30	7 200°
F 5	+ 0,45	6 500°
G 0	+ 0,57	6 000°
G 5	+ 0,70	5 400°
K 0	+ 0,84	4 700°
K 5	+ 1,11	4 000°
M 0	+ 1,39	3 300°
M 5	+1, 61	600°

7. По полученной в предыдущем задании зависимости определить показатель цвета и вычислить абсолютную видимую и фотографическую звездную величину предложенной звезды.

Лабораторная работа № 9

КРАТНЫЕ ЗВЕЗДЫ

Цель работы: определение блеска, светимости и расстояния между звездами в двойной системе.

Оборудование и пособия: астрономический календарь (постоянная часть), калькулятор.

Вопросы к допуску:

1. Типы кратных звездных систем.
2. Характеристики затменно-переменных и спектрально-двойных звездных систем.

Основные теоретические сведения

Двойные и кратные звезды. Наблюдения показывают, что некоторые звезды объединены в физически связанные между собой пары. Они называются *физическими* двойными звездами.

Существуют также случайные объединения звезд, когда кажется, что звезды образуют пару вследствие эффекта проекции двух физически не связанных объектов. Такие пары называются *оптическими*.

Двойные звезды встречаются очень часто. Их изучение важно для выяснения природы звезд и для космогонических проблем происхождения и эволюции звезд.

Оба компонента пары сильно притягиваются друг к другу, но сила притяжения уравнивается центробежной силой вращения. Это приводит к орбитальному движению вокруг общего центра масс. Скорость этого движения и форма орбиты несут информацию о массах небесных тел.

Двойные системы очень многообразны. Существуют пары настолько близкие друг к другу, что их поверхности почти соприкасаются. Приливное взаимодействие приводит к тому, что компоненты приобретают форму эллипсоидов и с их поверхностей вещество перетекает с одного компонента на другой или даже постепенно выбрасывается за пределы системы. Периоды обращения таких систем составляют несколько часов.

Двойственность тесной системы обнаруживается с помощью спектрографа, а также путем изучения взаимных затмений, вызывающих переменность блеска. Эти звезды нельзя увидеть отдельно. Такие системы называются *спектрально-двойными* или *фотометрическими двойными*, в зависимости от того, с помощью спектрографа или фотометра устанавливается двойственность.

Когда два компонента разделены сильнее, на расстояние в несколько сотен радиусов, их можно различить в телескоп. Такие пары называют *визуально-двойными*.

Расстояния между компонентами этих пар могут быть столь велики, что притяжение других звезд способно разрушить двойную систему.

Компоненты могут быть одинаковыми и совсем разными. Иногда одна из звезд настолько мала, что не видна и выдает свое присутствие, вызывая аномалии в движении главной звезды. Такие системы называются *астрометрическими двойными*.

Часто встречаются кратные звездные системы, состоящие из нескольких звезд. При этом такие пары могут быть одновременно визуально-двойными, спектрально-двойными и иметь невидимые спутники. Например, звезда Альфа Центавра.

Затменно-переменные звезды. Кривые блеска, определение орбит компонент и физических характеристик. Затменными переменными называются такие неразрешимые в телескопы тесные пары звезд, видимая зв. величина которых меняется вследствие периодически наступающих для земного наблюдателя затмений одного компонента системы другим. В этом случае звезда с большей светимостью называется главной, а с меньшей — спутником. Типичные примеры — Алголь (β Персея) и β Лир.

Вследствие регулярно происходящих затмений главной звезды спутником, а также спутника главной звездой, суммарная видимая зв. величина меня-

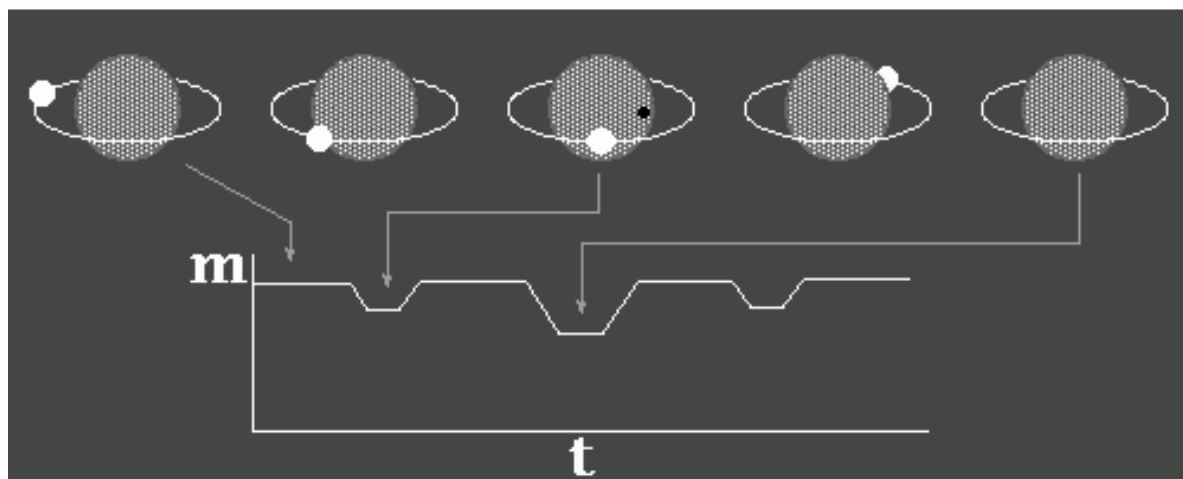


Рис.15

График изменения блеска затменно-двойной звезды

ется периодически.

График, изображающий изменение потока излучения звезды со временем называется кривой блеска. Момент времени, в который звезда имеет наименьшую видимую звездную величину, называется эпохой максимума, а наибольшую — эпохой минимума.

Разность звездных величин в минимуме и максимуме называется амплитудой, а промежуток времени между двумя последовательными максимумами или минимумами — периодом переменности.

По характеру кривой блеска затменной переменной звезды можно найти элементы орбиты одной звезды относительно другой, относительные размеры компонентов, представление об их форме.

На кривой блеска видны два минимума — глубокий, соответствующий затмению главной звезды, и слабый, возникающий, когда главная звезда затмевает спутник.

На основании детального изучения кривых блеска можно получить следующие данные о компонентах затменных переменных звезд:

1. Характер затмений определяется наклоном и размерами звезд. Когда диск одной звезды полностью перекрывается диском другой, соответствующие области кривой блеска имеют плоские участки, что говорит о постоянстве излучения системы в течение некоторого времени. Если затмения частные — минимумы острые.

Если звезды примерно равны по размерам, минимумы и максимумы кривой примерно одинаковы, если одна звезда значительно меньше, то максимум сильно превосходит минимум.

2. На основании продолжительности минимумов находят радиусы компонентов выраженные в долях большой полуоси орбиты, так как продолжительность затмения пропорциональна диаметрам звезд.

3. Если затмение полное, то по отношению глубин минимумов можно найти отношение светимостей, а при известных радиусах — отношение эффективных температур звезд.

4. Плавное изменение кривой блеска говорит об эллипсоидальности, вызванной приливным воздействием очень близких компонентов двойных звезд.

В настоящее время известно около 4000 затменных звезд различных типов. Минимальный известный период — около часа, максимальный более 57 лет.

Спектрально-двойные звезды. В спектрах некоторых звезд наблюдаются периодическое раздвоение или колебание положения спектральных линий. Если эти звезды являются затменными переменными, то колебания линий происходят с тем же периодом, что и изменение блеска. При этом в моменты соединений, когда обе звезды движутся перпендикулярно лучу зрения, отклонение спектральных линий от среднего положения равно 0. Если наблюдаемый спектр принадлежит только одной звезде, то вместо раздвоения линий наблюдается их смещение то в красную, то в синюю область спектра. Зависимость от времени лучевой скорости, определенной по смещениям линий, называется *кривой лучевых скоростей*.

В настоящее время известно около 2500 звезд, двойственная природа которых установлена только на основании спектральных наблюдений. Для 750 из

них получены кривые лучевых скоростей, позволяющие найти периоды обращения и форму орбиты.

Так как энергия, получаемая нами от кратной звезды равна сумме энергий от каждой из компонент, то блеск E кратной звезды равен сумме блеска ее компонентов:

$$E = E_1 + E_2 + \dots,$$

и поэтому ее видимая m и абсолютная M звездные величины всегда меньше звездной величины m_i и M_i любого компонента.

Вычисление суммарной звездной величины легче всего произвести, пользуясь соответствующими таблицами.

Если видимую звездную величину более яркого компонента обозначить через m_1 , а более слабого – через m_2 , то $m_2 > m_1$, и по разности

$$\Delta m = m_2 - m_1$$

в таблицах отыскивается поправка $\Delta m'$, позволяющая определить

$$m = m_1 - \Delta m'.$$

Этот табличный метод может быть последовательно применен к компонентам звезды любой кратности.

Согласно формуле Погсона отношение блеска двух звезд E_1 и E_2 связано с их звездными величинами m_1 и m_2 :

$$\frac{E_1}{E_2} = 2,512^{(m_2 - m_1)}$$

Таким образом, зная видимые звездные величины компонент кратной звезды, можно вычислить отношение блеска этих звезд.

Энергия, проходящая в единицу времени через замкнутую поверхность, окружающую данный источник излучения, называется его светимостью. Следовательно, блеск звезды пропорционален ее светимости и обратно пропорционален квадрату расстояния до нее. Обозначим светимость буквой L , расстояние до звезды – буквой r , а коэффициент пропорциональности – k . Тогда

$$E = k \frac{L}{r^2}.$$

Для двух звезд имеем

$$E_1 = k \frac{L_1}{r_1^2}, \quad E_2 = k \frac{L_2}{r_2^2}.$$

Деля первое равенство на второе, получим:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{L_1 \cdot r_2^2}{L_2 \cdot r_1^2}.$$

Если две звезды составляют физически двойную звезду, то расстояние до этих звезд практически одинаково: $r_1 = r_2$. Тогда получим:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{L_1}{L_2}.$$

Отношение блеска двух звезд системы равно отношению их светимостей. Линейное расстояние между компонентами физически двойной звезды может

быть вычислено только в том случае, если известны годичный параллакс π и наклонение i орбиты компонента — спутника к картинной плоскости, т.е. к плоскости, перпендикулярной к лучу зрения наблюдателя. Эта плоскость касательна к небесной сфере в той ее точке, в которой находится звезда. Если i не известно, то можно установить лишь проекцию между звездами на картинную плоскость.

Пусть компоненты двойной звезды видны под углом ρ'' , параллакс двойной звезды равен π'' , расстояние между компонентами d , проекция этого расстояния на картинную плоскость — d_n , расстояние от Земли до Солнца равно одной астрономической единице a_0 . Обозначив расстояние звезды от Земли через r , получим:

$$d_n = r \sin \rho''; \quad a_0 = r \sin \pi'';$$

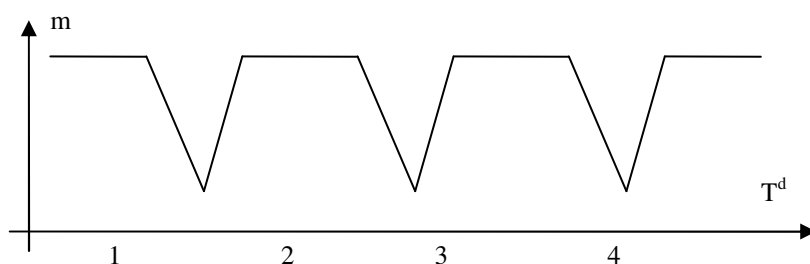
так как ρ'' и π'' очень малы, то

$$\frac{\sin \rho''}{\sin \pi''} = \frac{\rho''}{\pi''}.$$

Следовательно, $d_n / a_0 = \rho'' / \pi''$. Но $a_0 = 1$ а.е. Тогда $d_n = \rho'' / \pi''$. В таком случае d_n вычисляется в астрономических единицах.

Образец заданий

- По кривой изменения блеска затменной переменной звезды определить:
 - характеристики звезд пары: размеры относительно друг друга и относительно их орбиты; составляет ли блеск спутника заметную долю блеска главной звезды;
 - форму, характер затмения (полное, частное или кольцеобразное);
 - период обращения звезд;
 - продолжительность затмения.



- Вычислить проекцию на картинную плоскость линейного расстояния между компонентами, отношение их светимостей и суммарную видимую звездную величину (приняв, что если $m_0 = 0$, то $E_0 = 1$), двойных звезд:
 - β Скорпиона
 - γ Девы
- Определить по таблице общую видимую звездную величину двойных звезд:
 - γ Девы
 - γ Дельфина

4. Определить общую светимость, приняв светимость Солнца = 1, двойной звезды β Скорпиона.
5. Определить видимую звездную величину каждого компонента трехкратной звезды по ее общей видимой звездной величине m и соотношению блеска E между компонентами:

$$m = 3^m,74$$

первый компонент ярче третьего в 3.5 раза;

второй компонент ярче третьего в 1.9 раза.

Примеры выполнения некоторых заданий

1. Вычислить проекцию на картинную плоскость линейного расстояния между компонентами и суммарную видимую звездную величину (приняв, что если $m_0 = 0$, то $E_0 = 1$), двойной звезды: β Скорпиона.

Проекцию на картинную плоскость линейного расстояния d_n между компонентами двойной звезды можно вычислить, зная угловое расстояние между компонентами ρ'' и годичный параллакс π'' этой звезды. Угловое расстояние ρ'' взять из таблицы «Двойные и кратные звезды» астрономического календаря (напр. Школьного) $\rho'' = 14''$, а годичный параллакс π'' можно найти, зная расстояние (из той же таблицы) до данной двойной звезды в парсеках r (пс). В таблице r может быть дано в световых годах, как в данном случае: $r = 650$ св. лет. Переведем в парсеки, зная, что $1 \text{ пс} = 3.26$ св. лет. Получим: $r = 650 / 3.26 = 199.4$ пс. Тогда годичный параллакс $\pi'' = 1/r(\text{пс})$, т. е. $\pi'' = 1/199.4 = 0''.005$. А проекция на картинную плоскость линейного расстояния в астрономических единицах $d_n = \rho' / \pi''$. Т. е. $d_n = 14 / 0.005 = 2791$ а.е..

Суммарную видимую звездную величину m можно найти, используя формулу Погсона (приняв, что если $m_0 = 0$, то $E_0 = 1$), записанную для логарифма отношения блеска данной двойной к блеску звезды с параметрами $m_0 = 0$ и $E_0 = 1$, т.е. $\lg(E/E_0) = 0.4(m_0 - m) \Rightarrow \lg E = -0.4m$. Откуда суммарная видимая звездная величина $m = -2.512 \lg E$ (*), где E – суммарный блеск двойной звезды. Как известно $E = E_1 + E_2$, где E_1 – это блеск первого компонента, а E_2 – это блеск второго компонента. Блеск отдельных компонентов можно найти по формулам Погсона, записанным для отношения блеска данного компонента к блеску звезды с параметрами $m_0 = 0$ и $E_0 = 1$, т.е. $E_1/E_0 = 2.512^{(m_0 - m_1)}$ и $E_2/E_0 = 2.512^{(m_0 - m_2)}$, где m_1 и m_2 – видимые звездные величины компонентов двойной звезды, данные в таблице. Учитывая $m_0 = 0$ и $E_0 = 1$, получаем $E_1 = 2.512^{(-m_1)}$ и $E_2 = 2.512^{(-m_2)}$. Для нашей звезды $m_1 = 2^m.6$ и $m_2 = 4^m.9$. Поэтому $E_1 = 2.512^{(-2.6)} = 0.09$ и $E_2 = 2.512^{(-4.9)} = 0.01$. Далее $E = E_1 + E_2 = 0.1$. Подставляя в (*), получаем $m = -2.512 \lg(0.1) = 2^m.512$.

2. Определить, приняв светимость Солнца $L_c = 1$, общую светимость двойной звезды β Скорпиона. Суммарная видимая звездная величина этой звезды $m = 2^m.512$.

Известно, что блеск звезды пропорционален ее светимости и обратно пропорционален квадрату расстояния до нее: $E = kL/r^2$. То же можно записать и для Солнца: $E_c = kL_c/r_c^2$. Разде-

$$L = L_c \frac{E}{E_c} \frac{r_c^2}{r^2}.$$

лим первое выражение на второе и выразим светимость звезды:

Отношение E/E_c по формуле Погсона:

$$L = \frac{r_c^2}{r^2} 2.512^{(m_c - m)}.$$

С учетом $L_c = 1$, получаем:

$$\frac{E}{E_c} = 2.512^{(m_c - m)}.$$

Видимая звездная величина Солнца $m_c = -26^m$, расстояние до Солнца $r_c = 1$ а.е., видимая звездная величина β Скорпиона $m = 2^m.512$, а расстояние до нее $r = 650$ св. лет. Выразив r в а.е., получим $r = 41126475$ а.е.. Подставляя в формулу, получаем: $L = 41126475^2 \times 2.512^{(-26 - 2.512)} = 6651$.

3. Определить видимую звездную величину каждого компонента трехкратной звезды по ее общей видимой звездной величине m и соотношению блеска E между компонентами: $m = 3^m.74$

первый компонент ярче третьего в 3.5 раза;

второй компонент ярче третьего в 1.9 раза.

Сначала запишем отношения блеска между компонентами, данные в условии: $E_1/E_3 = 3.5$, $E_2/E_3 = 1.9$. Отсюда $E_1 = 3.5E_3$, $E_2 = 1.9E_3$. Видимую звездную величину каждого компонента трехкратной звезды по ее общей видимой звездной величине m можно определить, используя формулу Погсона, записанную для логарифма отношения блеска данного компонента к суммарному (общему) блеску звезды: например, $\lg(E/E_3) = 0.4(m_3 - m)$. Отсюда $m_3 = m + 2.5 \lg(E/E_3)$ (*). Суммарный (общий) блеск звезды: $E = E_1 + E_2 + E_3$. Подставив $E_1 = 3.5E_3$ и $E_2 = 1.9E_3$, получим $E = 3.5E_3 + 1.9E_3 + E_3 = 6.4E_3$. Следовательно, $E/E_3 = 6.4$. Подставив в (*), и в итоге будем иметь $m_3 = 3^m.74 + 2.5 \lg(6.4) = 5^m.75$.

Видимую звездную величину первого компонента найдем, используя формулу: $\lg(E_1/E_3) = 0.4(m_3 - m_1)$. Отсюда $m_1 = m_3 - 2.5 \lg(E_1/E_3)$. Подставив $E_1/E_3 = 3.5$ и m_3 , получим $m_1 = 5^m.75 - 2.5 \lg(3.5) = 4^m.38$.

Видимую звездную величину второго компонента найдем, используя формулу $\lg(E_2/E_3) = 0.4(m_3 - m_2)$. Отсюда $m_2 = m_3 - 2.5 \lg(E_2/E_3)$. Подставим $E_2/E_3 = 1.9$ и m_3 , получим $m_2 = 5^m.75 - 2.5 \lg(1.9) = 5^m.05$.

Лабораторная работа № 10

СОБСТВЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СКОРОСТИ ЗВЕЗД. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ЗВЕЗД (ВИДИМЫХ ФИГУР СОЗВЕЗДИЙ) ИЗ-ЗА СОБСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ЗВЕЗД

Цель работы: изучить характер и условия собственного движения звезд. Определить как изменяются фигуры созвездий через длительные промежутки времени.

Оборудование: каталог звезд ярче $4^m,5$ в системе V, (находящийся в компьютерной базе данных или в Астрономическом календаре (постоянной части)), ПЭВМ, звездная карта, содержащая необходимый для работы участок неба.

Вопросы к допуску:

1. Собственные движения звезд, их причина и характеристика.
2. Созвездия и их построение.
3. Карта звездного неба, звездные каталоги, экваториальная система координат, изменение координат звезд.

Литература:

1. *Астрономический календарь. Постоянная часть.* М., 1981.
2. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. *Курс общей астрономии.* М., 1983.
3. Ефремов Ю.Н. *В глубины Вселенной.* М., 1984.
4. Цесевич В.П. *Что и как наблюдать на небе.* М., 1979.

Основные теоретические сведения

Сравнение экваториальных координат одних и тех же звезд, определенных через значительные промежутки времени, показало, что α и δ меняются с течением времени. Значительная часть этих изменений вызывается прецессией, нутацией, абберрацией и годичным параллаксом. Если исключить влияние этих причин, то изменения уменьшаются, но не исчезают полностью. Оставшееся смещение звезды на небесной сфере за год называется собственным движением звезды μ . Оно выражается в секундах дуги в год.

Для определения этих движений сравниваются фотопластинки, снятые через большие промежутки времени, составляющие 20 и более лет. Поделив полученное смещение на число прошедших лет, исследователи получают дви-

жение звезды в год. Точность определения зависит от величины промежутка времени, прошедшего между двумя снимками.

Собственные движения различны у разных звезд по величине и направлению. Только несколько десятков звезд имеют собственные движения больше 1" в год. Самое большое известное собственное движение у "летающей" звезды Барнарда $\mu = 10'',27$. Основное число звезд имеет собственное движение, равное сотым и тысячным долям секунды дуги в год. Лучшие современные определения достигают 0'',001 в год.

За большие промежутки времени, равные десяткам тысяч лет, рисунки созвездий сильно меняются.

Собственное движение звезды происходит по дуге большого круга с постоянной скоростью. Прямое движение изменяется на величину μ_α , называемую собственным движением по прямому восхождению, а склонение — на величину μ_δ , называемую собственным движением по склонению.

Собственное движение звезды вычисляется по формуле:

$$\mu = \sqrt{\mu_\alpha^2 + \mu_\delta^2}.$$

Если известно собственное движение звезды за год и расстояние до нее r в парсеках, то нетрудно вычислить проекцию пространственной скорости звезды на картинную плоскость. Эта проекция называется тангенциальной скоростью V_t и вычисляется по формуле:

$$V_t = 4,74 \mu / \pi = \mu'' r / 206265'' \text{ пс/год} = 4,74 \mu r \text{ км/с},$$

где r — расстояние до звезды, выраженное в парсеках.

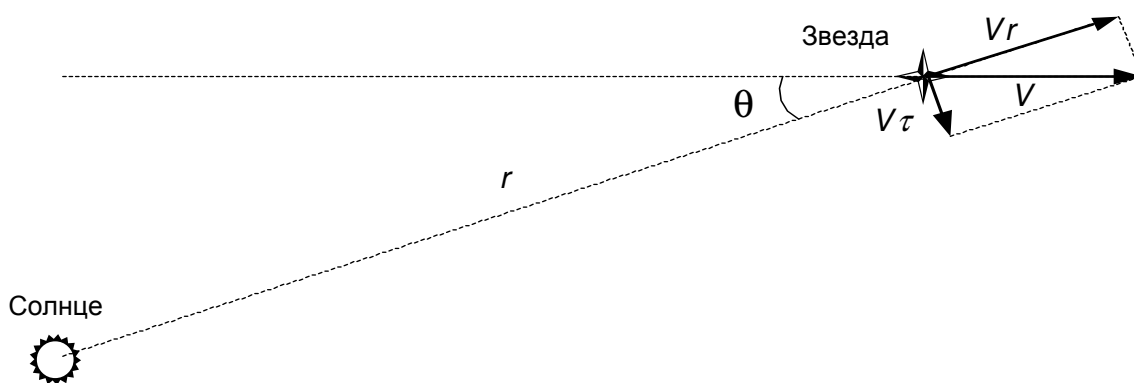


Рис. 16. Пространственная скорость звезды.

Чтобы найти пространственную скорость V звезды, необходимо знать ее лучевую скорость V_r , которая определяется по доплеровскому смещению линий в спектре и V_t , которая определяется по годичному параллаксу и μ . Поскольку V_t и V_r взаимно перпендикулярны, пространственная скорость звезды равна:

$$V = \sqrt{(V_t^2 + V_r^2)}.$$

Для определения V обязательно указывается угол θ , отыскиваемый по его функциям:

$$\sin \theta = V_t/V,$$

$$\cos \theta = V_r/V.$$

Угол θ лежит в пределах от 0 до 180°.

Направление собственного движения вводится позиционным углом ψ , отсчитываемым против часовой стрелки от северного направления круга склонения звезды. В зависимости от изменения экваториальных координат звезды, позиционный угол ψ может иметь значения от 0 до 360° и вычисляется по формулам:

$$\sin \psi = \mu_\alpha/\mu,$$

$$\cos \psi = \mu_\delta/\mu,$$

с учетом знаков обеих функций. Пространственная скорость звезды на протяжении многих столетий остается практически неизменной по величине и направлению. Поэтому, зная V и r звезды в настоящую эпоху, можно вычислить эпоху наибольшего сближения звезды с Солнцем и определить для нее расстояние r_{\min} , параллакс, собственное движение, компоненты пространственной скорости и видимую звездную величину. Расстояние до звезды в парсеках равно $r = 1/\pi$, 1 парсек = 3,26 св. года.

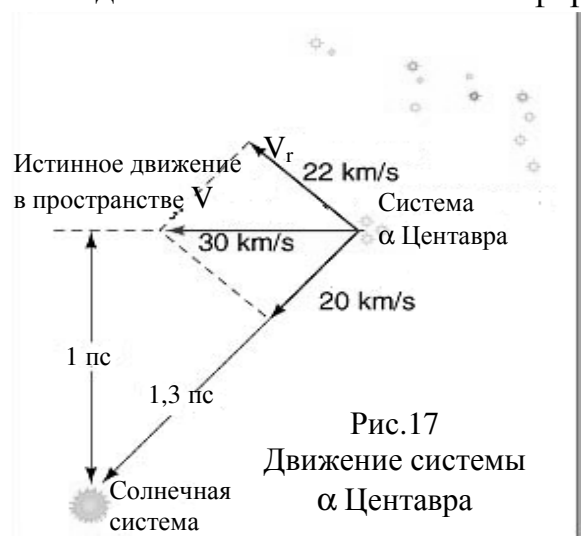
Знание собственных движений и лучевых скоростей звезд позволяет судить о движениях звезд относительно Солнца, которое тоже движется в пространстве.

Точка на небесной сфере, к которой направлен вектор скорости Солнца, называется солнечным апексом, а противоположная точка — антиапексом.

Апекс Солнечной системы находится в созвездии Геркулеса, имеет координаты: $\alpha = 270^\circ$, $\delta = +30^\circ$. В этом направлении Солнце движется со скоростью около 20 км/с, относительно звезд, находящихся от него не далее 100 пс. В течение года Солнце проходит 630 000 000 км, или 4,2 а.е.

Для получения зачета необходимо:

1. Знать теоретический материал по теме лабораторной работы.
2. Выполнить задания.



Образец заданий

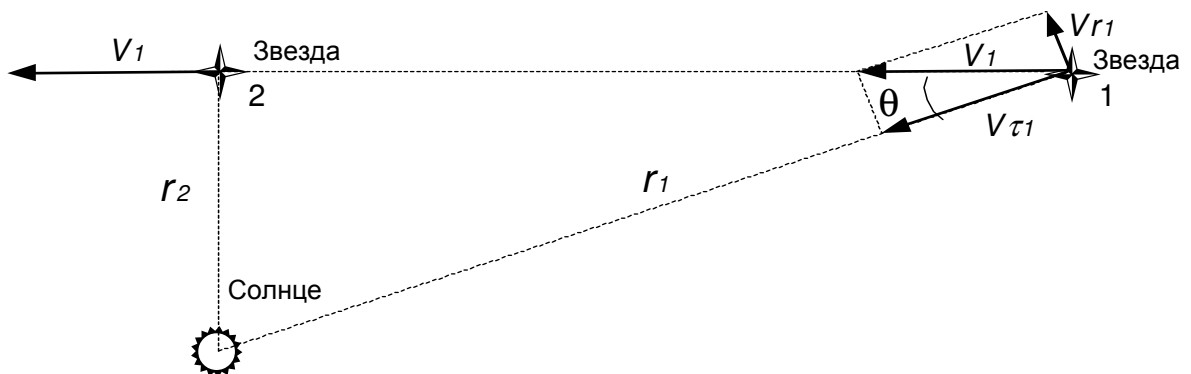
1. С использованием "Каталога звезд ярче 4^m,5 в системе V", находящегося в компьютерной базе данных или в Астрономическом календаре (1) найти годовые изменения координат $\mu\alpha$, $\mu\delta$ указанной группы звезд.
2. Найти значение координат звезд через указанный промежуток времени.
3. Нанести на звездную карту новые координаты данной группы звезд и указать стрелками направления движения.
4. Сравнить фигуру созвездия, которая наблюдается сейчас с будущей через заданное количество лет.
5. Вычислить расстояние, параллакс, собственное движение, видимую звездную величину, лучевую и тангенциальную скорости в эпоху наибольшего сближения с Солнцем, а также время, через которое наступит эпоха наибольшего сближения (удаления) звезды Денеб.

Примеры выполнения некоторых заданий

1. Вычислить расстояние, видимую звездную величину, лучевую и тангенциальную скорости в эпоху наибольшего сближения с Солнцем звезды Денеб.

Звезда	α_1	δ_1	m	π	μ	V_r
Денеб	20h 41m	45°11.7'	1.26	0".005	0".004	-3km/s

Для выполнения задания необходимо сделать схематический рисунок.



Итак, чтобы вычислить расстояние в эпоху наибольшего сближения $r_2 = r_1 \sin(\Theta)$, необходимо знать угол Θ , который можно найти так: $\text{tg}(\Theta) = V_{t1} / V_{r1}$. В свою очередь $V_{t1} = 4.74 \mu_1 / \pi_1$. Следовательно, $r_2 = r_1 \sin(\text{arctg}((4.74 \mu_1 / \pi_1) / V_{r1}))$. А также $r_1 = 1 / \pi_1$. Итак:

$$r_2 = \frac{1}{\pi_1} * \sin(\text{arctg}(\frac{4.74 \mu_1 / \pi_1}{V_{r1}})),$$

$$r_2 = \frac{1}{0.005} \sin(\text{arctg}(\frac{4.74 * 0.004}{0.005 * 3})) = 156.8(nc).$$

Так как пространственная скорость V остается постоянной, то в точке 2 лучевая скорость $V_{r2} = 0$ (проекция V на луч r_2), а тангенциальная

$$V_{t2} = V = \sqrt{V_{t1}^2 + V_{r1}^2} = \sqrt{(4.74 * 0.004 / 0.005)^2 + (-3)^2} = 4.835(km/s).$$

Видимую звездную величину m_2 в точке 2 можно вычислить двумя способами.

1. Используя формулу Погсона:

$$\lg\left(\frac{E_1}{E_2}\right) = 0.4(m_2 - m_1).$$

Мы знаем, что блеск звезды E обратно пропорционален квадрату расстояния до нее: $E \sim 1/r^2$. Поэтому: $\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$. Следовательно:

$$\text{но: } \lg\left(\frac{r_2^2}{r_1^2}\right) = 0.4(m_2 - m_1). \text{ Откуда } m_2 = m_1 + 2.5 \lg\left(\frac{r_2^2}{r_1^2}\right).$$

$r_1 = 1 / \pi_1 = 1 / 0.005 = 200(nc)$. Тогда m_2 :

$$m_2 = 1.26 + 2.5 \lg\left(\frac{156.8^2}{200^2}\right) = 0^m.73.$$

2. Видимую звездную величину m_2 в точке 2 можно вычислить через абсолютную звездную величину M .

$$M = m_1 + 5 - 5 \lg r_1 = m_2 + 5 - 5 \lg r_2.$$

$$\text{Откуда } m_2 = m_1 - 5 \lg \frac{r_1}{r_2}.$$

$$\text{Вычисляя, получаем: } m_2 = 1.26 - 5 \lg\left(\frac{200}{156.8}\right) = 0^m.73.$$

Справочная таблица

Название Звезды	Обозначение	α h m	δ ° '	m	μ	π	v_r км/с
Альдебара \square ран \square	α Тельца	4 34.48	16 27.62	+0.86	0",205	0",051	+54
Альтаир \square	α Орла	19 49.56	8 48.07	+0.76	0,659	0,205	-25
Антарес \square	α Скорпиона	16 27.87	-26 22.68	+1.08	0,032	0,014	-3
Арктур \square	α Волопаса	14 14.52	19 18.72	-0.05	2,287	0,087	-5
Ахернар \square	α Эридана	1 36.78	-57 28.82	+0.47	0,083	0,034	+19
Бетельгейзе	α Ориона	5 53.32	7 24.22	+0.42	0,032	0,011	+21
Вега \square	α Лиры	18 36.09	38 45.57	+0.03	0,348	0,121	-14
Денеб \square	α Лебедя	20 40.58	45 11.42	+1.26	0,004	0,005	-3
Канопус \square	α Киля	6 23.40	-52 40.90	-0.73	0,022	0,018	+20
Капелла \square	α Возничего	5 14.84	45 58.45	+0.08	0,439	0,071	+30
Кастор \square	α Близнецов	7 33.00	31 56.65	+1.2	0,201	0,070	+2
Поллукс \square	β Близнецов	7 43.79	28 5.27	+1.15	0,623	0,098	+3
Процион \square	α Малого Пса	7 37.99	5 17.40	+0.37	1,242	0,291	-3
Регул \square	α Льва	10 07.04	12 05.40	+1.36	0,244	0,042	+3
Ригель \square	β Ориона	5 13.33	-8 13.77	+0.08	0,005	0,006	+24
Сириус \square	α Большого Пса	6 44,04	-16 40,85	-1.5	1,315	0,377	-8
Спика \square	α Девы	13 23.87	-11 01.88	+0.96	0,051	0,017	+1
Фомальгаут \square	α Южной Рыбы	22 56.27	-29 45.32	+1.16	0,367	0,145	+6

Лабораторная работа №11

ИЗУЧЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БОЛЬШИХ ПЛАНЕТ

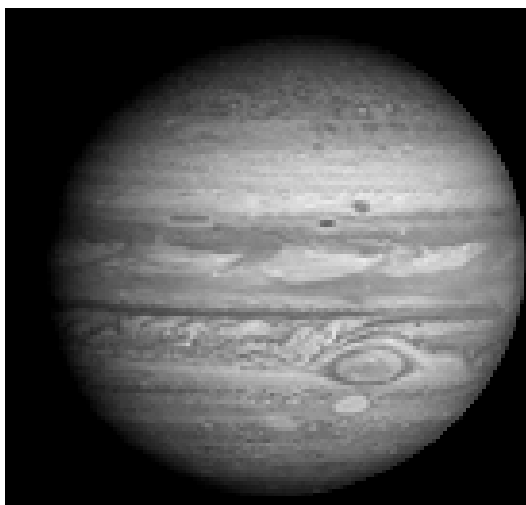
Цель работы: изучение деталей поверхности и некоторых физических характеристик больших планет.

Пособия: фотографии Венеры, Марса, Юпитера, Сатурна, планетографическая координатная сетка, Астрономический календарь (постоянная часть), транспортир и линейка, персональная ЭВМ, программы "Sky Map" и "Astronomy Lab".

Основные теоретические сведения

Вокруг Солнца движется множество тел различных по своим характеристикам. Среди них есть планеты, их спутники, астероиды, кометы, частицы межпланетного пылевого вещества и др.

Планета — это небесное тело, движущееся вокруг Солнца в его гравитационном поле и светящееся отраженным солнечным светом. В Солнечной системе известно 9 планет. Почти все они, за исключение Меркурия и Плутона, имеют плотную газовую оболочку — атмосферу. Также почти все планеты, кроме Меркурия и Венеры, имеют спутники. По физическим характеристикам, химическому составу и строению планеты делятся на две группы: планеты земного типа (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Плутон стоит несколько обособленно. 1 марта 1999 года, решением Международного Астрономического Союза, он получил статус планеты-астероида.



Планета Юпитер

Сопоставление физических характеристик планет показывает, что планеты обеих групп сильно отличаются друг от друга. Планеты-гиганты значительно больше по размерам и по массе, меньше по плотности и быстрее вращаются. Примерно 98% суммарной массы планет Солнечной системы приходится на долю планет-гигантов.

Планеты активно изучаются с древних времен. Сегодня для этого используются как наземные методы, так и космические (запуск межпланетных космических станций).

В данной работе предлагается ознакомиться с некоторыми простыми методами определения характеристик планет и с фотоматериалами, полученными межпланетными космическими станциями.

Линейный диаметр D планеты вычисляется по ее геоцентрическому расстоянию ρ (или по горизонтальному экваториальному параллаксу P) и видимому угловому диаметру d , который измеряется либо микрометром при визуальных наблюдениях, либо шкалой измерительного прибора по фотографическому изображению планеты при известном масштабе фотографии μ' . В последнем случае, очевидно,

$$d = \mu' \cdot D', \quad (1)$$

где D' , измеренный в мм диаметр фотографического изображения планеты. Тогда линейный диаметр планеты можно вычислить по формуле $D = \rho \cdot d$, где ρ — расстояние от планеты до Земли.

Диаметр планеты, как правило, выражается в диаметрах Земли. При различном экваториальном $D_э$ и полярном $D_п$ диаметрах планеты ее форма характеризуется сжатием

$$\varepsilon = (D_э - D_п) / D_э \quad (2)$$

и тогда объем планеты

$$V = 1/6 \cdot \pi \cdot D_э^2 \cdot D_п. \quad (3)$$

Зная массу M планеты, можно вычислить среднюю плотность планеты. Зная же плотность земли ($\rho_0 = 5,52 \text{ г/см}^3$), можно вычислить плотность планеты в плотностях земли или найти абсолютное значение плотности.

Положение деталей на дисках планет определяется планетографическими координатами, которые измеряются специальными сетками и, подобно географическим координатам, отсчитываются от экватора планеты (планетографическая широта β) и от одного из ее меридианов, принимаемого за начальный (планетографическая долгота λ). В северном полушарии планеты β положительна, а в южном — отрицательна. Планетографическая долгота λ всегда отсчитывается в одном направлении, с запада к востоку, от 0° до 360° . Вследствие обращения планеты вокруг Солнца и ее вращения вокруг оси, имеющий постоянный (но различный у разных планет) наклон, видимое положение экватора и начального меридиана на диске планеты все время меняется и может быть найдено на каждый день года в таблицах "Физические координаты", публикуемых в астрономических календарях-ежегодниках.

Измерив на двух фотографиях планеты угол φ , на который планета повернулась за промежуток времени $(T_2 - T_1)$, можно вычислить период вращения планеты вокруг оси, так как

$$P = (360^\circ / \varphi) \cdot (T_2 - T_1), \quad (4)$$

а зная P , определить угловую ω и линейную v скорости различных точек на ее поверхности. Очевидно,

$$\omega = 360^\circ / P, \quad (5)$$

$$v = \omega \cdot r, \quad (6)$$

где r — радиус вращения точки поверхности планеты, который определяется по планетографической широте β этой точки, экваториальному R_e и полярному R_p радиусам планеты

$$r = \frac{R_e}{\sqrt{\tan^2 \beta + \left(\frac{R_p}{R_e}\right)^2}}. \quad (7)$$

или по ее сжатию

$$r = \frac{R'_e}{\sqrt{\tan^2 \beta + (1 - \varepsilon)^2}}. \quad (8)$$

Если сжатие планеты мало, то можно полагать $\varepsilon = 0$, $R_p = R_e = R$ и тогда:

$$r = R \cdot \cos \beta. \quad (9)$$

Строго говоря, при точном определении периода вращения P планеты необходимо учитывать смещение Земли по своей орбите за промежуток времени $T_2 - T_1$, но для быстро вращающихся планет этим смещением Земли можно пренебречь.

Поток излучения от Солнца принято характеризовать **солнечной постоянной Q** , под которой понимают полное количество солнечной энергии, проходящей за 1 секунду через перпендикулярную к лучам площадку в 1 см^2 , расположенную на среднем расстоянии планеты от Солнца.

По современным измерениям значение Q для Земли известно с точностью до 1% (на высоте 65 км):

$$Q = 0,1388 \text{ Дж}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}).$$

Литература:

1. Дагаев М.М., В.Г. Демин и др. Астрономия, М., 1983.
2. Бакулин П.И., Кононович Э.В. и др. Курс общей астрономии, М., 1983.

Образец заданий

1. По фотографиям планеты Юпитер в эпоху противостояния, определить угловой и линейный диаметр планеты и вычислить ее объем и среднюю плотность.
2. Определить сжатие планеты Юпитер, сравнивая со сжатием Земли и объяснить причину различия в сжатии.
3. Вычислить линейный диаметр и ширину среднего кольца Сатурна.
4. На двух фотографиях Юпитера, снятых в один вечер с небольшим интервалом времени, отождествить одну деталь в умеренной зоне и по ее положению вычислить период вращения, угловую и линейную скорость этих зон.
5. Изучить предложенные фотографии Марса, Венеры, Юпитера, и Сатурна и провести сравнительный анализ физических свойств и условий на поверхности этих планет.
6. Вычислить солнечную постоянную для Юпитера.

Лабораторная работа №12

ИЗУЧЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ОБЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

Цель работы: изучение физической природы Солнца.

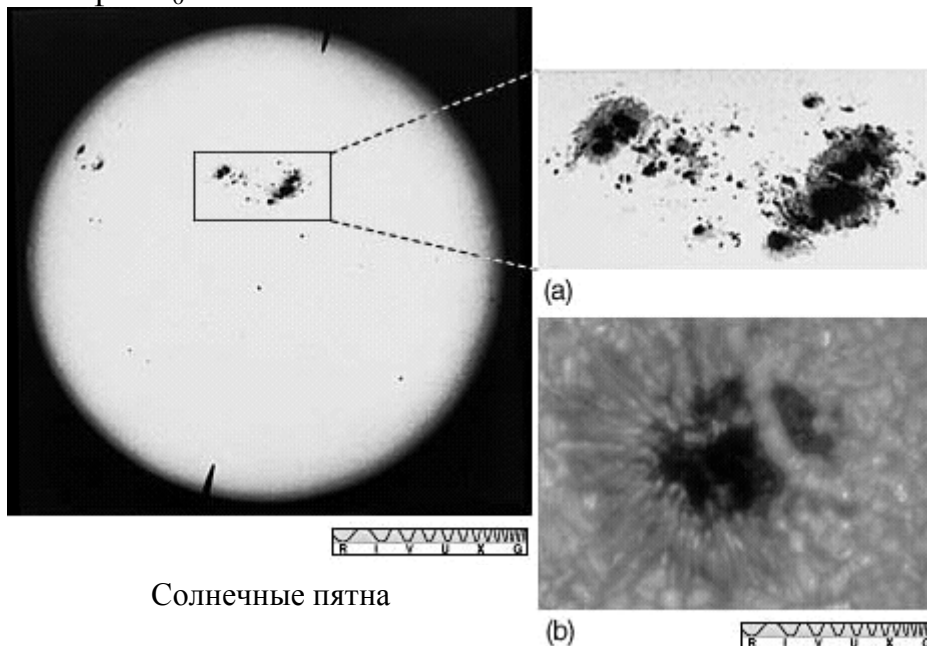
Пособия: фотографии Солнца, палетка солнечных пятен, фотографии солнечных протуберанцев.

Основные теоретические сведения

Солнечная активность характеризуется различными факторами, и одним из них является пятнообразовательная деятельность Солнца, которая изучается статистическими методами. Статистика солнечных пятен сводится к подсчету числа g групп пятен и числа всех пятен f , включая входящие в группы и одиночные пятна, причем, каждое пятно в общей полутени и каждая пара принимается в этом случае за отдельное пятно, а каждое отдельное пятно или пара за самостоятельную группу. По результатам подсчетов вычисляется относительное число пятен W_0 , называется числом Вольфа:

$$W_0 = 10 \cdot g + f. \quad (1)$$

Так, если на солнце имеется две группы пятен, одна из которых содержит четыре пятна, а другая — шесть пятен и, кроме того, имеется семь отдельных пятен и пар, то число групп $g = 2 + 7 = 9$, число пятен $f = 4 + 6 + 7 = 17$ и число Вольфа $W_0 = 10 \cdot 9 + 17 = 107$.



Статистическому изучению подвергается также площадь пятен, которая оценивается в миллионных (10^{-6}) долях площади солнечного диска по шкале специальной палетки диаметром 100 мм, накладываемой на фотографию Солнца, причем площадью пятна считается площадь, ограниченная его полутенью, а полутенью группы — сумма площадей пятен,

входящих в нее. Так как форма пятен, расположенных на периферии солнечного диска, искажается, то их площадь оценивается шкалой, соответствующей наибольшему видимому их диаметру.

Зная угловой D' и линейный D_{\odot} диаметры Солнца, можно по диаметру D его фотографии (в мм) установить угловой μ' и линейный μ масштабы фотографии:

$$D = \Delta\lambda / \Delta l; \quad \mu' = D' / D; \quad \mu = D_{\odot} / D, \quad (2)$$

по которым вычислить угловые l' и линейные l размеры солнечных пятен и их групп. Площадь этих образований в км^2 подсчитывается по шкале палетки, при известной площади солнечного диска в тех же единицах измерения.

Солнечная активность характеризуется также интенсивностью протуберанцев, высота выбросов которых может быть измерена на фотографиях и затем вычислена в радиусах Солнца R_{\odot} или в километрах. Скорость выброшенного вещества все время изменяется под действием магнитного поля Солнца и его пятен, солнечного поля тяготения и давления солнечного электромагнитного излучения, и поэтому определение скорости протуберанцев представляет довольно сложную задачу. Однако эту задачу можно решить с некоторым приближением. Пусть в последовательные моменты времени T_1 и T_2 высота протуберанца была h_1 и h_2 , а скорость его вещества на высоте v_1 и v_2 . Тогда на участке пути $h_2 - h_1$ средняя скорость вещества протуберанца:

$$v_{\text{cp}} = (h_2 - h_1) / (T_2 - T_1) = \Delta h - \Delta t. \quad (3)$$

Высоту h_1 и h_2 протуберанца измеряют по фотографии, на которой указаны и моменты фотографирования. Скорость протуберанца выражается в $\text{км} / \text{с}$.

Общее излучение Солнца легко подсчитать по Солнечной постоянной $C = 1,388 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$. Сфера, радиусом $a_0 = 1 \text{ а.е.}$ получает в течении 1 с всю излучаемую Солнцем за этот же интервал времени энергию $E = 4 \cdot \pi \cdot a_0^2 \cdot C$.

Откуда нетрудно вычислить мощность солнечного излучения (количество энергии, излучаемой Солнцем за 1с) и годовое излучение Солнца, а затем определить ежесекундное и годовое уменьшение Δm массы Солнца, поскольку излучаемая энергия:

$$E = c^2 \cdot \Delta m,$$

где c — скорость света.

Главным источником излучаемой Солнцем энергии являются ядерные процессы превращения водорода в гелий, происходящие в недрах Солнца. Если известно, сколько энергии ϵ выделяется при превращении каждого грамма водорода в гелий (ϵ), то, поскольку в настоящую эпоху примерно 70% солнечной массы составляет водород, можно подсчитать продолжительность времени, на протяжении которого Солнце будет излучать энергию интенсивно, как излучает в настоящее время при условии постоянства интенсивности излучения.

Радиус Солнца — 696 000 000 м.

Масса Солнца — $(1,9904 \pm 0,002) \cdot 10^{30}$ кг.

Угловой диаметр Солнца — $32'$.

$\varepsilon = 7,14 \cdot 10^{11}$ Дж.

Образец заданий

1. Пользуясь известными длинами волн спектральных линий водорода, построить дисперсионные кривые $l = f(\lambda)$ и кривые изменения дисперсии $D = F(\lambda)$ для обеих спектрограмм водорода (δ и g), указав принятые обозначения этих линий. Объяснить отличие кривых друг от друга.
2. По спектрам водорода, гелия и натрия отождествить линии в спектре Солнца и по таблицам спектральных линий определить их длину волны.
3. По дисперсионной кривой определить приближенное значение длины волны спектральных линий А, В, Е, в, Н и К солнечного спектра и по таблицам спектральных линий установить их принадлежность к химическим элементам и уточненное значение длины волны.
4. Вычислить угловой и линейный масштабы фотографии Солнца.
5. Определить число Вольфа, а также угловой и линейный диаметры самого большого пятна, сравнив его размеры с диаметром Земли.
6. Измерить высоту протуберанца, выразить ее в радиусах Солнца и в километрах. Вычислить скорость вещества, если фотографии сделаны в моменты:
 - а) (d) 4 июня, 1ч 00мин.
 - б) (l) 4 июня, 1ч 30мин.
7. По значению солнечной постоянной вычислить мощность солнечного излучения, энергию солнечного излучения за год и уменьшение массы Солнца за секунду и за год.
8. Вычислить продолжительность современной интенсивности солнечного излучения в будущем, при условии постоянства излучения до момента затухания солнца.

Лабораторная работа N13

ИЗУЧЕНИЕ КАРТЫ И РЕЛЬЕФА ЛУНЫ И БОЛЬШИХ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ

Цель работы: изучить топографию Луны и некоторых больших спутников планет и определить размеры объектов на поверхности.

Пособия: фотографическая карта видимого полушария Луны, фотография обратной стороны Луны, списки лунных объектов, фотография полной Луны, фотографии некоторых спутников больших планет, координатная сетка, Астрономический календарь (постоянная часть), персональная ЭВМ.

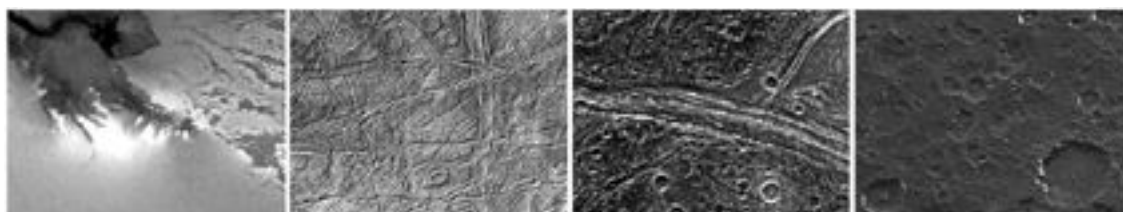
Детали поверхности спутников Юпитера

Ио

Европа

Ганимед

Каллисто



Основные теоретические сведения

Лунная поверхность покрыта горами, цирками и кратерами, протяженными горными хребтами, имеет обширные впадины, изрезана глубокими трещинами. Самая обширная впадина называется Океаном Бурь, а остальные — мо-



Кратер Коперник на Луне

рями. На лунной поверхности зарегистрировано около 200 000 деталей. Главнейшие горные хребты имеют земные названия. Размеры цирков и кратеров различны: от 240 км до метров. Крупные цирки и кратеры названы именами ученых. Изучение лунной поверхности осуществляется по фотографиям и картам, составленным на их основе, к которым прилагаются кальки с начерченными и занумерованными контурами лунных образований и списки их названий под теми же номерами.

Как правило, фотографии и карты воспроизводят телескопическое (перевернутое) изображение Луны, на котором ее северный полюс находится внизу.

Определение линейных размеров лунных образований по четким фотографиям не представляет затруднений.

Обозначим линейный диаметр Луны, выраженный в км, через D^* , ее угловой диаметр — через D' и линейный диаметр ее фотографического изображения в мм — через D . Тогда масштабы фотографического снимка будут :

$$\text{линейный масштаб} \quad \mu = \frac{D}{D^*}, \quad (1)$$

$$\text{угловой масштаб} \quad \mu' = \frac{D'}{D}. \quad (2)$$

Видимый угловой диаметр Луны изменяется в зависимости от ее параллакса, но при приближенном решении задач его можно принять $D' = 32'$.

Измерив в мм размеры d лунного объекта на фотографии с известными масштабами, получим угловые d' и линейные $d_{\text{л}}$ его размеры

$$d' = \mu' d, \quad (3)$$

$$d_{\text{л}} = \mu d. \quad (4)$$

Вследствие шарообразности Луны вид объектов лунной поверхности, расположенных вне центральной области лунного диска, заметно искажен и это искажение достигает максимальной величины у его краев. Искажению подвержены размеры объектов по всем направлениям, за исключением направления, перпендикулярного к радиусу диска, вдоль которого искажение является наибольшим. Поэтому формулы (3) и (4) применимы только для неискаженных размеров, а для размеров в направлении лунного радиуса применимы формулы:

$$d' = \mu' \frac{d}{\cos \varphi}, \quad (5)$$

$$d_{\text{л}} = \mu \frac{d}{\cos \varphi}, \quad (6)$$

где φ — угловое расстояние центра объекта от центра лунного диска, определяемое с точностью до 1° по экватору координатной сетки диаметром $D_c = 100$ мм, которая накладывается на фотографию Луны такого же диаметра так, чтобы экватор сетки прошел через объект и центр данного диска.

Если диаметр сетки не соответствует диаметру фотографии Луны, то $\cos \varphi$ может быть найден по наибольшему d_m и наименьшему d_n диаметрам цирков и кратеров, расположенных в области измерений, т.к. действительная круглая форма этих образований искажается перспективой в отношении

$$\frac{d_n}{d_m} = \cos \varphi.$$

По известным масштабам μ и μ' фотографии полной Луны нетрудно определить масштабы μ_1 и μ_1' фотографии участка лунной поверхности, для чего

необходимо отождествить одинаковые объекты и измерить в мм размеры d и d_1 их изображений на обеих фотографиях.

Тогда в масштабе одной фотографии

$$d' = \mu' d \quad \text{и} \quad d_{\text{л}} = \mu d,$$

а в масштабе другой фотографии

$$d' = \mu_1' d_1 \quad \text{и} \quad d_{\text{л}} = \mu_1 d_1,$$

откуда

$$\mu_1' = \mu' \frac{d}{d_1} \quad \text{и} \quad \mu_1 = \mu \frac{d}{d_1}.$$

Используя полученные масштабы μ_1 и μ_1' , можно определить угловые и линейные размеры лунных объектов с достаточной точностью.

Измерение длины l тени гор позволяет вычислить их высоту H (рис.1), если известна высота Солнца h^* над горизонтом лунной местности в моменты фотографирования, т. к.

$$H = l \operatorname{tg} h^*$$

Приближенное значение h^* можно определить по линейному расстоянию $d_{\text{л}}$ горы от терминатора. Солнечные лучи можно считать параллельными, и поэтому высота Солнца, выраженная в градусах,

$$^*h = \sigma = 57^{\circ},3 \frac{d_{\text{л}}}{R} ^*, \quad (7)$$

где σ — угол при центре Луны между вершиной горы и терминатором; R^* — радиус Луны, а $d_{\text{л}}$ вычисляются в зависимости от положения горы по формулам (4) и (6). Угол σ может быть непосредственно найден по координатной сетке, наложенной на фотографию Луны, или вычислен по формуле (7) с учетом формулы (6). Для объектов центральной области лунного диска, расположенных вблизи терминатора, вычисление h^* упрощается, т.к. можно пренебречь искажениями линейных размеров. В этом случае линейное расстояние $d_{\text{л}}$ горы от терминатора можно выразить через расстояние r от Луны до Земли и видимое с Земли угловое расстояние d' горы от терминатора, и измеряемое на фотографиях лунной поверхности:

$$d_{\text{л}} = r d'_{\text{радиан}} = r \frac{d'}{57^{\circ},3 \cdot 60},$$

где d' выражено в минутах дуги. Подставляя значение $d_{\text{л}}$ в формулу (7) и учитывая, что $^*\frac{r}{R} \approx 220$, будем иметь:

$$^*h = \sigma = 3,7d,$$

где h^* и σ выражены в градусах, а d' — в минутах дуги. Другой метод определения лунных гор принадлежит Галилею. Он основан на том, что вершина горы освещается Солнцем раньше ее подножия и выглядит светлой точкой на темном фоне неосвещенного полушария (рис. 2) на некотором расстоянии S от терминатора. Измерив S и зная радиус Луны R^* , можно по теореме Пифагора написать:

$$*(H + R)^2 = R^{2+} + S^2,$$

и пренебрегая H^2 в сравнении с $2R^*$ вычислить высоту горы

$$*H = \frac{S^2}{D}.$$

Положение точек на лунной поверхности определяется селенографическими координатами (от греч. слова Селена — Луна), аналогичными географическим координатам.

Селенографическая широта β отсчитывается от лунного экватора и считается положительной в северном полушарии Луны и отрицательной — в южном ее полушарии. Селенографическая долгота отсчитывается по экватору от начального меридиана и считается положительной в сторону видимого западного полушария и отрицательной — в сторону видимого восточного края. Отсчет ведется по координатной сетке, накладываемой на фотографию Луны.

Если два объекта имеют координаты $\lambda_1, \beta_1; \lambda_2, \beta_2$, то угловое расстояние между ними определяется по теореме косинусов

$$\cos l' = \sin \beta_1 \sin \beta_2 + \cos \beta_1 \cos \beta_2 \cos(\lambda_1 - \lambda_2),$$

а линейное расстояние между ними

$$L = \frac{2\pi R}{360} l',$$

где R^* — линейный радиус Луны.

Образец заданий

1. Вычислить угловой и линейный масштабы большой фотографической карты видимого полушария Луны и определить угловые и линейные размеры моря, протяженность горного хребта и диаметры двух кратеров.
2. Установить названия и определить селенографические координаты объектов, значащихся под номерами:
3. Вычислить угловое и линейное расстояние между теми же объектами.
4. Отождествить кратеры, значащиеся под номерами:
5. Вычислить высоту двух лунных гор, обозначенных на фотографии лунной поверхности числом и буквой:
6. Изучить фотографии спутников Юпитера: Ио, Европы, Ганимеда и Каллисто. Сравнить их внешний вид и определить особенности деталей поверхности.
7. Сравнить фотографии спутников Юпитера с фотографиями Луны. Определить сходство и различие.

Лабораторная работа №14

ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА И САТУРНА

Цель работы: изучение движения спутников Юпитера и Сатурна и расположения их относительно центральной планеты. Изучение движения колец Сатурна.

Оборудование: персональная ЭВМ, компьютерные программы «CLEA — Exercise of Jupiter Moons» и "Satellites of Saturn".

Вопросы к допуску:

1. Основные характеристики спутников Юпитера и Сатурна и колец Сатурна.
2. Характеристики движения спутников вокруг центральной планеты.

Основные теоретические сведения

Движение спутников планет. Движение спутников вокруг планет напоминает движение планет вокруг Солнца. В основном движение спутников данной планеты управляется силой притяжения планеты по закону Ньютона, и поэтому спутники движутся вокруг планет, как и планеты вокруг Солнца, по эллиптическим орбитам. Эксцентриситеты этих орбит, за редким исключением, невелики. Если планета имеет систему спутников, (например, Юпитер, Сатурн), то эти спутники движутся в плоскостях, близких друг к другу; за редким исключением спутники движутся в одном направлении.

Общее название ближайшей к центру планеты точки орбиты — перигей, а наиболее удаленной — апогей. Основной плоскостью движения является плоскость экватора планеты. Большие полуоси орбит спутников планет выражают обычно в долях радиуса планеты.

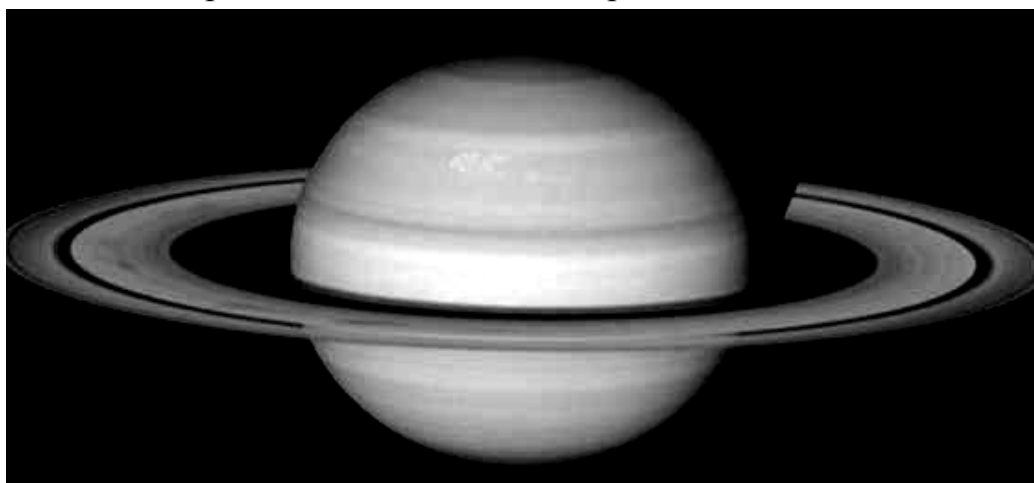
Взаимные отклонения спутников от эллиптического движения происходят за счет взаимного притяжения Солнца, играющего в данном случае роль возмущающего тела. Для некоторых спутников, которые находятся сравнительно близко к своим планетам, причиной заметных возмущений является то обстоятельство, что планеты вследствие отклонения от сферической формы притягивают не точно по закону Ньютона. В случае Сатурна на движение спутников оказывает влияние притяжение кольца, окружающего эту планету и состоящего из множества мелких материальных тел.

Наиболее интересны для наблюдений четыре ярких спутника Юпитера (I — Ио, II — Европа, III — Ганимед, IV — Каллисто), открытые еще Галилео Галилеем в 1610 году. Их можно было бы наблюдать простым глазом, если бы не мешал яркий свет планеты. Эти спутники движутся почти по круговым орбитам и почти в плоскости экватора планеты. Наблюдая с Земли, мы видим эти орбиты с ребра, так что спутники располагаются почти на одной линии, являющейся продолжением экваториальной полосы Юпитера. Спутники то прячутся за планетой (покрытие), то проходят перед ее диском, то попадают в тень планеты (затмение).

Три спутника Ио, Европа, Ганимед движутся почти в полном резонансе, с периодами обращения 1.77, 3.55, 7.16 земных суток, находящимися в соотношении 1:2:4. В небесной механике такое расположение считается устойчивым. Все эти спутники обращены к Юпитеру одной и той же стороной.

Большой интерес представляют и спутники Сатурна, особенно Титан и Япет.

Сатурн имеет сложную систему колец, хорошо наблюдаемую уже в небольшой телескоп. Кольца Сатурна увидел еще Галилей, но, из-за плохого качества своих инструментов, не смог разглядеть их детально и решил, что это какие-то образования, наподобие шаров.



Наблюдения Х. Гюйгенса подтвердили, что Сатурн имеет кольца. Применение более совершенной техники позволило Дж. Кассини открыть щель

между кольцами, которая с тех пор носит его имя.

Фотографии космического аппарата “Вояджер-1” показали, что кольца состоят из множества концентрических узких колец, общая картина которых напоминает звуковые дорожки на грампластинке.

Кольца Сатурна лежат точно в экваториальной плоскости планеты. При наблюдении с Земли, они бывают видны под разным углом. 21 мая, 11 августа 1995 года и 11 февраля 1996 года кольца поворачивались к Земле ребром и были видны в виде узкой полоски.

Внутренне кольцо С имеет размеры 17 000 км, среднее самое яркое В — 28000 км и внешнее А — 17000 км. Кольца А и В разделены щелью Кассини.

Большие кольца состоят из множества маленьких колечек, которые, в свою очередь, распадаются на отдельные частицы, причем каждая частица движется вокруг Сатурна по своей собственной орбите в соответствии с законом тяготения Ньютона. Данные спектрального анализа показывают, что частицы кольца покрыты льдом и инеем. Поэтому обладают высокой отражательной способностью.

Самые крупные частицы колец имеют размеры от 1 до 15 метров.

Частицы не могут объединиться в крупные тела, так как приливное воздействие Сатурна разрушило бы их. Скорее всего, что кольца состоят из разрушенного ранее спутника Сатурна с диаметром несколько сотен километров.

Строение колец содержит много загадок. Например, некоторые узкие кольца имеют заметный эксцентриситет, наблюдается даже “переплетенное” кольцо, в котором переплетаются три отдельных кольца или потока частиц.

Наблюдаются также радиальные темные лучи в главных кольцах. Они создаются скорее всего магнитным полем.

Литература:

1. *Астрономический календарь. Постоянная часть. М., 1981*
2. *Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. М., 1983*
3. *Бронштэн В.А. Планеты и их наблюдение. М. 1979.*

Для получения зачета необходимо:

1. Правильно выполнить задания к работе и предоставить отчет.
2. Знать названия самых ярких спутников Юпитера и Сатурна и основные закономерности движения спутников планет.
3. Знать основные характеристики колец Сатурна.

Образец заданий

1. С помощью компьютерной «CLEA — Exercise of Jupiter Moons» изучить движение четырех галилеевых спутников Юпитера за указанный период времени.
2. Нарисовать график движения спутников относительно Юпитера.
3. Определить время наступления затмений и покрытий за указанный период времени.
4. Ознакомиться с движением спутников Сатурна с помощью компьютерной программы "Satellites of Saturn" за указанный период времени.
5. Изучить движение колец Сатурна за этот же период времени и оценить степень их раскрытия.

Лабораторная работа № 15

ДВИЖЕНИЕ ЛУНЫ. СОЛНЕЧНЫЕ И ЛУННЫЕ ЗАТМЕНИЯ

Цель работы: изучение движения Луны, смены лунных фаз, условий наступления солнечных и лунных затмений.

Оборудование: персональная ЭВМ, компьютерные программы "RedShift3", "Stella 2000", Астрономический календарь (постоянная часть).

Вопросы к допуску:

1. Основные характеристики лунной орбиты, особенности движения Луны.
2. Основные понятия о затмениях. Условия наступления лунных и солнечных затмений.

Основные теоретические сведения

Луна в пространстве обращается вокруг Земли в прямом направлении (с запада на восток) по эллиптической орбите, в одном из фокусов которого находится Земля. Большая полуось лунной орбиты равна 384000 км. Это расстояние соответствует угловому диаметру Луны в $31'.1$. Ближайшая к Земле точка орбиты Луны называется *перигей*, а наиболее удаленная – *апогей*.

Луна перемещается на фоне звезд по большому кругу – лунному пути (проекция лунной орбиты на небесную сферу), который, как и эклиптика, проходит по зодиакальным созвездиям, но не совпадает с ней, а пересекается с ней под углом $i=5^\circ 9'$.

Точки пересечения, которые отстоят друг от друга на угловом расстоянии 180° , называются *лунными узлами*, *восходящим* \oslash и *нисходящим*. В восходящем узле Луна пересекает эклиптику, поднимается над ней в северном направлении и удаляется от нее на $i=5^\circ 9'$, затем приближается к ней, пересекает ее в противоположном нисходящем узле и отходит в южном направлении на то же угловое расстояние.

Период обращения Луны вокруг Земли относительно звезд называется *звездным*, или *сидерическим месяцем*. Он равен 27.32 суток.

Период вращения Луны вокруг оси равен сидерическому месяцу. А так как направление вращения Луны совпадает с направлением обращения, то, двигаясь вокруг Земли, Луна всегда обращена к ней одной стороной. Такое движение называется *синхронным*.

Промежуток времени между двумя последовательными прохождением Луной через один и тот же узел называется *драконическим месяцем*.

По причине возмущающего воздействия, в основном солнечного, лунная орбита все время поворачивается, и лунные узлы непрерывно перемещаются по эклиптике с востока на запад навстречу движению Луны на $1^\circ.5$ за сидерический месяц, совершая полный оборот по эклиптике за 18 лет и 7 месяцев.

Движение узлов существенно отражается на условиях видимости Луны, так как заметно изменяет пределы склонения Луны.

За сутки Луна смещается среди звезд по лунному пути с запада на восток почти на 13° . Поэтому каждый последующий восход Луны наступает в среднем на 52 минуты позже (точное время запаздывания зависит от склонения Луны).

Луна, двигаясь в пространстве вокруг Земли, занимает по отношению к Земле и Солнцу, ее освещающему, различные положения, которые сопровождаются меняющимся видом Луны – *лунной фазой* – от тонкого серпа до полного диска и снова к тонкому серпу.

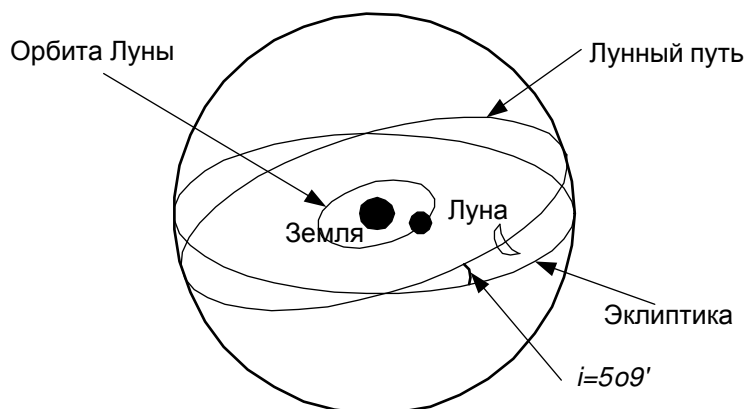


Рис. 1.

Лунной фазой называют видимую в солнечном освещении часть лунного диска и определяют отношением наибольшей ширины b этой части к диаметру d .

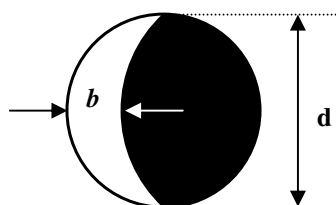


Рис.2

$$\Phi = \frac{b}{d}.$$

Выделяют 4 основные фазы Луны:

- | | | |
|-----------------------|---|-----------------|
| 1. новолуние | ● | ($\Phi=0$), |
| 2. первая четверть | ◐ | ($\Phi=0.5$), |
| 3. полнолуние | ○ | ($\Phi=1$), |
| 4. последняя четверть | ◑ | ($\Phi=0.5$). |

Промежуток времени между двумя последовательными одноименными фазами Луны называется *синодическим месяцем*. Он равен в среднем 29.53 суток.

Затмения. В своем движении вместе с Землей вокруг Солнца Луна периодически частично или полностью заслоняет Солнце, – происходят солнечные затмения – или сама попадает в тень Земли, – происходят лунные затмения.

Затмения могут происходить только вблизи лунных узлов или непосредственно в них. Кроме того, для *солнечного* затмения Луна должна находиться в *новолунии*, а для *лунного* – в фазе *полнолуния*.

Освещаемая Солнцем Луна отбрасывает в пространство сходящийся конус тени и расходящийся конус полутени. Из мест земной поверхности, оказавшейся в лунной тени, видно полное солнечное затмение, а в лунной полутени – частное.

Рассмотрим на рисунке зону наступления солнечных затмений на эклиптике. Представим себе эклиптику и пересекающийся с нею в восходящем узле δ лунный путь (рис.4.). При новолуниях, которые происходят вдали от лунных узлов (1, 6), солнечные затмения невозможны: Луна

проходит на небе (1) ниже (южнее) или (6) выше (севернее) Солнца. Чтобы произошло частное затмение необходимо внешнее касание солнечного и лунного дисков (2, 5). Это может произойти при новолуниях, наступающих не далее 18° от лунного узла, а при $l < 16^\circ$ происходят обязательно.

Полные и кольцеобразные (центральные) солнечные затмения происходят не далее $11^\circ.5$ от лунных узлов, и чем ближе к узлу, тем больше его продолжительность. Вблизи одного узла обязательно происходит одно затмение того или иного вида; редко возможно два частных. Двух центральных затмений вблизи одного узла быть не может, так как синодический месяц больше продолжительности периода центральных затмений, за время которого может произойти только одно новолуние.

Лунное затмение – явление прохождения Луны сквозь земную тень, имеющую форму *сходящегося конуса* и окруженную *расходящимся конусом полутени* (рис.5).

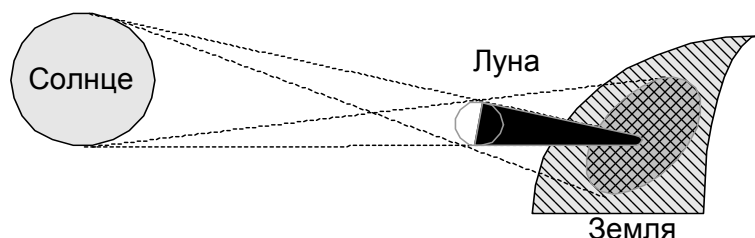


Рис. 3.

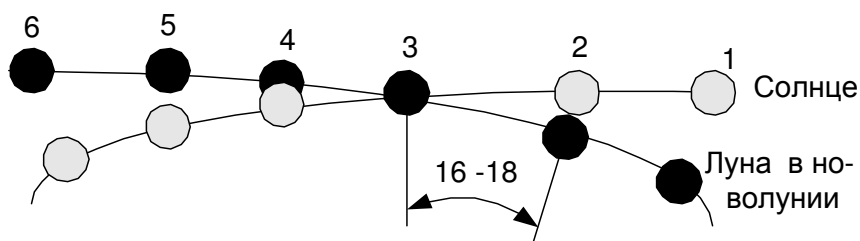


Рис. 4.

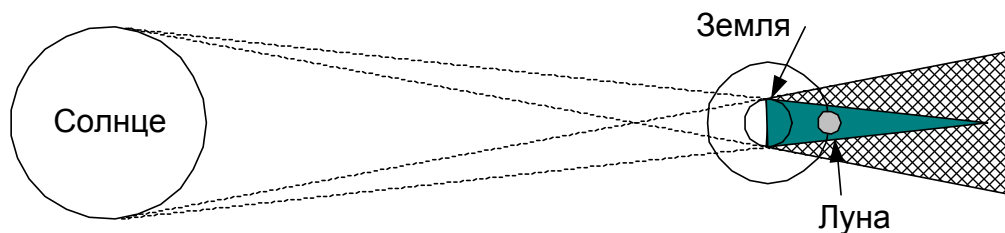


Рис. 5.

Средняя длина земной тени 1380 тыс. км, т.е. всегда больше геоцентрического расстояния Луны. Из рисунка видно: чтобы произошло лунное затмение, Луна должна противостоять Солнцу, т.е. чтобы она была в полнолунии. Угловой радиус земной тени изменяется от $38'$ до $47'$, а Луна отходит от эклиптики на угловое расстояние до $i = 5^{\circ}9'$ (рис.6), поэтому не при всех полнолуниях (a, b, g, h) может быть затмение, а только вблизи узлов (c, d, f) или в них (e).

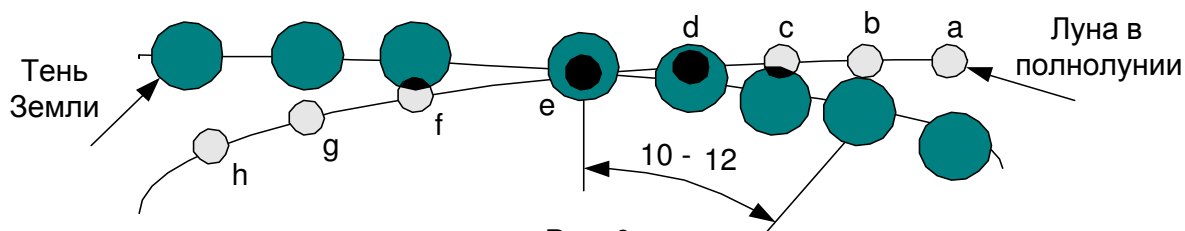


Рис. 6.

Участок эклиптики, на котором происходят лунные затмения, называется зоной лунных затмений. Он простирается на $11^{\circ}-12^{\circ}$ от лунных узлов. Полные затмения наступают не далее, чем $4^{\circ},5 - 5^{\circ},5$ от узлов.

Ежегодно наступают две эпохи затмений, разделенные примерно полугодием. Промежуток времени между затмениями в противоположных узлах составляет 177-178 суток.

Промежуток времени, через который Солнце возвращается к одному и тому же узлу, называется *драконическим годом*.

Сарос – это продолжительность цикла затмений – промежуток времени (является наименьшим общим кратным драконического года, драконического месяца и синодического месяца), через который повторяется последовательность солнечных и лунных затмений.

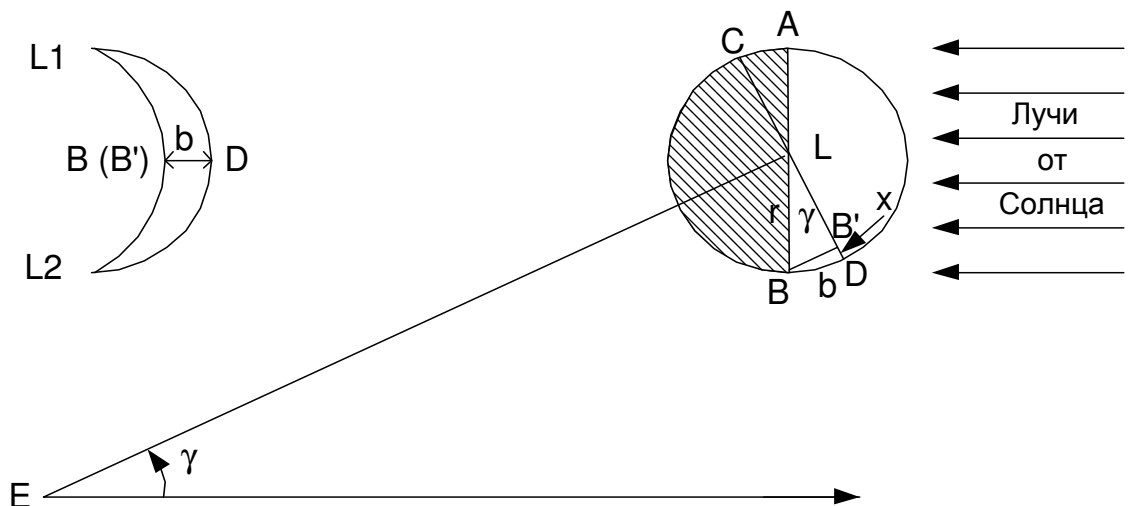
Образец заданий

1. Определить фазу Луны, если угловое удаление Луны от Солнца 60° .
2. Определить фазу Луны, если фазовый «возраст» Луны 10 дней.
3. Вычислить средние значения расстояний Солнца и Луны от лунного узла, при которых происходят частные и полные солнечные затмения.
4. Вычислить средние значения расстояний Солнца и Луны от лунных узлов, при которых происходят лунные затмения.
5. По результатам пунктов 3 и 4 вычислить длительность ежегодных периодов, в течение которых могут происходить солнечные и лунные затмения, и сформулировать вывод о возможном количестве каждого типа затмения в пределах одного периода.
6. Вычислить даты двух солнечных затмений, являющихся повторением полного солнечного затмения 11 августа 1999 года.
7. С помощью программы "RedShift 3" определить моменты начала и конца лунного затмения 10 января 2001 года в Минске.

Примеры выполнения некоторых заданий

1. Определить фазу Луны, если угловое удаление Луны от Солнца 60° .

Рассмотрим рисунок. Пусть E – центр Земли, L – центр Луны, γ — угол между направлениями на Солнце и на Луну (угловое удаление Луны от Солнца), AB – лунный терминатор, $CD = d$ – диаметр лунного диска, перпендикулярный лучу зрения земного наблюдателя.



При некотором значении γ с Земли видна освещенная часть BLD лунного диска, имеющая вид серпа, концы рогов которого L1 и L2 проецируются на чертеже в точку L; проекция точки В – точка В'. Тогда ширина диска – $b = B'D$. Так как $CD \perp EL$ и АВ перпендикулярно к направлению на Солнце, то $\angle BLD = \gamma$ и

$$x = r \cos \gamma,$$

где $r = LB = LD$ – есть радиус лунного диска. Тогда

$$b = r - x = r(1 - \cos \gamma)$$

и лунная фаза

$$\Phi = \frac{b}{d} = \frac{r(1 - \cos \gamma)}{2r} = \frac{1 - \cos \gamma}{2} = \sin^2 \frac{\gamma}{2}.$$

$$\Phi = \sin^2 60^\circ = 0.75.$$

2. *Определить фазу Луны, если фазовый «возраст» Луны 10 дней.*

Приближенное значение фазы Луны может быть найдено по количеству дней, прошедших со дня новолуния (фазовый «возраст»). Угловое удаление Луны от Солнца

$$\gamma = 360^\circ \frac{t}{S},$$

где S – синодический месяц. Тогда лунная фаза:

$$\Phi = \sin^2 \gamma = \sin^2 \left(360^\circ \frac{t}{S} \right) = \sin^2 \left(360^\circ \frac{10}{29.54} \right) = 0.72.$$

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Лабораторная работа № 1</i>	2
ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НЕБЕСНОЙ СФЕРЫ. СИСТЕМЫ НЕБЕСНЫХ КООРДИНАТ. УСЛОВИЯ ВИДИМОСТИ СВЕТИЛ НА РАЗЛИЧНЫХ ШИРОТАХ	2
Основные теоретические сведения	2
Образец заданий	6
Примеры выполнения некоторых заданий	7
<i>Лабораторная работа № 2</i>	9
ЗВЕЗДНЫЕ АТЛАСЫ, ПОДВИЖНАЯ КАРТА ЗВЕЗДНОГО НЕБА, АСТРОНОМИЧЕСКИЕ КАЛЕНДАРИ И СПРАВОЧНИКИ	9
Основные теоретические сведения	9
Образец заданий	12
Примеры выполнения некоторых заданий	13
<i>Лабораторная работа № 3</i>	14
ИЗУЧЕНИЕ СИСТЕМ СЧЕТА ВРЕМЕНИ	14
Основные теоретические сведения	14
Образец заданий	18
Примеры выполнения некоторых заданий	18
<i>Лабораторная работа № 4</i>	20
ВИДИМОЕ ГОДОВОЕ ДВИЖЕНИЕ СОЛНЦА И ЕГО СЛЕДСТВИЯ	20
Основные теоретические сведения	20
Образец заданий	23
Примеры выполнения некоторых заданий	23
<i>Лабораторная работа № 5</i>	24
ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА И КОНФИГУРАЦИИ ПЛАНЕТ	24
Основные теоретические сведения	24
Образец заданий	29
Примеры выполнения некоторых заданий	30
<i>Лабораторная работа № 6</i>	31
ИЗУЧЕНИЕ НЕБОЛЬШИХ ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ	31
Основные теоретические сведения	31
Образец заданий	37
<i>Лабораторная работа № 7</i>	38
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ И УСЛОВИЙ ВИДИМОСТИ ПЛАНЕТ	38
Основные теоретические сведения	38
Образец заданий	40
Примеры выполнения некоторых заданий	41

<i>Лабораторная работа № 8</i>	42
СПЕКТРЫ И СВЕТИМОСТЬ ЗВЕЗД	42
Основные теоретические сведения	42
Образец заданий	46
<i>Лабораторная работа № 9</i>	48
КРАТНЫЕ ЗВЕЗДЫ	48
Основные теоретические сведения	48
Образец заданий	52
Примеры выполнения некоторых заданий	53
<i>Лабораторная работа № 10</i>	55
СОБСТВЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СКОРОСТИ ЗВЕЗД. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ЗВЕЗД (ВИДИМЫХ ФИГУР СОЗВЕЗДИЙ) ИЗ-ЗА СОБСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ЗВЕЗД	55
Основные теоретические сведения	55
Образец заданий	58
Примеры выполнения некоторых заданий	58
<i>Лабораторная работа №11</i>	61
ИЗУЧЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БОЛЬШИХ ПЛАНЕТ	61
Основные теоретические сведения	61
Образец заданий	63
<i>Лабораторная работа №12</i>	64
ИЗУЧЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ОБЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА	64
Основные теоретические сведения	64
Образец заданий	66
<i>Лабораторная работа N13</i>	67
ИЗУЧЕНИЕ КАРТЫ И РЕЛЬЕФА ЛУНЫ И БОЛЬШИХ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ	67
Основные теоретические сведения	67
Образец заданий	70
<i>Лабораторная работа №14</i>	71
ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА И САТУРНА	71
Основные теоретические сведения	71
Образец заданий	73
<i>Лабораторная работа № 15</i>	74
ДВИЖЕНИЕ ЛУНЫ. СОЛНЕЧНЫЕ И ЛУННЫЕ ЗАТМЕНИЯ	74
Основные теоретические сведения	74
Образец заданий	78
Примеры выполнения некоторых заданий	78

Учебное издание

*Александр Альбертович Шимбалеv,
Владимир Семенович Гончар*

Лабораторный практикум по астрономии

Подписано в печать	Формат	Бумага писчая.
Офсетная печать. Усл.печ.л.		Уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Заказ		Цена

Белорусский государственный педагогический университет
Имени Максима танка
Лицензия

Ротапонт БГПУ им. М.Танка. 220050, Минск, ул. Советская, 18