



ФИЗИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА

teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

ОБЩАЯ АСТРОНОМИЯ

СУРДИН
ВЛАДИМИР ГЕОРГИЕВИЧ

ФИЗФАК МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН
СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ
ПРОФ. РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ
СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ.
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ
НА [VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).

ЕСЛИ ВЫ ОБНАРУЖИЛИ
ОШИБКИ ИЛИ ОПЕЧАТКИ,
ТО СООБЩИТЕ ОБ ЭТОМ,
НАПИСАВ СООБЩЕСТВУ
[VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).



БЛАГОДАРИМ ЗА ПОДГОТОВКУ КОНСПЕКТА
СТУДЕНТКУ ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ
КУЩЕНКО АННУ КОНСТАНТИНОВНУ



ОГЛАВЛЕНИЕ

ЛЕКЦИЯ 1. ЧТО И КАК ИЗУЧАЕТ АСТРОНОМИЯ	6
Роль астрономии в физике	6
Объекты изучения астрономии	8
Обсерватории	8
ЛЕКЦИЯ 2. НЕБЕСНАЯ СФЕРА. ВИДИМОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И ДВИЖЕНИЕ СВЕТИЛ.....	12
Созвездия и астеризмы.....	12
Системы координат	17
ЛЕКЦИЯ 3. ВРЕМЯ И КАЛЕНДАРЬ	25
Определение времени.....	25
Приборы для измерения времени.....	25
Сезоны года	29
Другие шкалы времени	31
Всемирное координированное время	32
Календарь	32
ЛЕКЦИЯ 4. ВИДИМОЕ И ИСТИННОЕ ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ.....	34
Фаза	34
Взаимные конфигурации планет	37
Видимое движение планет	38
Тихо Браге	41
Законы Кеплера.....	42
Законы механики и гравитации Ньютона.....	43
ЛЕКЦИЯ 5. НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА	46
Задача двух тел.....	46
Космические полеты.....	50
Орбиты спутника	53
Двойные звездные системы	56
Световые эффекты	58
ЛЕКЦИЯ 6. РАССТОЯНИЯ И РАЗМЕРЫ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ.....	60
Методы измерения расстояний	60
Методы измерения размеров небесных тел	67
ЛЕКЦИЯ 7. ВОЗМУЩЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ. ПРИЛИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ. ПРЕЦЕССИЯ.....	70
Задача трех тел	70
Приливные явления	76
Прецессия	81

ЛЕКЦИЯ 8. ПРАКТИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ	84
Измерительные приборы.....	84
Аберрация света.....	88
Измерение времени.....	90
Системы глобальной навигации.....	92
Имена астрономических объектов	94
ЛЕКЦИЯ 9. АТМОСФЕРА	95
НЛО	98
ЛЕКЦИЯ 10. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. ФОТОМЕТРИЯ	100
Основные понятия	100
Звездные величины.....	103
Спектры	105
ЛЕКЦИЯ 11. ОПТИКА	111
Задачи и инструменты оптики.....	111
Аберрация	112
Адаптивная оптика	118
ЛЕКЦИЯ 12. ОПТИЧЕСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ	120
Не телескопическая астрономия	120
Телескопы	120
ЛЕКЦИЯ 13. ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	130
Человеческий глаз.....	130
Фотопластинки.....	133
Электронные приемники.....	134
ЛЕКЦИЯ 14. НЕОПТИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ	139
Введение	139
История развития радиоастрономии.....	141
Устройство радиотелескопов.....	142
Многоапертурные радиоинтерферометры	148
Детектирование в миллиметровом диапазоне	150
ЛЕКЦИЯ 15. КОРОТКОВОЛНОВАЯ АСТРОНОМИЯ.....	152
Инфракрасная астрономия.....	154
Рентгеновская астрономия.....	156
Космические лучи.....	161
Детектирование нейтрино.....	164
Детектирование гравитационных волн.....	166

ЛЕКЦИЯ 16. ДВИЖЕНИЕ ЛУНЫ. СОЛНЕЧНЫЕ И ЛУННЫЕ ЗАТМЕНИЯ.... 170

Движение Луны.....	170
Затмения	172
Покрытия звезд Луной	178
Прохождения.....	178

ЛЕКЦИЯ 1. ЧТО И КАК ИЗУЧАЕТ АСТРОНОМИЯ

Роль астрономии в физике

Во времена Ньютона астрономия значительно двинула физику вперед. Она пришла со своими фактами, на основе которых ученые того времени (Гук, Ньютон) создали современную физику, и мы до сих пор в основном ею пользуемся. Потом физика двинулась вперед, и вот наступила вторая эпоха, примерно 20 лет назад, когда астрономия снова дала о себе знать. Она продолжает расширять границы и предлагает физикам новые явления, которые требуется объяснять, например, темную материю и темную энергию.

Сравним условия эксперимента, которых можно добиться в лаборатории с природными условиями, в которых протекают явления, изучаемые астрономией. Например, мы понимаем, что в лабораторном эксперименте никогда не добиться таких низких плотностей, которые характерны для астрономических наблюдений. Так, сверхвысокий лабораторный вакуум по плотности совпадает с солнечной короной (рис. 1.1).

Низкие и сверхнизкие плотности:

- 1 атмосфера = $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
- Сверхвысокий лабораторный вакуум $\sim 10^9 \text{ см}^{-3}$
- Солнечная корона $10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$
- Молекулярные облака $10^2 - 10^4 \text{ см}^{-3}$
- Межзвездный газ $10^{-1} - 1 \text{ см}^{-3}$
- Газ в скоплениях галактик $10^{-2} - 10^{-4} \text{ см}^{-3}$
- Средн. концентрация атомов во Вселенной $\sim 10^{-6} \text{ см}^{-3}$



Рис. 1.1. Солнечная корона.

Аналогично, в лабораторном эксперименте никогда не добиться таких высоких плотностей, которые характерны для астрономических наблюдений.

Высокие и сверхвысокие плотности:

- Осмий 22 г/см^3
- Свинец 11 г/см^3
- Средняя плотность Солнца $1,4 \text{ г/см}^3$
- Идеальный газ в центре Солнца 140 г/см^3
- Вырожденные звезды $10^5 - 10^8 \text{ г/см}^3$
- Нейтронные звезды $10^{13} - 10^{14} \text{ г/см}^3$

Нейтронные звезды помимо своей высокой плотности отличаются гигантским магнитным полем. В лаборатории взрывное обжатие позволяет получить на короткое время поле с индукцией $B = 10^8 \text{ Гс} = 10^4 \text{ Тл}$. У поверхности некоторых нейтронных звезд-магнетаров индукция магнитного поля достигает $B = 10^{15} \text{ Гс} = 10^{11} \text{ Тл}$. Плотность массы магнитного поля магнетара составляет $\rho_B = \frac{B^2}{2\mu_0 c^2} = 40 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

Для получения в лаборатории частиц высоких энергий строят адронные коллайдеры. Максимальная энергия частиц на ЛНС составляет $(7 \div 14) \cdot 10^{12} \text{ эВ}$, в проекте VLHC, планируемом к запуску в 2030-2035 гг., ожидается получить энергии $\sim 10^{12} \text{ эВ}$. Из космоса же мы даром получаем энергии следующего порядка:

- До 10^{10} эВ – солнечные космические лучи
- До 10^{17} эВ – галактические космические лучи
- До 10^{20} эВ – частицы внегалактического происхождения, природа их малопонятна

Астрономы были уверены, что звезды есть главное население космоса, а все остальное – мелочи. Оказалось, что это не так, все звёзды и планеты и межзвездный газ, и вообще все, что изучало наше поколение, составляет лишь 5% содержимого Вселенной (рис. 1.2). Современная наука о Вселенной, то есть астрономия и физика, подобны айсбергу, большая часть которого пока скрыта от нас и обещает много неожиданных и захватывающих открытий.

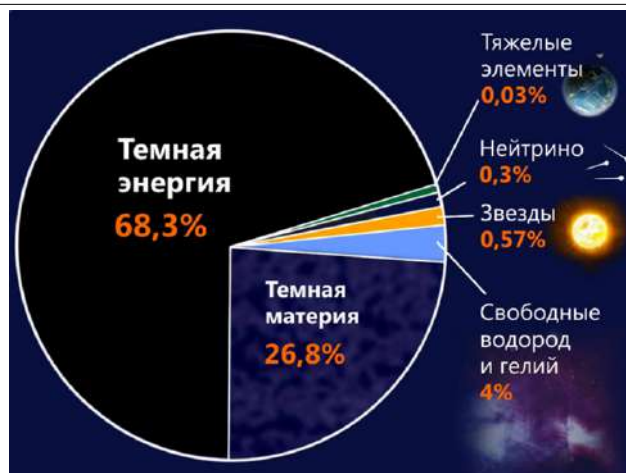


Рис. 1.2. Состав Вселенной.

Объекты изучения астрономии

Теперь поговорим о том, чем мы будем заниматься, во-первых, какие типы объектов мы будем изучать. Ночное небо усеяно звездами, больше мы ничего не видим, поэтому, конечно, астрономия в основном крутится вокруг звезд. Их много, они очень интересны, и, честно говоря, все еще остается колоссальное количество нерешенных проблем, связанных с ними.

Объекты изучения астрономии:

- Звезды
- Планеты Солнечной системы
- Спутники (Луна, Ио – спутник Юпитера, Гиперион и Титан – спутники Сатурна)
- Малые тела Солнечной системы, так называемые, астероиды (Итокава, Комета 67P/Чурюмова-Герасименко)
- Далекие объекты (Галактика в Андромеде, Туманность Ориона)
- Межзвездная пыль
- Темная корона Галактики (темная материя)
- Скопления галактик

Обсерватории

Поговорим о том, где работают астрономы, и чем занимаются. Наши астрономы работают в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штенберга (ГАИШ МГУ). ГАИШ занимается и научными исследованиями и преподаванием. Однако лучше для наблюдений уходить из города. В Европе это сделать трудно, на сегодняшний день обсерватория Пик-дю-Миди в горах во Франции является лучшим местом в Европе для наблюдения неба.



Рис. 1.3. Здание ГАИШ МГУ.

Если мы взглянем на ночную карту Земли, то по повышенной яркости ночного освещения мы сразу выделим места, где астрономам делать нечего. Высокогорные пустыни с сухим воздухом лучше всего безветренной атмосферы – это идеальные места для астрономической работы. Тем не менее, конечно, в Европе можно найти дикие места, но там, как правило, располагаются маленькие уютные обсерватории на пике горы, большой телескоп туда не занесешь.

Известные существующие обсерватории:

- Обсерватория Сфинкс в Альпах
- Пик-дю-Миди во Франции
- Европейская южная обсерватория (ESO) в Чили
- Летающая обсерватория SOFIA (NASA/DLR)
- Космический телескоп «Хаббл» (NASA/ESA)
- Космический телескоп «Дж. Вебб» (NASA/ESA/CSA)

У земли становится трудно заниматься астрономией, отчасти благодаря Илону Маску и прочим энтузиастам космонавтики, которые окружили Землю большим количеством спутников. Таким образом, мы теряем информацию о космосе. Радиоастрономам вообще стало немыслимо тяжело, все наши гаджеты – это же радиопередатчики, и они уже полезли в те диапазоны радиоизлучения, которые раньше отводились только для радиоастрономии, а теперь все это создает шум. Мешают наблюдению и естественные источники света: в полнолуние работать на земле астроному невозможно.

В 19 веке астроном вынужден был находиться у телескопа и вести наблюдения глазом (рис. 1.4). Позже появились такие большие телескопы, что нужно было сидеть уже не рядом с ними, а внутри них, но, тем не менее, фотопластинкой приходилось управлять руками (рис. 1.5). Теперь астроном сидит за компьютером с чашечкой кофе

совершенно отдельно от телескопа, не мерзнет, как это обычно было раньше. Наконец, совсем далеко от своей аппаратуры мы оказываемся, когда запускаем ее на зондах к далеким планетам (рис. 1.7).



Рис. 1.4. Астроном в 19 веке.



Рис. 1.5. Эдвин Хаббл внутри телескопа.



Рис. 1.6. ГАИШ МГУ.



Рис.1.7. Аппаратура ГАИШ МГУ.



Рис. 1.8. Космические обсерватории.

ЛЕКЦИЯ 2. НЕБЕСНАЯ СФЕРА. ВИДИМОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И ДВИЖЕНИЕ СВЕТИЛ

Созвездия и астеризмы

Наши предки воспринимали звездное небо как некий купол, который раскинут над нами, или же, как абстрактную сферу неопределенного радиуса, в центре которой находимся мы – наблюдатели.



Рис. 2.1. Карта звездного неба.

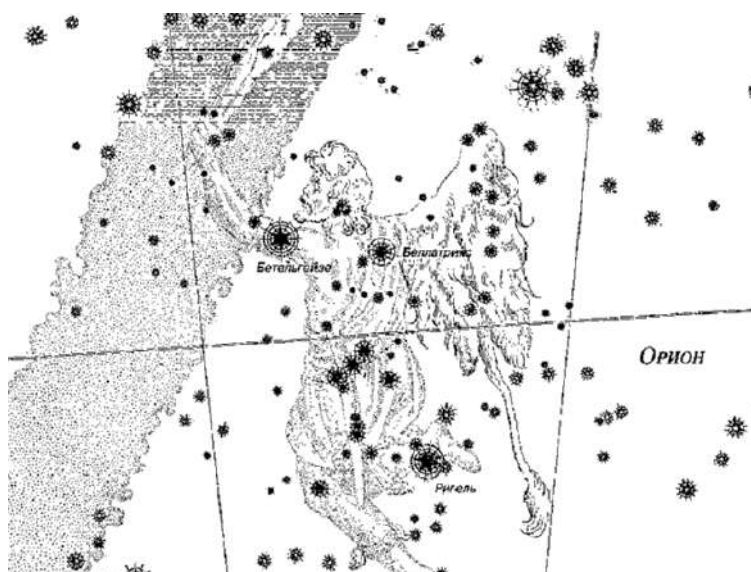


Рис. 2.2. Карта звездного неба начала XVII века.

Древние люди интересовались этим и какие-то группы звезд объединяли в своем воображении. Как называются группы звезд на небе? Обычно используют термин созвездия и редко употребляют термин астеризм, но мы, будучи астрономами, должны четко разделять эти два понятия. Астеризм – это характерная группа звезд, которая

обычно является лишь частью созвездия. На рис. 2.3 в качестве примера выделены и соединены линиями звезды, входящие в астеризм Ориона. На рис. 2.4 всем известный «ковш» является астеризмом, созвездие же большой медведицы включает в себя куда больше звезд.



Рис. 2.3. Астеризм Ориона.

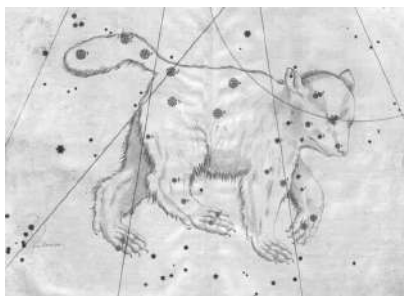


Рис. 2.4. Созвездие большой медведицы.

Астрономам надо было как-то разобраться и с созвездиями, то есть разбить небо на участки. В старых работах описаны созвездия, но границы их не указаны, они передавались устным путем из поколения в поколение. Карты древних греков до нас не дошли. В XVII – XVIII веке начали печатать карты, но границы созвездий на них были условными: один картограф нарисует так, другой будет перерисовывать и немного по-другому проведет границу, и, таким образом, звезды, которые были рядом с традиционными границами, могли перепрыгивать туда-сюда из одного созвездия в другое.

Неуверенные границы перестали устраивать астрономов, и когда в начале XX века образовался Международный астрономический союз, первое что было предложено – это разбить небо на четкие созвездия, чтобы названия объектов несли в себе имя созвездия, и мы сразу понимали, где на небе расположен данный объект. За основу, конечно, взяли европейскую культуру (альмагест Птолемея), добавили несколько южных созвездий, которые открывали в XV – XVI веках мореплаватели, и впервые разбили небо четкими границами. Названия созвездий остались такими, какими они были в древнегреческой традиции.

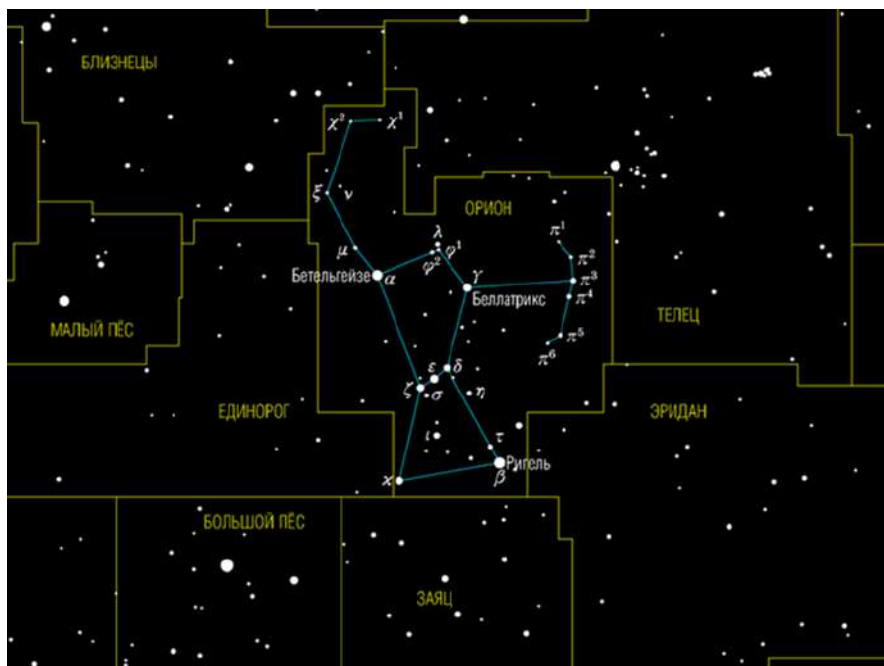


Рис. 2.5. Карта неба с четкими границами созвездий.

Откуда на рис. 2.5 взялись эти прямоугольные ломаные линии – их провели по линиям сетки координат того времени. Работа по установлению границ созвездий была закончена в 1930 году, но еще действовала сетка координат 1885 года. Это удобно, потому что достаточно задать координаты точек поворота в текстовом виде или в виде таблицы, и не нужно каждый раз иметь при себе карту.

Созвездие и астеризм, на самом деле, есть условные вещи. Никакой генетической реальной связи между объектами одного созвездия нет: те объекты, которые мы видим на фоне какой-то площадки, совершенно друг с другом не связаны (рис. 2.6). Кстати, звезды, которые видны невооруженным глазом, отнюдь не являются ближайшими к нам. Как раз среди ближайших звезд, редко какую можно увидеть невооруженным глазом, потому что большинство звезд – это слабо светящиеся красные карлики, их много рядом с нами, но они такие тусклые, что глазом их почти не видно.

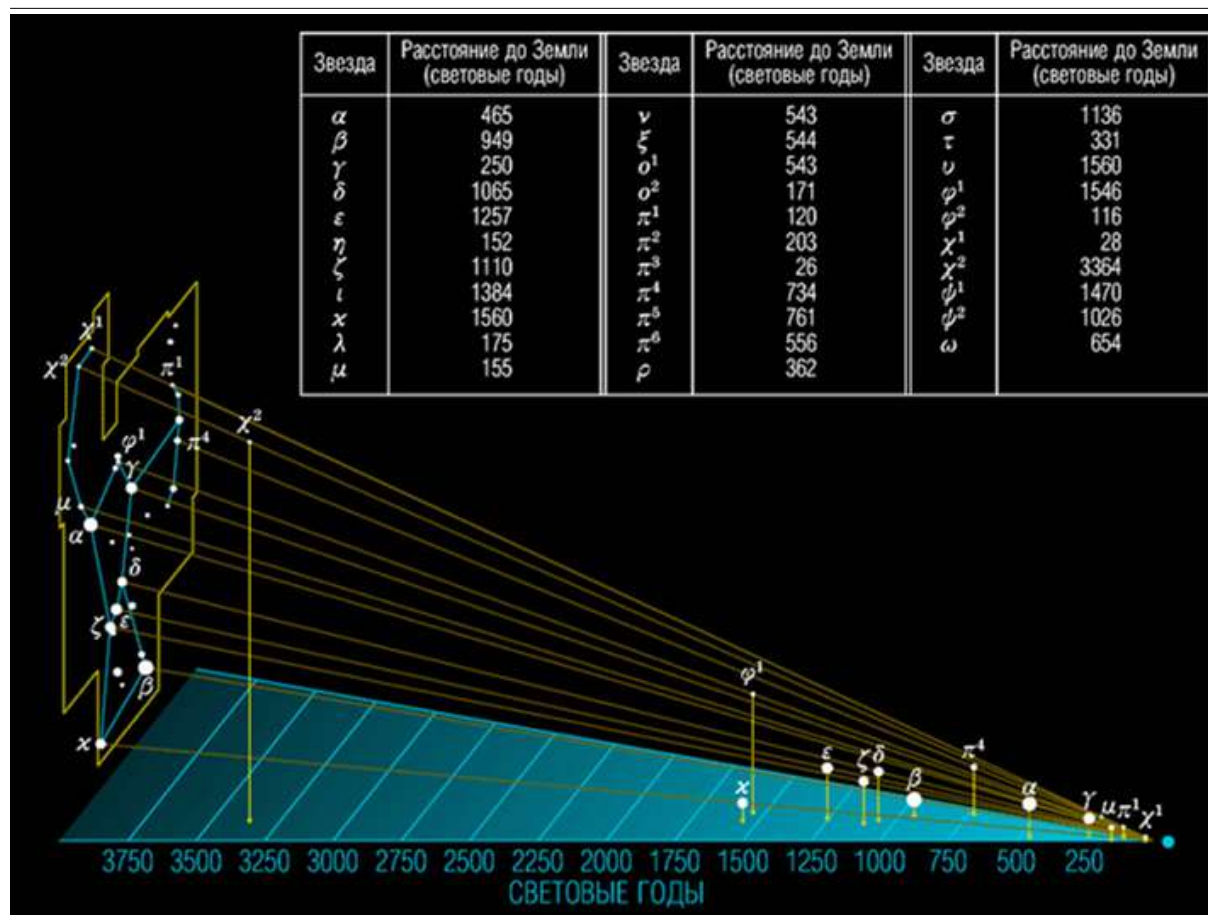


Рис. 2.6. Схема формирования созвездия Ориона.

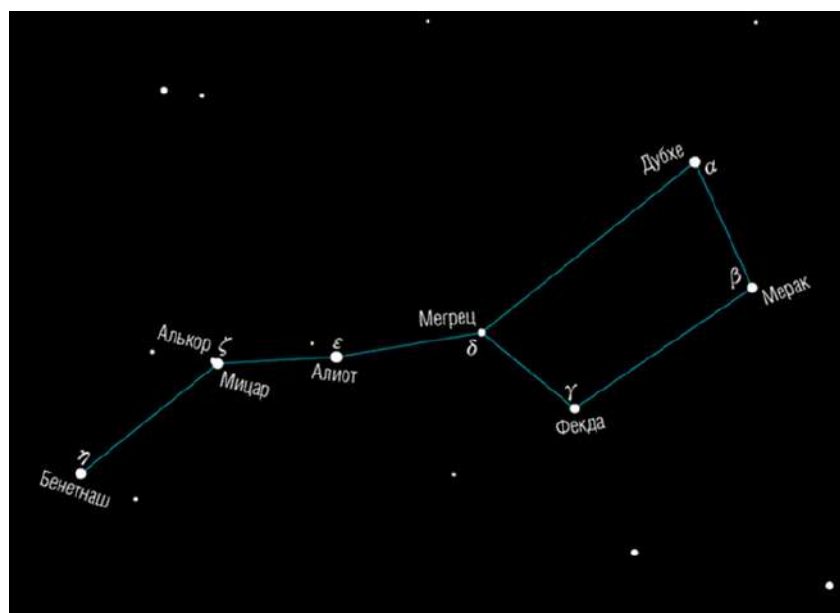


Рис. 2.7. Астеризм Большой медведицы.

В конце XVI – начале XVII века для звезд в созвездии появились обозначения буквами греческого алфавита, придумал их европейский картограф Иоганн Байер (рис. 2.7). Правда, он в ковше Большой медведицы почему-то обозначил звезды $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ вдоль ковша, в большинстве других созвездий обозначение α имеет ярчайшая звезда, β – вторая по яркости и т.д. Иногда Байер ошибался и на глаз неправильно определял яркость звезд. Когда для обозначения звезд в созвездии не хватало греческих букв, Байер использовал латинские, позже, когда не хватало и их стали использовать цифры. Помимо буквенного обозначения у многих ярких звезд есть личные имена. Откуда они к нам пришли, мы можем только догадываться. До нас дошли примерно две с половиной сотни личных имен звезд.

Давайте посмотрим на астеризм Большой медведицы в объеме (рис. 2.8), мы видим, что крайние звезды α и η расположены дальше от нас, а центральная группа звезд находится почти на одном расстоянии от нас. Химический состав этой группы оказался одинаковый, так же как и возраст звезд в ней. Это намек на то, что эти звезды генетически связаны.

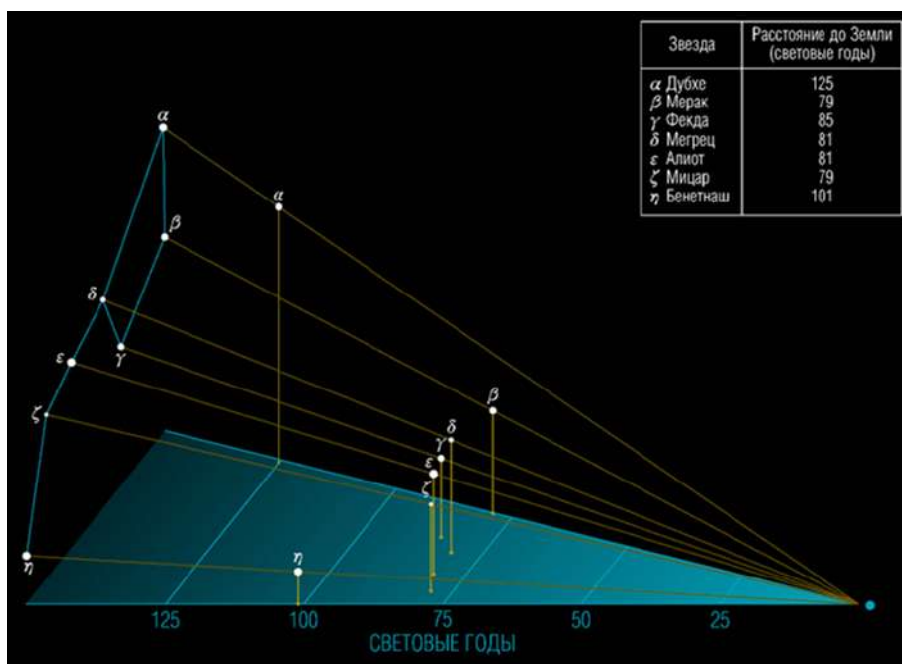


Рис. 2.8. Схема формирования созвездия Большой медведицы.

Астрономы уже примерно 200 лет измеряют положение звезд на небе, было замечено, что они немного перемещаются друг относительно друга. Такое взаимное перемещение звезд друг относительно друга называется собственным движением звезд. Подобное движение характерно и для звезд «ковша» Большой медведицы (рис. 2.9). Обратим внимание на то, что сдвигаются только крайние звезды, звезды же центральной группы почти не меняют свое взаимное расположение. Это значит, что они в пространстве движутся параллельно или почти параллельно, и уже нет никаких сомнений, что это группа генетически связанных звезд, то есть родившихся в одно и то

же время, в одном и том же месте, конечно, не в такой разреженной, а в более компактной группе внутри какого-то молекулярного облака. Потом облако рассеялось, звезды начали понемногу расходиться в пространстве, уже потеряли гравитационную связь, но еще не потеряли взаимную конфигурацию. Астрономы называют такие группы звезд движущимися звездными скоплениями.

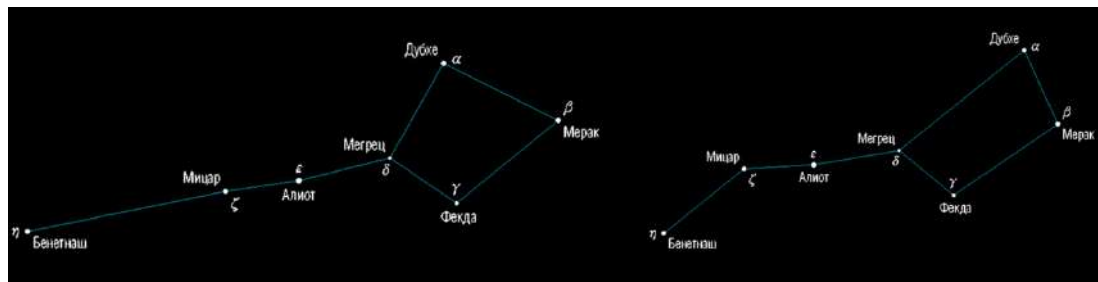


Рис. 2.9. «Ковш» Большой медведицы 100 000 лет назад (слева) и в настоящее время (справа).

Системы координат

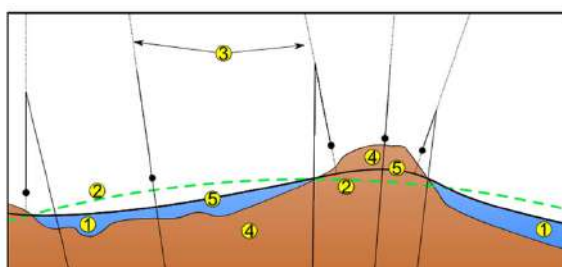
Координаты в пространстве:

- Декартова СК
- Полярная СК

Географическая СК представляет собой полярную систему координат с двумя угловыми параметрами: широта и долгота (рис. 2.10). Широту можно определить, зная направление на Полярную звезду и на центр Земли. Последнее можно приближенно определить при помощи отвеса. Однако не все так просто, потому что Земля является сложной поверхностью (рис. 2.11) и представляет собой шар лишь в первом приближении. Во втором приближении мы вспоминаем, что она крутится, значит, это сплюснутый вдоль оси вращения эллипсоид. В третьем приближении мы ориентируемся на поверхность океана, которая задает нам потенциальную поверхность постоянной силы тяжести, и получаем, так называемый, сфероид. В геофизике существует множество подходов к описанию поверхности Земли: по поверхности мирового океана, земной эллипсоид (сфероид), геоид и т.д. (рис. 2.11). Соответственно, выделяют следующие виды географической широты: геоцентрическая, геодезическая и астрономическая (рис. 2.12).



Рис. 2.10. Географическая система координат.



1. Мировой океан
2. Земной эллипсоид (сфероид)
3. Отвесные линии
4. Тело Земли
5. Геоид

Рис. 2.11. Поверхность Земли.



Рис. 2.12. Виды географической широты в зависимости от модели.

Однако для того, чтобы определить направление к центру Земли, чаще используют не отвес, а поверхность, перпендикулярную к направлению силы тяжести, так называемый, идеальный горизонт. Например, в приборе для измерения высоты

звезд над горизонтом (астролябия) разливается ртуть и, таким образом, создается идеальная горизонтальная поверхность. Обратим внимание, что идеальный горизонт всегда выше видимого, это нужно учитывать при расчетах.

Наблюдая небесные светила, мы можем представить себя в центре небесной сферы, на поверхности которой для указания положения объектов можно использовать сферическую систему координат. Вводят две угловые координаты на небесной сфере: азимут и высота. Высота отсчитывается от плоскости горизонта, а азимут – в плоскости горизонта от точки юга (географы и геодезисты отсчитывают азимут от точки севера) вдоль суточного движения небесной сферы (рис. 2.13). Астрономы вводят следующие понятия: альмукантарат – круг на небесной сфере постоянной высоты, вертикал (круг высоты) – круг, вдоль которого изменяется высота.

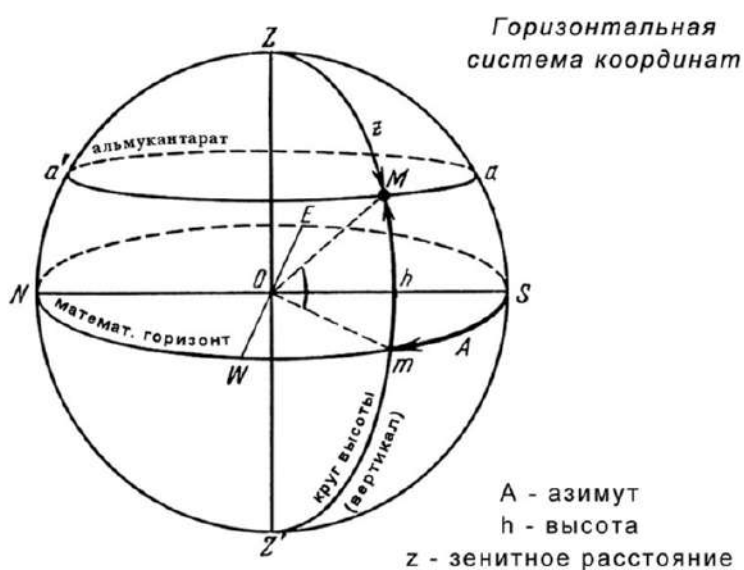


Рис. 2.13. Горизонтальная система координат небесной сферы.

Минус горизонтальной системы координат заключается в том, что она локальна, т.е. изменяется в зависимости от наблюдателя, такая система координат, например, неудобна для составления атласов.

Продлим ось вращения Земли на бесконечность, точки пересечения оси с небесной сферой назовем северным и южным полюсами мира (рис. 2.14). Ось вращения Земли совпадает с осью вращения неба. Видимое движение звезд происходит параллельно экватору Земли (или же небесному экватору). Любой объект на небе в течение суток описывает, так называемую, суточную параллель. Если мы будем измерять расстояние от экватора до какого-либо объекта на небе, то оно не будет меняться в течение суток. Таким образом, небесный экватор дает нам опору в создании новой системы координат. Проецируем сетку географических координат на небесную сферу и получаем экваториальную систему координат.

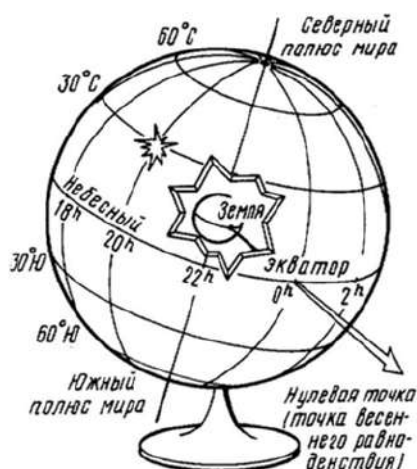
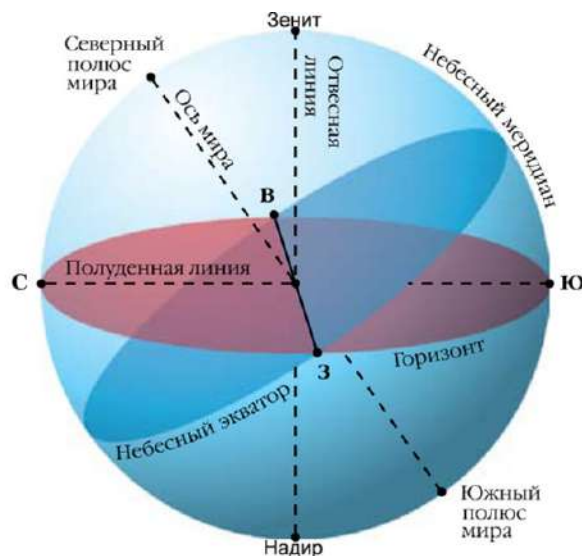


Рис. 1.3. Небесный глобус.

Экваториальная система координат всегда как-то ориентирована по отношению к нашей локальной горизонтальной системе (рис. 2.15). Существует теорема о том, что высота полюса мира равна географической широте.



Итак, небесный экватор дает нам опору для измерения одной координаты, аналога географической широты. Необходимо ввести аналог долготы, для этого требуется определить на небе нулевой меридиан. Мы знаем, что Земля вращается

вокруг Солнца, таким образом, Солнце в течение года описывает на небесной сфере окружность в плоскости земной орбиты (эклиптика). К счастью ось вращения Земли не перпендикулярна земной орбите: плоскость земного экватора и плоскость земной орбиты пересекаются под углом примерно $23,5^\circ$. Солнце дважды в год пересекает небесный экватор в точках весеннего и осеннего равноденствия (рис. 2.16). Например, от точки весеннего равноденствия и можно вести отсчет аналога долготы.

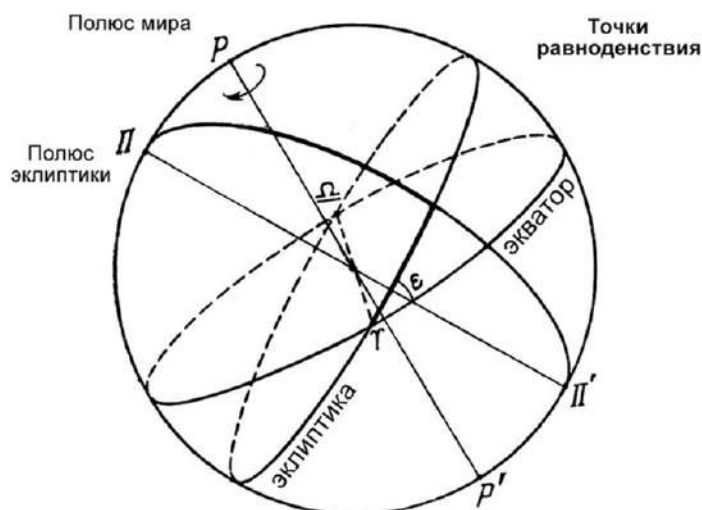


Рис. 2.16. Точки равноденствия.

Мы получили экваториальную систему координат на небе, аналогичную географической системе. Аналогичный широте угол называется склонением δ , а аналогичный долготе – прямым восхождением α . У астрономов сложилась одна неприятная традиция измерять эти два угла в разных единицах: углы склонения в обычных градусах $\delta \in [-90^\circ, +90^\circ]$, а прямое восхождение в часах, минутах и секундах, так называемая, часовая мера измерения времени. В современных программах электронных планетариев оба угла уже измеряются в обычных градусах.

Существует второй вариант экваториальной системы координат, где вместо прямого восхождения используется, так называемый, часовой угол t . Он отсчитывается от плоскости небесного меридиана до светила и меняется со временем. Первая экваториальная система координат: δ, t ; вторая экваториальная система координат: δ, α (рис. 2.17).

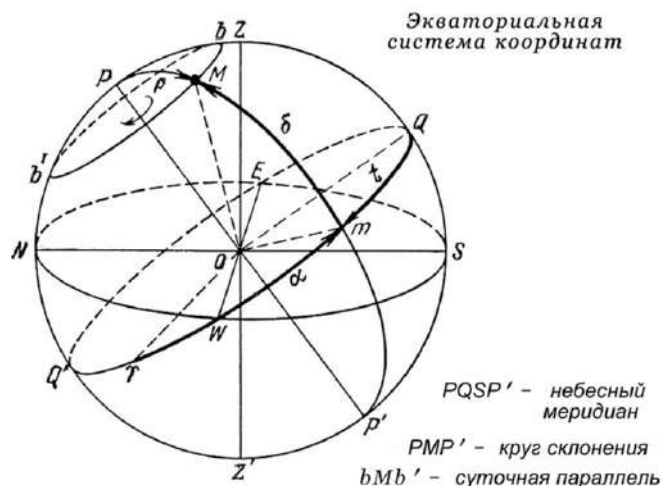


Рис. 2.17. Два варианта экваториальной системы координат.

Движение в течение суток любого светила проводит его через две экстремальных точки: нижняя и верхняя кульминация, соответственно, самое нижнее и самое верхнее положение над плоскостью горизонта. Если светило расположено недалеко от полюса, то мы видим обе кульминации, если светило далеко от полюса, то нижняя кульминация может уйти под горизонт, и мы ее не увидим (рис 2.18).

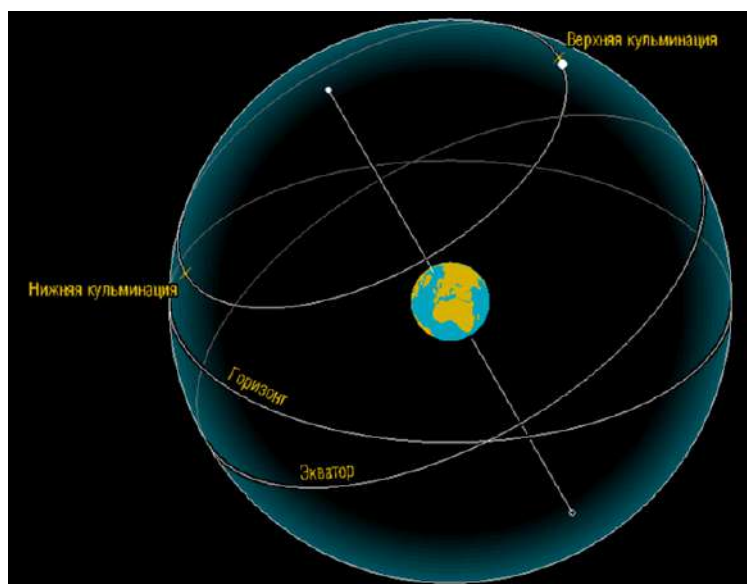


Рис. 2.18. Точки кульминации.

Для любого наблюдателя (на разных широтах) небо делится на три части: звезды, которые никогда не заходят за горизонт (незаходящие); звезды, которые никогда не восходят над горизонтом (невосходящие) и звезды, которые восходят и заходят над горизонтом в течение суток.

Если мы изучаем движение объектов Солнечной системы, удобно использовать, так называемую, эклиптическую систему координат (рис. 2.19). Орбиты объектов Солнечной системы лежат вблизи плоскости земной орбиты, поэтому выгодно за основу системы координат использовать не экватор Земли, а плоскость орбиты Земли. Вводят эклиптические координаты, соответственно, эклиптическую широту и долготу.

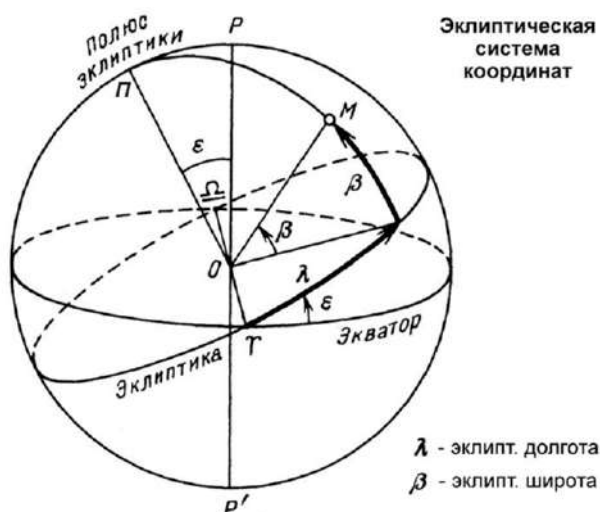


Рис. 2.19. Эклиптическая система координат.

Недостатком всех систем координат, а особенно экваториальной, является то, что плоскость экватора Земли не сохраняется, то есть Земля со временем меняет направление вращения (рис. 2.20). Это явление называется прецессией, земная ось прецессирует с периодом примерно 26 тысяч лет, это довольно заметное движение. Причиной прецессии является притяжение внешних тел, таких как Луна, Солнце, Юпитер и т.д. Прецессия земной оси смещает точки равноденствия по эклиптике в направлении суточного движения светил (т.е. навстречу годовому движению Солнца) со скоростью около $50''$ в год, делая более ранними (т.е. предвывая) моменты равноденствий. Постоянное изменение ориентации небесного экватора и перемещение точки весеннего равноденствия вызывает изменение экваториальных координат всех небесных светил. Поэтому в астрономических каталогах и атласах указывается эпоха (нижний индекс), для которой приведены координаты звезд, например: $\alpha_{1950.0} = 00^h 00^m 00^s$, $\delta_{1950.0} = 00^\circ 00' 00''$ и $\alpha_{2000.0} = 00^h 02^m 34^s$, $\delta_{2000.0} = 00^\circ 16' 42''$.



Рис. 2.20. Прецессия земной оси.

Такое положение дел перестало устраивать астрономов (это связано с активным запуском в то время космических телескопов) и накануне 2000 года решили отказаться от экваториальных координат, навсегда закрепив на небе ту сетку, которая была в 2000 году. Началом отсчёта новой системы координат является барицентр Солнечной системы. Координаты ее максимально приближены к экваториальным координатам эпохи J2000.0. Оси системы зафиксированы в пространстве относительно нескольких сотен квазаров – наиболее удалённых объектов наблюдаемой Вселенной, их собственное движение так мало, что им можно пренебречь. Полученная система координат независима от вращения Земли. Она получила название Международной небесной системы координат (International Celestial Reference System – ICRS).

Если мы изучаем Галактику, удобно использовать, так называемую, галактическую систему координат (рис. 2.21), основанную на плоскости Галактики.

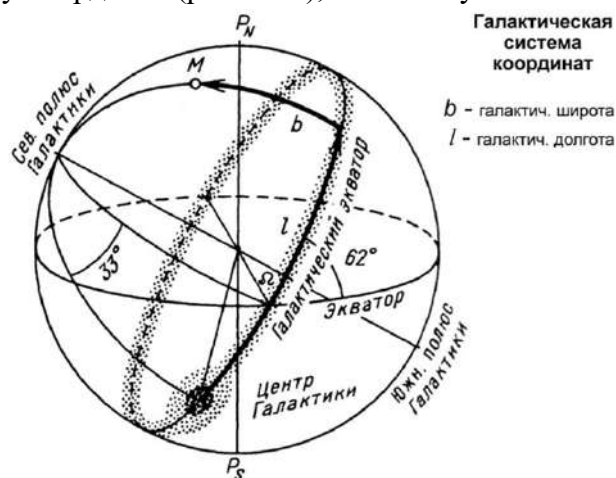


Рис. 2.21. Галактическая система координат.

ЛЕКЦИЯ 3. ВРЕМЯ И КАЛЕНДАРЬ

Определение времени

Что такое время? Невозможно дать точное определение времени. Философ скажет, что время – это длительность... Для физика главное найти метод измерения времени, есть разные варианты, как правило, мы находим в природе или создаем самостоятельно периодический процесс и считаем, что время – это количество периодов данного периодического процесса. (Однако строго периодических процессов в природе нет.) Можно создать теорию движения, бросая мяч под углом к горизонту и измеряя пройденное расстояние, тогда время – это аргумент уравнений динамики $s = \frac{gt^2}{2}$.

Приборы для измерения времени

Приборы для измерения времени:

- песочные часы
- водяные часы
- огненные (огневые) часы
- огненные часы-лампада
- китайские огненные часы-будильник
- часы с анкерным механизмом
- часы Федченко
- часы с балансирным механизмом
- полярные часы
- морской хронометр
- электрические кварцевые часы
- атомные часы
- солнечные часы

Постепенно появилась необходимость повышать точность приборов. Первым на это обратил внимание еще Галилео Галилей. Он заметил, что при небольшой амплитуде раскачивания маятника период колебаний $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ не зависит от самой амплитуды. Ученые изобрели, так называемый, анкерный механизм, который, с одной стороны, позволяет использовать маятник как регулятор хода часов, а, с другой стороны, поставляет маятнику энергию, не позволяя колебаниям затухнуть (рис. 3.1).

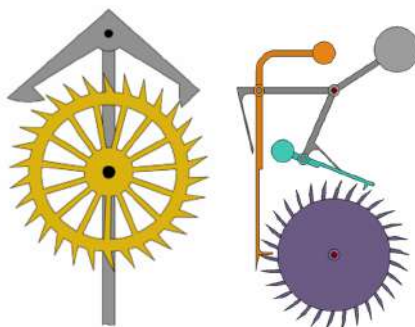


Рис. 3.1. Анкерный механизм.

Самые точные маятниковые часы, конечно, были нужны астрономам, и наш отечественный инженер Федченко разработал, так называемые, часы Федченко (рис. 3.2). Прибор представляет собой колбу с маятником, из которой откачан воздух для того, чтобы маятник мог свободно колебаться без трения. Маятник подвешен на сапфировом кристалле, рассеяние энергии минимально. Анкерный механизм в часах не используется. Часы Федченко активно использовались до середины 60-х годов прошлого века, пока не появились другие механизмы. Точность хода этих часов составляет 10^{-8} , что означает ошибку не более чем на одну секунду за год.

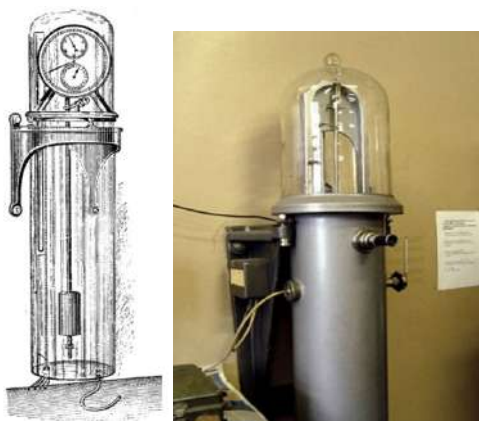


Рис. 3.2. Часы Федченко.

Подвесной маятник хорошо использовать для стационарных часов, а что делать с наручными часами? Но ведь маятник может колебаться не только под действием гравитации, но и под действием пружинки, так называемый, балансирующий механизм (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Балансирный механизм.



Рис. 3.4. Полярные часы.

Настала эпоха электричества, и появились электрические кварцевые часы, принцип работы которых основан на пьезоэлектрическом эффекте. Пьезоэлектрический эффект – возникновение поляризации диэлектрика под действием механических напряжений (прямой пьезоэлектрический эффект). Обратный пьезоэлектрический эффект – возникновение механических деформаций под действием электрического поля. При прямом пьезоэффекте деформация образца приводит к возникновению электрического напряжения между поверхностями твердого тела, при обратном пьезоэффекте приложение напряжения к телу вызывает его деформацию. Колебания суточного хода кварцевых часов составляют $\pm 10^{-5} \div 10^{-6} \text{ с}$.



Рис. 3.5. Электрические кварцевые часы.

Однако буквально лет через двадцать после изобретения кварцевых часов появились еще более точные атомные часы, работающие на колебаниях электронов в атомах. Относительная точность хода атомных часов в десятки миллионов раз выше, чем у хороших механических часов и составляет $10^{-13} \div 10^{-14}$. Вещество, используемое в атомных часах, может быть разным, чаще используется цезий Cs. В 1967 г. международным соглашением длительность секунды была определена как 9192 631 770,0 периодов колебаний, соответствующих энергетическому переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атомов единственного стабильного изотопа цезия ^{133}Cs . На самом деле, есть еще более точные механизмы – атомные часы на водороде. Они почти на порядок точнее цезиевых часов, но так как они более капризны, с ними еще не научились надежно работать.

Атомные часы постоянно совершенствуются, их изобрели в конце 40-х гг. Из года в год ошибка их отсчета постоянно снижается. После 2000-х гг. поняли, что источником ошибки является собственное движение атомов водорода, и придумали лазерное охлаждение. Точность счета атомных часов на сегодняшний день составляет 10^{-14} , то есть такие часы ошибутся не больше чем на одну-две секунды за время жизни Вселенной.

Древние люди тоже нуждались в отчетах времени, пусть и не очень точных. Главным регулятором времени у древнего человека всегда было Солнце. (Однако существуют народы, которые больше ценят Луну.) Наши привычные отрезки времени связаны с движением Земли, Луны и Солнца. Год – это оборот Земли вокруг Солнца (ок. 365,25 сут.). Месяц – период смены лунных фаз (ок. 29,5 сут.), не равен периоду обращения Луны (27,3 сут.). Сутки – период вращения Земли относительно Солнца.

Когда наступает ночь, и нет солнца, необходим какой-то другой индикатор времени – звездное небо. Опытные люди по положению ковша большой медведицы довольно точно могут определить час ночи. Арабы в свое время даже придумали, так называемые, звездные часы (ноктурнал).

Звездное и солнечное время отличаются друг от друга. Звездное время нужно только астрономам, нормальные люди понятия не имеют о существовании такой шкалы и живут по солнечному времени. Для отсчета звездного времени берем какую-либо звезду с известными координатами, смотрим момент ее прохождения через меридиан и добавляем к этому часовому углу взятое из каталога значение прямого восхождения звезды, получаем часовой угол точки весеннего равноденствия, который нам служит условной стрелкой на циферблате звездного неба (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Звездное время.

Вследствие движения Земли по орбите солнечные сутки длиннее звездных приблизительно на 3 минуты 56 секунд. Звездные сутки (т.е. период вращения Земли) равны $23^h 56^m 04^s$ среднего солнечного времени, а солнечные сутки – $24^h 03^m 57^s$ звездного времени.

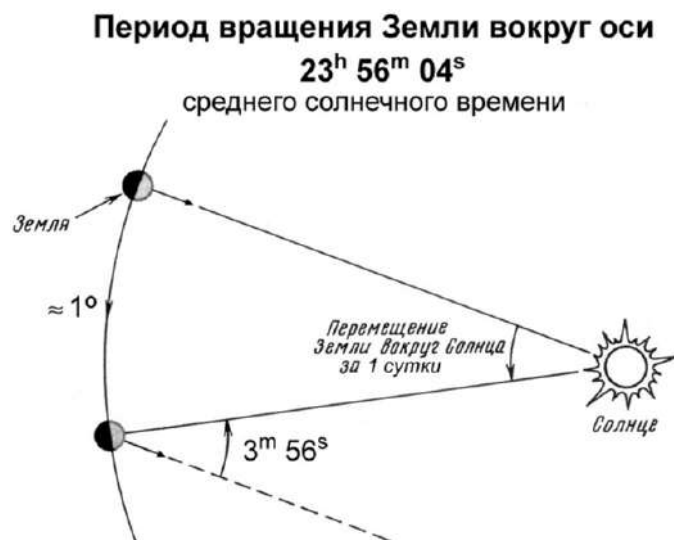


Рис. 3.7. Перемещение Земли вокруг Солнца за 1 сутки.

Сезоны года

В чем причина смены сезонов года? Каждый второй уверен, что смена сезонов происходит, потому что Земля летом расположена ближе к Солнцу, а зимой – дальше от Солнца. На самом деле, конечно, орбита Земли не круговая, а эллиптическая, но это очень слабый, практически незаметный эффект. Истинная причина заключается в том, что ось вращения Земли не перпендикулярна плоскости эклиптики. Земля меняет свое положение относительно Солнца и, учитывая, что ось наклонена к плоскости земной орбиты, мы видим, что полгода лучше освещается северное полушарие, а вторые

полгода – южное. Есть два периода, когда Солнце одинаково хорошо освещает и северное, и южное полушарие Земли – весеннее и осеннее равноденствие. Тогда вращение Земли создает нам одинаковую продолжительность дня и ночи, по 12 часов.

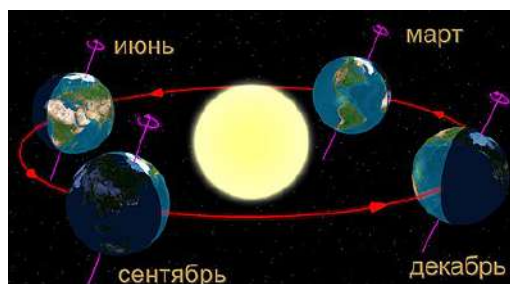


Рис. 3.8. Иллюстрация причины смены сезонов года.

Солнце бродит по эклиптике, то есть в плоскости земной орбиты, а Земля вращается в плоскости экватора, эти два движения приводят к тому, что видимое положение Солнца, его часовой угол, неравномерно меняется.

Продолжительность светлого и темного времени суток, конечно, зависит от географической широты. Если мы находимся в районе экватора, то в течение года продолжительности дня и ночи практически не меняется и составляет примерно 12 часов. На средних широтах мы имеем короткие летние ночи, а за полярным кругом месяца полтора идет полярный день и месяца полтора – полярная ночь.

В районе равноденствий Солнце движется под углом к экватору, его проекция на экватор замедляет свое движение, потом через четверть года Солнце двигается параллельно эклиптике, и скорость эффективно увеличивается. Таким образом, дважды в году часовой угол Солнца то увеличивается, то уменьшается. Эта первая причина называется уравнением от наклона эклиптики, то есть ошибка в движение истинного солнца по сравнению с равномерной шкалой времени. Вторая причина заключается в некруговой форме земной орбиты (эксцентриситет).

Полученный суммарный эффект можно представить в виде аналеммы, которая показывает ошибку во времени положения Солнца, когда оно запаздывает к меридиану к моменту полудня или, наоборот, пересекает меридиан раньше настоящего среднего полудня (рис. 3.9).



Рис. 3.9. Аналемма.

Другие шкалы времени

Астрономические шкалы времени:

- Солнечное (всемирное) время
- Гринвичское звездное истинное
- Гринвичское звездное среднее
- Динамическое барицентрическое
- Динамическое земное время
- Среднее солнечное время
- Декретное время
- Звездное время
- Поясное время

До того как придумали поясное время в каждом городе жили по своему солнечному времени. Но в середине XIX века появились железные дороги, и путешественник, который утром садился на поезд и ехал на восток, замечал, что

показания его часов, настроенных по его родному солнечному времени, начинают не совпадать с часами, стоящими на разных станциях. Было предложено разбить Землю на 24 пояса по долготе и внутри каждого считать время одинаково.

С появлением электронных часов было точно доказано, что Земля вращается неравномерно ($\Delta t \sim 10^{-3}$ сек в сутки).

Всемирное координированное время

Всемирное координированное время UTC (Coordinated Universal Time) отличается на целое число секунд от атомного времени и на дробное число секунд от всемирного времени UT1.

UT0 – время на мгновенном гринвичском меридиане, получаемое из астрономических наблюдений суточного движения звёзд.

UT1 – время на среднем гринвичском меридиане, учитывающее движение земных полюсов: $UT1 = UT0 + \Delta\lambda$, где $\Delta\lambda$ – поправка, зависящая от координат мгновенного полюса, отсчитываемых относительно среднего положения полюса.

Земля в среднем тормозит своё вращение, сутки удлиняются, поэтому UT1 отстает от UTC. Для удобства использования UTC в быту требуется их согласование. При нарастании расхождения между UTC и UT1 до 0,9 с производится корректировка скачком на 1 с. Это, так называемая «лишняя» секунда (англ. leap second). "Лишнюю" секунду в счете атомного времени разрешается пропускать (не нумеровать), если это необходимо, в начале календарных суток 1 января или 1 июля на меридиане Гринвича, т.е. по всей Земле одновременно. Считается, что в такие дни после времени 23:59:59 идёт 23:59:60. Если принято решение сделать это, например, 1 января, то от сигнала точного времени в 0 часов 31 декабря до сигнала в 0 часов 1 января проходит не 86 400 секунд, как обычно, а 86 401 секунда.

Корректировка требуется не каждый год. Если Земля вращается стабильно, лишнюю секунду не вводят. За последнюю четверть века по одной лишней секунде вводили в 1993, 1994, 1995, 1997, 1998, 2005, 2008, 2012, 2015, 2016. В 2017 и 2018 корректировки не было.

Календарь

Нам нужен календарь, в котором в году будет целое число месяцев и целое число суток.

Тропический год – интервал времени между двумя последовательными прохождением Солнца через точку весеннего равноденствия: $T(2000.0) = 365,2421897$ ср. солн. сут.

Синодический месяц – период смены лунных фаз: $T(2000.0) = 29,5305898$ ср. солн. сут.

Юлианский календарь.

Первый календарь придумал Юлий Цезарь в 45 г. до н.э., где год длится 365,25 суток, каждый четвертый год (високосный) длится на сутки дольше. Ошибка юлианского календаря составляет 1 сутки за 128 лет.

Григорианский календарь (1582 г.).

Продолжительность года в григорианском календаре составляет 365,2425 суток, каждый четвертый год по-прежнему считается високосным и длится на сутки дольше, за исключением годов целых столетий (1900, 2000 и т.д.). Ошибка григорианского календаря составляет 1 сутки за 3300 лет.

ЛЕКЦИЯ 4. ВИДИМОЕ И ИСТИННОЕ ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ

Фаза

Фаза – это определенная стадия в периодическом изменении видимой формы освещенного полушария планеты. Величина фазы вычисляется как отношение ширины наиболее освещенной части диска к диаметру диска, либо отношение площади освещенной части к полной площади. Нулевая фаза соответствует новолунию, а фаза, равная единице, соответствует полнолунию. Часто ошибочно считают, что лунное затмение происходит из-за того, что тень Земли падает на Луну.

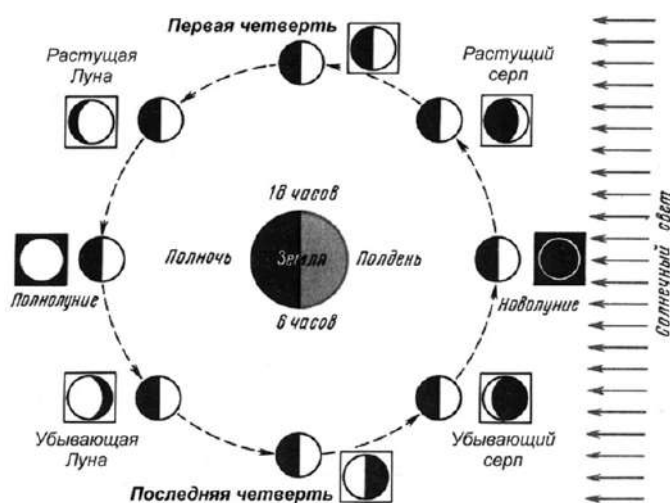


Рис. 4.1. Фазы Луны.

Иногда можно наблюдать явление, когда у молодой или очень старой Луны видна не только дневная, но и ночная сторона. Мы видим, так называемый, пепельный свет Луны. Свет на неосвещенной Солнцем стороне Луны – это свет, отраженный от Земли. Данный эффект можно использовать с целью изучения атмосферы Земли: измерить среднюю облачность по дневному полушарию Земли, средний химический состав атмосферы Земли.



Рис. 4.2. Пепельный свет Луны.

Кажется, что, если солнечный свет симметрично освещает дневную сторону Луны, значит, линия симметрии серпа всегда должна быть направлена на Солнце, но, проводя прямые линии, как на рис. 4.3 (сверху), мы видим, что это не так. Нужно помнить, что параллельная горизонту линия на небесной сфере вовсе не является прямой.

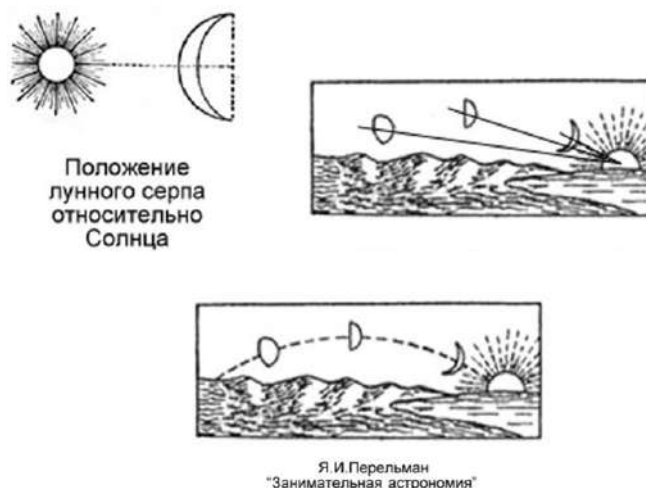


Рис. 4.3. Положение лунного серпа относительно Солнца.



Рис. 4.4. Элементы фазы Луны.

Фазовый угол – это угол между направлением падающего света и света, отраженного к наблюдателю. Оказывается, что зависимость потока отраженного Луной света от фазового угла очень неровная: в районе полнолуния свет, отраженный от луны, вдруг становится очень ярким. Это связано с тем, что Луна испещрена мелкими кратерами, и, когда свет от Солнца падает под любым углом кроме вертикального, он плохо освещает мелкие кратеры. Таким образом, только вертикально падающий свет может добраться до всех углублений на поверхности Луны.

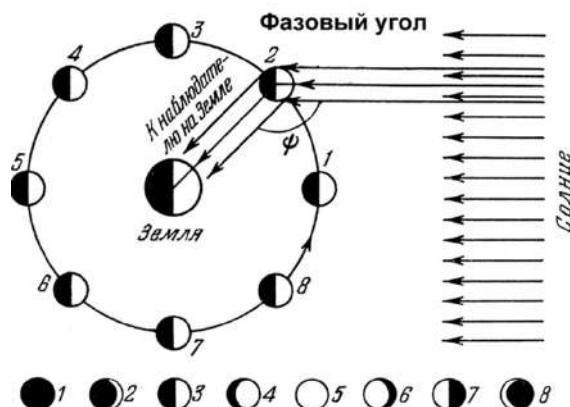


Рис. 4.5. Фазовый угол.

Рассмотрим вращение Луны вокруг Земли (рис. 4.6). Пока Луна делает один оборот вокруг Земли, Земля проходит примерно $1/12$ часть своего орбитального оборота вокруг Солнца. Вследствие перемещения Земли направление на Солнце успевает измениться, и Луне нужно некоторое время на то, чтобы вновь добраться до новолуния. Таким образом, период смены фаз от новолуния до новолуния (синодический) длиннее, чем орбитальный период Луны (сидерический).

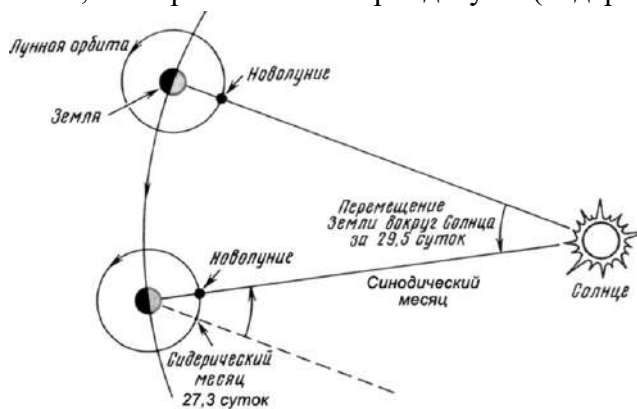


Рис. 4.6. Синодический и сидерический периоды вращения Луны.

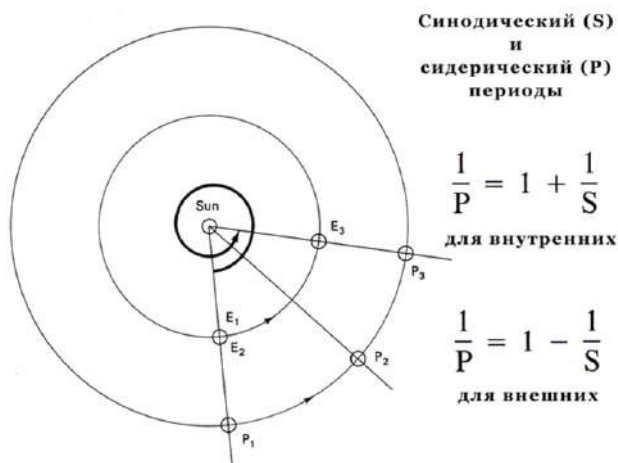


Рис. 4.7. Синодический и сидерический периоды вращения планет.

Взаимные конфигурации планет

Для внутренних планет, орбиты которых лежат внутри орбиты Земли, выделяют 4 характерных точки на орбите по отношению к земному наблюдателю: верхнее соединение с Солнцем, нижнее соединение с Солнцем, наибольшая западная и наибольшая восточная элонгации – крайние точки, дальше которых по углу планета уже никогда не будет наблюдаться с Земли. Для внешних планет выделяют точки: соединение, противостояние, западную и восточную квадратуры (рис. 4.8).



Рис. 4.8. Взаимные конфигурации планет.

Для внешних планет фазовый угол может быть любым, а вот для внутренних планет он ограничен соотношением радиусов орбит Земли и планет.

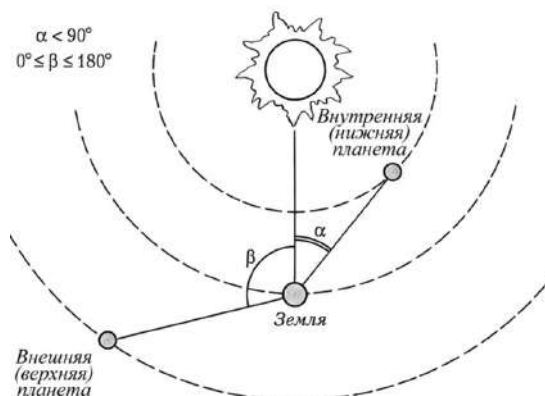


Рис. 4.9. Фазовый угол внутренней и внешней планет.

Видимое движение планет

На рис. 4.10. представлена траектория видимого движения Марса, можно выделить несколько характерных моментов: прямое движение, точки стояния и обратное движение. Обратим внимание, что у каждой планеты свой размах этого самого попятного движения.

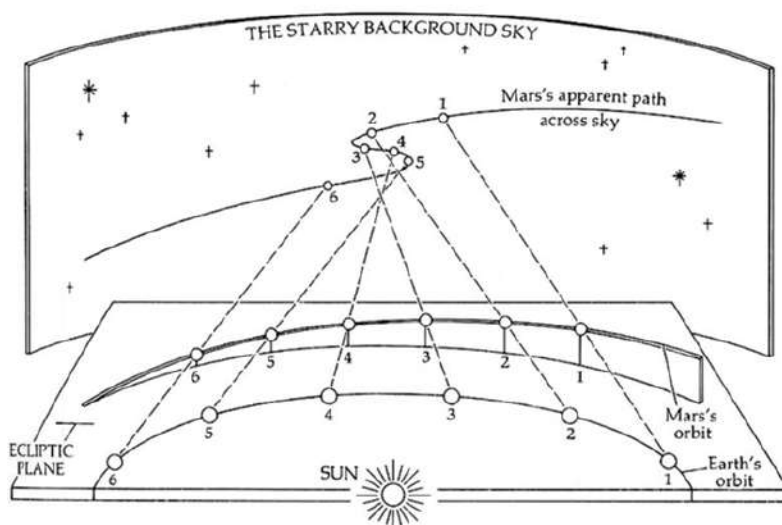


Рис. 4.10. Видимое движение Марса.

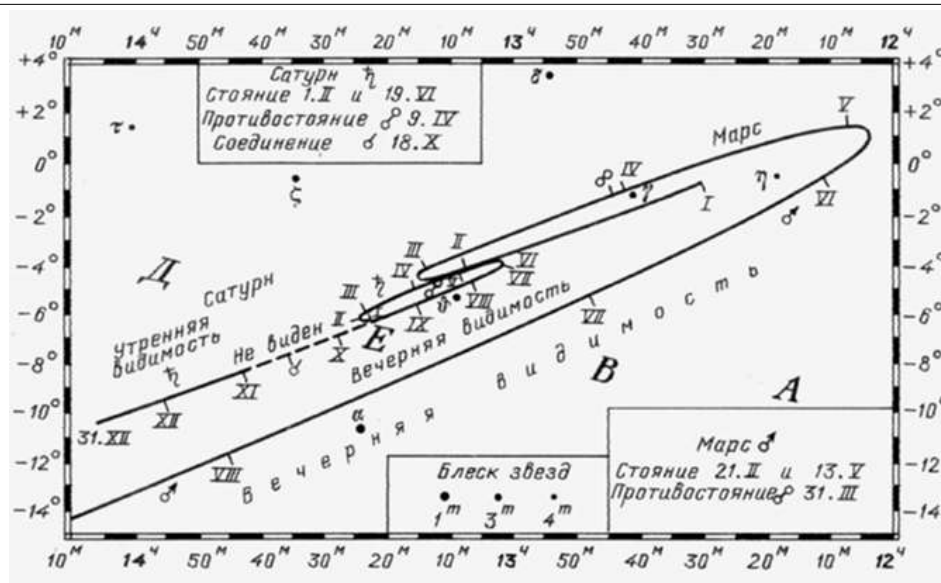


Рис. 4.11. Видимые движения Марса и Сатурна в 1982 году.

Астрономы Вавилон и Древней Греции (особенно греческий астроном Гиппарх) разработали удачную математическую схему для описания видимого движения планет (рис. 4.12). Неравномерное и попятное видимое движение планеты сводилось к её равномерному движению по малой окружности (эпициклу), центр которой равномерно движется по большей окружности (деференту), в центре которой находится Земля. Окончательный вид эта математическая система приняла в виде геоцентрической системы мира в серии книг Альмагест Клавдия Птолемея (II в. н.э.).

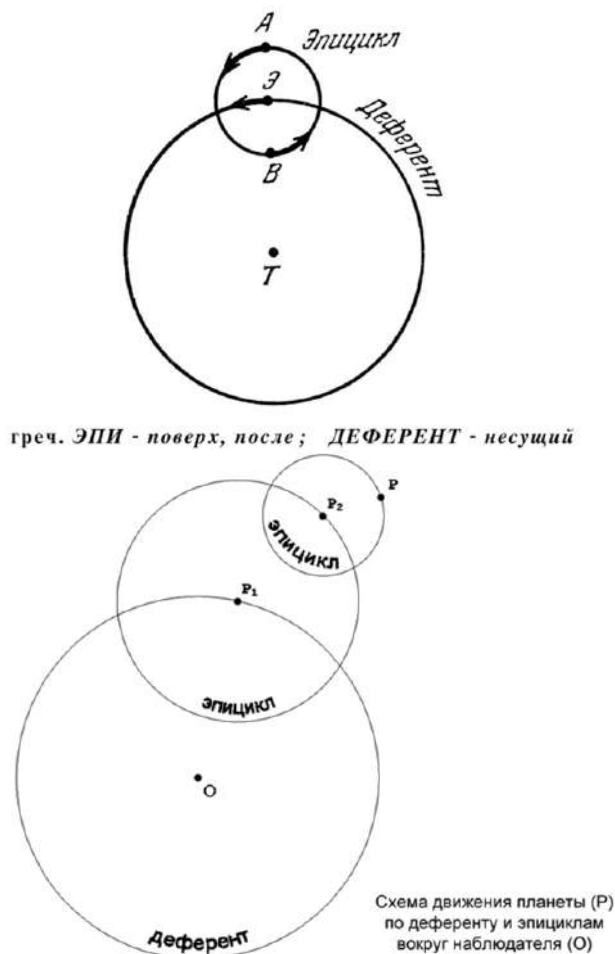


Рис. 4.12. Иллюстрация деферента и эпицикла.

На самом деле, у Птолемея Земля не находится в центре деферента, он это понимал. Есть три неподвижные точки: центр деферента, Земля и эквант. Деферент вращается равномерно вокруг своего центра, значит, неравномерно вокруг Земли. Наблюдатель помещен вне земли – в точку экванта. При этом возникают апоцентр и перицентр «средней планеты», то есть центра эпицикла, и ее неравномерность при наблюдении с Земли. Вот как на самом деле выглядела геоцентрическая система у древних греков.

Николай Коперник модернизировал геоцентрическую систему древних греков. Он утверждал, что не Земля, а Солнце находится в центре мира. Ученый заметил, что у многих планет эпицикл имеет один и тот же период, это неспроста, потому что этот период отражает движение Земли вокруг Солнца. Коперник упростил систему Птолемея. Это тоже система эпициклов, их уже меньшее количество, но они все-таки нужны, потому что орбиты у планет, на самом деле, не круговые.

Тихо Браге

Следующим за Коперником выдающимся ученым в области астрономии был Тихо Браге (1546-1601), он в частности наблюдал вспышку сверхновой в Кассиопее. В 1576 г. указом датско-норвежеского короля Фредерика II Тихо Браге был пожалован в пожизненное пользование остров Вен в проливе Эресунн в 20 км от Копенгагена, а также выделены значительные суммы на постройку обсерватории и ее содержание. Это было первое в Европе здание, специально построенное для астрономических наблюдений. Тогда не было телескопов, и Тихо Браге использовал угломерные инструменты, которые имели высокую точность примерно 1 угловая минута. Тихо Браге 20 лет измерял движение планет, но в 1597 г., лишившись королевской поддержки, покинул Данию.

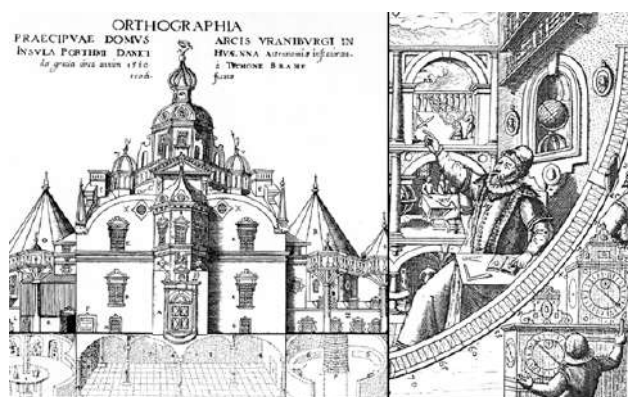


Рис. 4.13. Обсерватория Тихо Браге на острове Вен.

Тем не менее, он продолжал работать и пытался придумать новую систему, которая бы описывала движение планет. С одной стороны, он понимал, что геоцентризм Птолемея никуда не годится, с другой стороны, он, конечно, знал про работу Коперника, но она не соответствовала Библии. Тихо Браге предположил, что Земля находится в центре мира, она неподвижна. Для этого у него были наблюдательные основания, поскольку если Земля движется по орбите, а мы окружены сферой неподвижных звезд, то мы должны наблюдать годичный параллакс звезд, а на уровне одной угловой минуты его нет. Тихо Браге честно не видел годичного параллакса, значит, либо звезды находятся очень далеко (но почему они тогда светятся), либо не очень далеко, значит, они твердо закреплены на сфере неподвижных звезд, а земля твердо стоит в центре этой сферы. Однако нужно было соответствовать Копернику, поэтому Тихо Браге запустил Солнце вокруг Земли, а все остальные планеты – вокруг Солнца. Он пытался совместить две несовместимых идеи, уже тогда астрономы относились скептически к его системе мира.

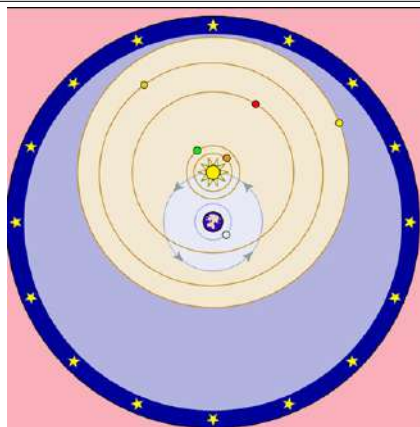


Рис. 4.14. Модель мира Тихо Браге.

Законы Кеплера

Тихо Браге понял, что его математических познаний недостаточно и пригласил молодого немецкого математика Кеплера – поработать над массивом собранных им наблюдений. Кеплер перебрал всевозможные геометрические фигуры для описания орбит планет и в конце концов пришел к эллипсам.

Сегодня мы уже говорим о том, что любая орбита небесного тела, движущегося под действием гравитации центрального тела, описывается коническими сечениями (это нам завещал еще Ньютон): эллипс, парабола, гипербола (рис. 4.15).

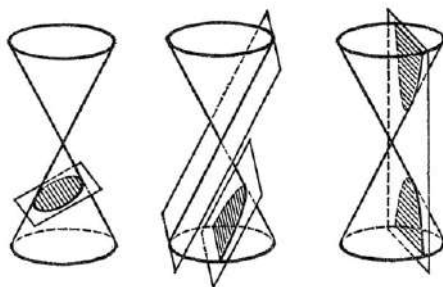


Рис. 4.15. Конические сечения.

Геометрическое свойство эллипса: сумма расстояний от любой точки эллипса до двух его фокусов постоянна.

Оптическое свойство эллипса: если провести плоскость, касательную к эллипсу и сделать ее зеркальной, то луч, выпущенный из одного фокуса отразится от нее и попадет в другой фокус.

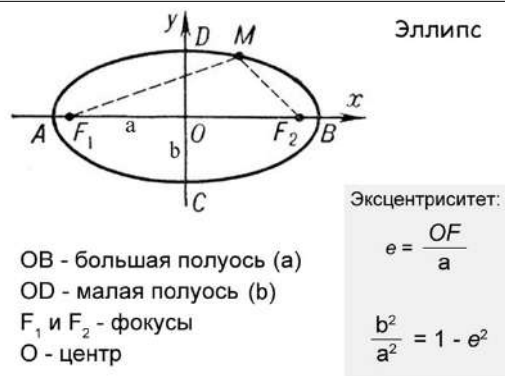


Рис. 4.16. Эллипс.

Законы Кеплера:

1. Планета движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.
2. Прямая между планетой и Солнцем (радиус-вектор) «заметает» площади, пропорциональные времени
3. Квадраты времен обращения планет по орбитам пропорциональны кубам их средних расстояний от Солнца

Применение 3-го закона Кеплера:

1. Измеряя размер орбиты в астрономических единицах и орбитальный период в годах, получим формулу $T = \sqrt{R^3}$, например, для Нептуна $T = \sqrt{30^3} = 164$ года.
2. Время полета от Земли к Марсу: $T = 0,5[(1 + 1,52)/2]^{3/2} = 8,5$ мес.

Законы механики и гравитации Ньютона

Эмпирические законы Кеплера помогли Ньютону сформулировать строгие законы механики и гравитации, которые он описал в своей книге «Математические начала натуральной философии» уже не языке сил и ускорений. На самом деле, Ньютон не знал какова гравитационная сила, он нашел только законы ее изменения $F = \frac{GMm}{R^2}$, константу в своей великой формуле он не знал. Все расчеты небесных механиков эпохи Ньютона и дальнейших эпох, пока не была измерена константа G , содержали комбинацию GM , отдельно измерить G и M было почти невозможно, пока не придумали лабораторный прибор под названием крутильные весы.

Математическим путем Ньютон получил тот же результат, что и Кеплер: движение под действием гравитации происходит по одному из конических сечений.

Ньютон понимал, что ни одно из тел не может быть идеальным центром движения, что центр – это центр масс. В наблюдениях мы не видим центра масс, мы видим, как одно тело движется относительно другого. Надо перейти из инерциальной

системы отсчета (в системе центр масс) в неинерциальной системе отсчета, связанной с одним из движущихся тел (рис. 4.17). Запишем уравнения Ньютона для каждого тела:

$$m_1 \frac{d\mathbf{V}_1}{dt} = \frac{Gm_1 m_2 \mathbf{r}}{r^2 r'}$$

$$m_2 \frac{d\mathbf{V}_2}{dt} = -\frac{Gm_1 m_2 \mathbf{r}}{r^2 r'}$$

перейдем в систему отсчета, связанную с одним из тел и получим:

$$\frac{d(\mathbf{V}_2 - \mathbf{V}_1)}{dt} = -\frac{G(m_1 + m_2) \mathbf{r}}{r^2 r'}$$

$$\frac{d(\mathbf{V})}{dt} = -\frac{GM \mathbf{r}}{r^2 r'}$$

Таким образом, движение тела m_2 относительно m_1 в неинерциальной системе отсчета происходит так же, как в инерциальной при условии, что поле создает неподвижное тело с массой $m_1 + m_2$.

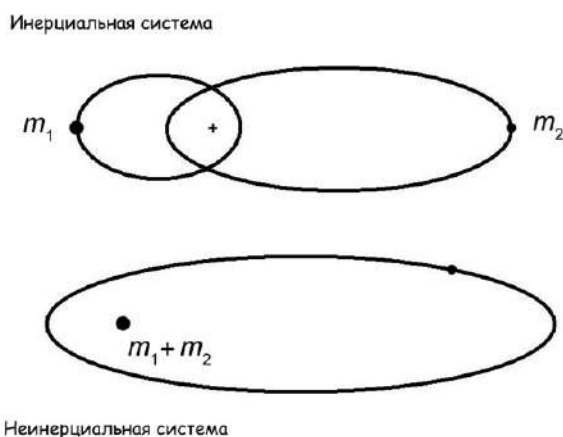


Рис. 4.17. Переход в неинерциальную систему отсчета.

Тогда третий закон Кеплера приобретает дополнительный коэффициент в виде отношения масс $\frac{M+m_A}{M+m_B}$ (рис. 4.18).

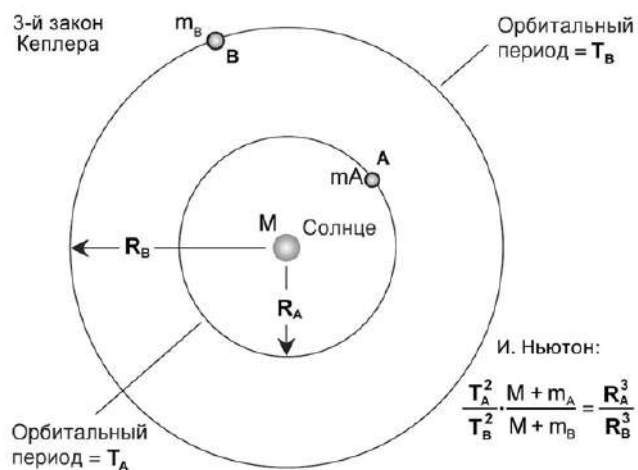


Рис. 4.18. Третий закон Кеплера.

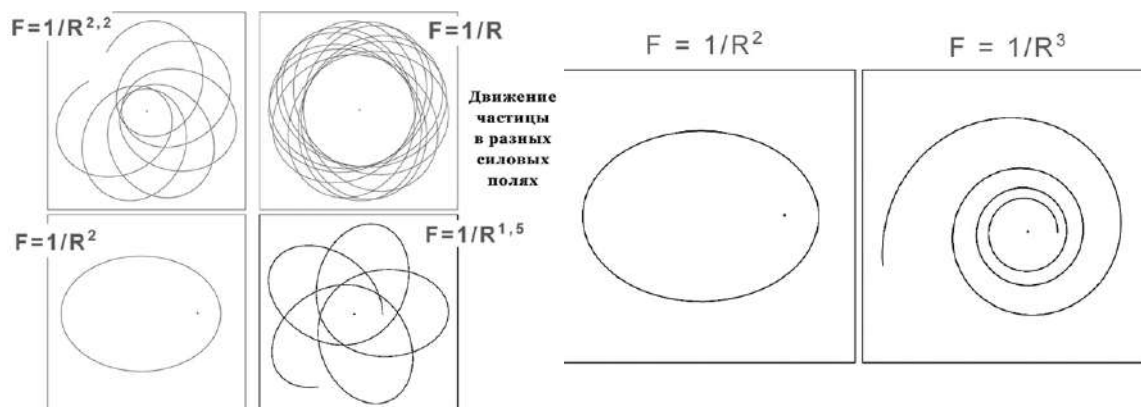


Рис. 4.19. Движение частицы в разных силовых полях.

ЛЕКЦИЯ 5. НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

Движение тела под действием внешних сил делят на несколько аспектов:

- Небесная механика: $F = \frac{GMm}{R^2}$ (Формулу используют в тех случаях, когда расстояние до объектов настолько больше, чем их собственный размер, что можно пренебречь разницей расстояний и считать, что вся масса объекта сосредоточена в центре.)
- Теория приливов: $\frac{da}{dR} = -2 \frac{GM}{R^3}$ (второе приближение учитывает размер объекта)
- Излучение:
 - давление солнечного света (эффект оказывает существенное воздействие на объекты – пылинки микронного размера)
 - плазма, солнечный ветер
- Удары

Внутренние силы:

- Выделение тепла
- Конвекция
- Магнитное поле

Задача двух тел

Считается, что самая простая задача в области небесной механики – это задача двух тел. На самом деле есть, так называемая, задача одного тела, движущегося под действием другого тела, которое остается неподвижным, т.е. движется в центральном поле (задача Кеплера). Такая задача возможна в случае, когда соотношение масс тел безумно большое, тело с маленькой массой называют пробным, и рассматривают его как безмассовое.

При решении задачи одного тела мы получаем следующие типы орбит:

- замкнутые орбиты, в общем случае, эллиптические, поскольку окружность – это частный случай эллипса;
- незамкнутые орбиты, в общем случае, гиперболические, поскольку парабола – это граница между эллипсом и гиперболой.

Таким образом, в зависимости от начальной скорости, космический аппарат движется по эллипсу или по гиперболе.

Параметры орбиты ИСЗ, т.е. искусственного спутника Земли (рис. 5.1):

R_3 – радиус Земли

A – апогей

Π – перигей

a – большая полуось

h_A – высота в апогее

h_P – высота в перигее

Q – расстояние от центра Земли в апогее

q – расстояние от центра Земли в перигее

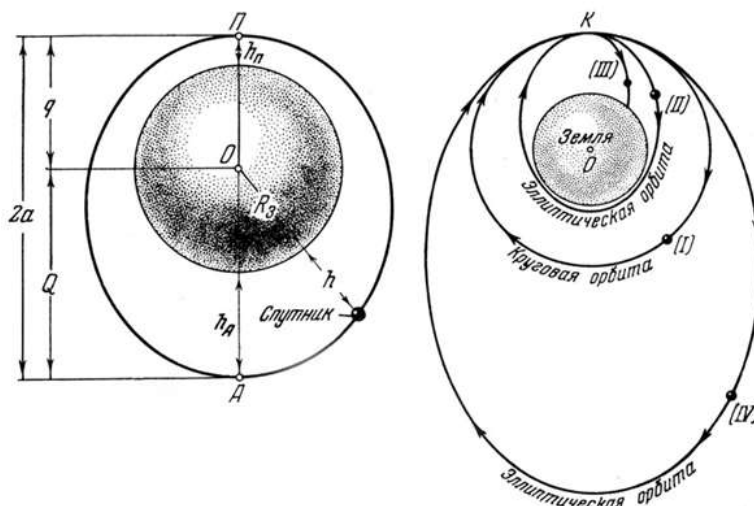


Рис. 5.1. Орбиты ИСЗ и параметры орбит.

Если мы выяснили, что любое тело, брошенное из какой-то точки в окрестности Земли движется по эллипсу, то как нам быть со школьным учебником физики, который утверждает, что тело, брошенное под углом к горизонту, движется по параболе. Согласно небесной механике тело, брошенное под углом к горизонту, движется по отрезку эллипса, а дальше ему просто мешает Земля. Дело в том, что в школе Земля считается плоской, направление силы тяжести не меняется, а остается всегда перпендикулярным поверхности Земли.

Любая орбита описывается неким набором чисел, их должно быть 6: 3 координаты точки в пространстве и 3 координаты вектора скорости. Однако в небесной механике часто упрощают задачу: если центр тяготения неподвижен, то, запустив тело по орбите, мы уверены, что оно будет двигаться в одной плоскости. Тогда сначала определим в какой плоскости движется тело, а потом уже как оно движется в этой плоскости. Сама плоскость будет неподвижна, и ее можно исключить из уравнений с временной переменной.

Плоскость орбиты можно определить наклоном (угол наклона i) к какой-то надежной неподвижной плоскости, например, к плоскости эклиптики. Линию пересечения этих двух плоскостей называют линией узлов. Долгота восходящего узла Ω задает ориентацию по отношению к какому-то избранному направлению, как правило, к точке осеннего равноденствия. Осталось задать параметры эллипса: большая

полуось, эксцентриситет, ориентацию перигелия по отношению к линии узлов ω и, наконец, положение спутника на орбите в конкретный момент времени (рис. 5.2).

Если речь идет о спутниках Земли, то брать за референсную плоскость эклиптику не имеет смысла, удобно использовать плоскость экватора. Мы получаем, так называемую, геоцентрическую экваториальную систему координат.



Рис. 5.2. Описание орбиты планеты.

Давайте посмотрим, как движется тело, если мы закрепили большую массу M , а пробную точку в виде спутника бросаем в одном и том же направлении, но с разными скоростями (рис. 5.3). Если начальная скорость маленькая, то спутник выйдет на эллиптическую орбиту. Увеличивая скорость, мы доберемся до круговой орбиты. Для расчета круговой орбиты, приравняем центростремительную и гравитационную силы:

$$\frac{mV^2}{R} = \frac{GMm}{R^2},$$

откуда получим первую космическую скорость:

$$V = \sqrt{\frac{GM}{R}}.$$

Увеличиваем скорость дальше и снова выходим на эллипс, но теперь точка старта является уже ближайшей к фокусу. Далее добираемся до незамкнутой орбиты, пограничной между эллипсом и гиперболой – это парабола. В предельном случае, бросая спутник с бесконечно большой скоростью, получаем прямую линию, гравитация не влияет на его движение.

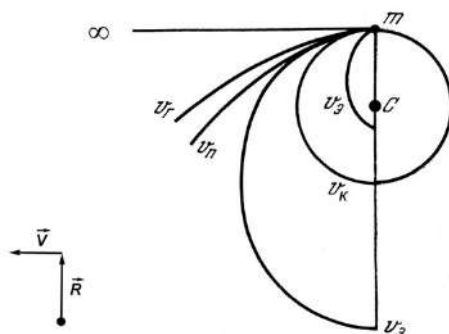


Рис. 5.3. Зависимость формы орбиты от модуля начальной скорости.

Теперь будем запускать спутники с одинаковой по модулю круговой скоростью, но с разным направлением. Заметим, что спутник выйдет на круговую орбиту только в одном случае, если мы запустим его перпендикулярно направлению на Землю.



Рис. 5.4. Зависимость формы орбиты от направления начальной скорости.

Вторая космическая скорость – это скорость, необходимая для того, чтобы улететь на бесконечность. На языке энергии, чтобы улететь на бесконечность, надо преодолеть отрицательную потенциальную гравитационную энергию тела. В физике считается, что тело удаленное на бесконечность и неподвижное там, имеет нулевую потенциальную энергию относительно тяготеющего центра, а чем ближе оно к нему, тем меньше его потенциальная энергия. Таким образом, чтобы вывести тело на бесконечность надо потратить какую-то энергию. Проинтегрировав силу тяжести, имеем:

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{GMm}{R},$$

откуда получим вторую космическую скорость:

$$V = \sqrt{\frac{2GM}{R}}.$$

Космические полеты

Для осуществления межпланетного перелета, нам нужно решить две задачи, во-первых, оторваться от Земли, то есть набрать вторую космическую скорость, во-вторых, покинуть орбиту Земли и добраться до более высокой орбиты, например, Юпитера.

Почему полет на ракете стоит намного дороже, чем поездка на автомобиле? Дело в том, что теперь мы имеем дело с вертикальным движением, ракета должна не только преодолеть собственный вес, но и разогнаться до большой скорости. К тому же ракета вынуждена везти с собой топливо: и горючее, и окислитель (необходимо 10 тонн кислорода в секунду), в случае автомобиля окислитель (воздух) уже есть вокруг.



Рис. 5.5. Космический корабль и ракета-носитель «Союз».

Если нам надо вывести спутник не на низкую околоземную орбиту, а повыше, то самая полезная орбита вокруг Земли – это геостационарная. Период обращения по геостационарной орбите равен периоду вращения Земли вокруг оси, то есть одним звездным суткам (рис. 5.6).



Рис. 5.6. Геостационарная орбита.

Виной всему формула Циолковского, описывающая движение тела переменной массы. Когда вы берете запас топлива с собой, вам надо его поднимать туда, где вы его будете использовать, топливо же будет постепенно тратиться.

Формула Циолковского:

$$V = k \cdot \ln \left(\frac{M_1}{M_2} \right),$$

где M_1 — начальная масса ракеты, M_2 — конечная масса ракеты, k — скорость истечения газа, V — конечная скорость ракеты. Начальная масса, при фиксированной конечной, очень сильно зависит от соотношения V/k :

$$M_1 = M_2 e^{V/k}.$$

Скорость истечения газа обычно составляет не больше $2,8 - 3,0$ км/с.

Возможно сократить начальную массу M_1 , если использовать многоступенчатую ракету. Идея в том, что израсходовав топливо в нижней ступени, мы можем выбросить всю первую ступень вместе с двигателями и включить двигатели второй ступени, не надо тащить за собой пустые баки. Чем больше количество ступеней, тем эффективнее ракета, 2÷4 ступени технически вполне осуществимы.

Рассмотрим легкий спутник на далекой от Земли орбите очень большого радиуса (рис. 5.7). В этом случае мы можем считать, что все точки спутника находятся на одном и том же расстоянии от всех точек Земли, и использовать формулу:

$$\frac{V^2}{R} = \frac{GM}{R^2}.$$

Откуда можем получить период обращения и массу планеты M .

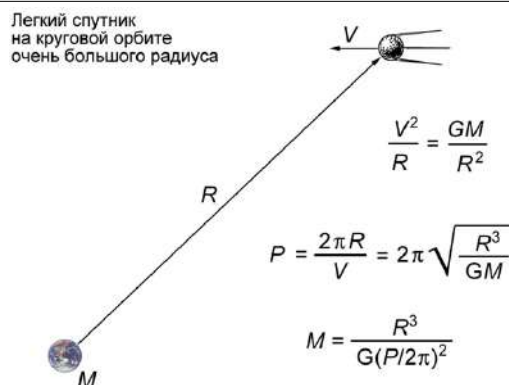


Рис. 5.7. Легкий спутник на круговой орбите очень большого радиуса.

В случае когда спутник находится на низкой орбите, мы также можем для всех точек спутника использовать одно и то же расстояние до Земли, эту теорему доказал еще Ньютон (рис. 5.8).

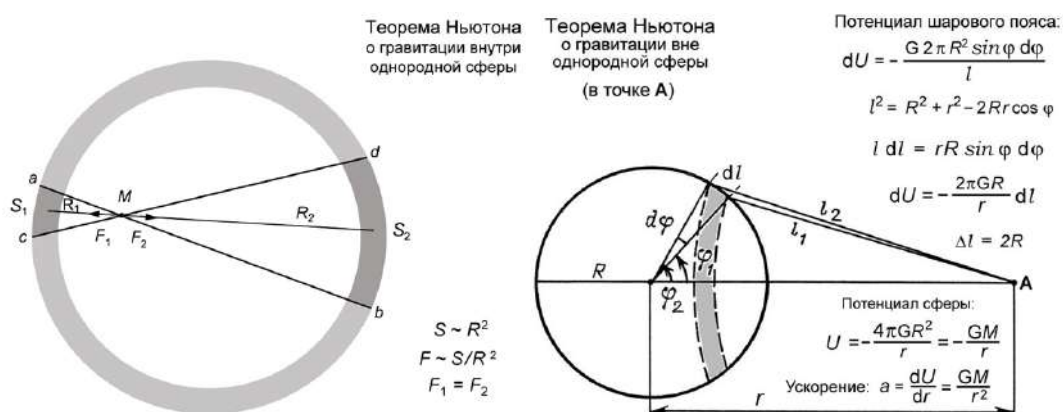


Рис. 5.8. Теорема Ньютона о гравитации внутри и вне однородной сферы.

Задача.

Выберем место старта в одном из полюсов планеты и поставим вопрос – как быстрее достичь антиподной точки, запустив спутник на низкую околопланетную орбиту с первой космической скоростью или прорыв туннель и бросив туда падать какой-то снаряд (рис. 5.9)? Снаряд будет стартовать с нулевой скоростью, но зато двигаться будет по кратчайшему пути. Снаряд разгонится до центра, пройдя его, начнет тормозить и в антиподную точку прибудет с нулевой скоростью. Оказывается, что решение этой задачи зависит от распределения плотности внутри планеты. Попробуйте решить ее для однородной планеты и для предельно неоднородной, когда, например, вся масса планеты сосредоточена в ее центре.

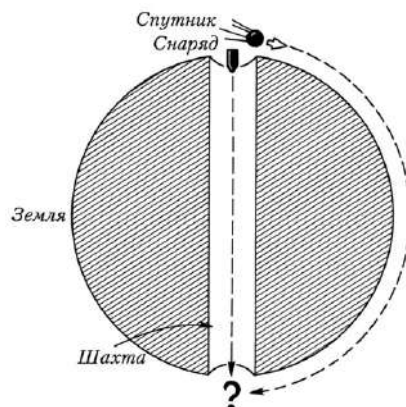


Рис. 5.9. Иллюстрация к задаче.

Орбиты спутника

Типы орбит спутника:

- экваториальная
- полярная
- наклонная

Экваториальная орбита может быть практически круговой, потому что Земля симметрична относительно экватора. Полярная орбита не может быть круговой, потому что Земля сильно сплюснута вдоль оси вращения, возникает сильная прецессия эллипса (рис. 5.10). Если наклон полярной орбиты чуть больше 90 градусов, а высота порядка 600-800 км, то эллиптическая орбита будет прецессировать со скоростью один оборот в год. Именно с такой скоростью Земля движется по орбите вокруг Солнца, значит терминатор (граница дня и ночи) на поверхности Земли тоже поворачиваются с периодом в один год. Этому есть практическое применение. Летая над Землей, спутники плохо различают мелкие детали, когда же лучи Солнца падают на Землю под малым углом, тени на Земле становятся длинными. Тени обрисовывает контуры предмета гораздо лучше чем его собственное изображение. Например, самолет или танк, покрашенный какой-либо защитной краской, все равно будет отбрасывать тень и будет, таким образом, обнаружен.

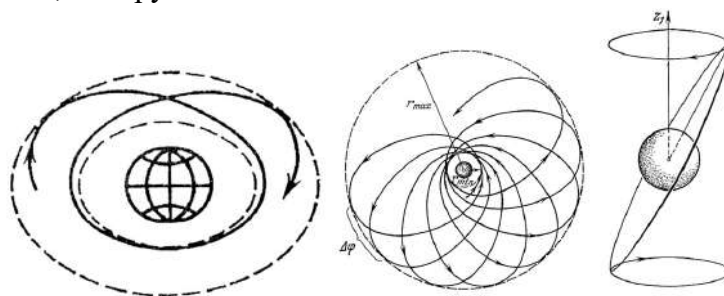


Рис. 5.10. Траектория полярного спутника.

Если мы запускаем спутник, который работает исключительно на пользу нашей страны, например, телевизионное вещание, нам естественно необходимо, чтобы он

большую часть времени задерживался над территорией России. При наклоне орбиты к экватору около 63° отсутствует поворот линии апсид, поэтому спутник на высокоэллиптической орбите всегда “висит” над одним полушарием Земли (в нашем случае – над северным). Орбитальная плоскость поворачивается вокруг полярной оси (рис. 5.11).

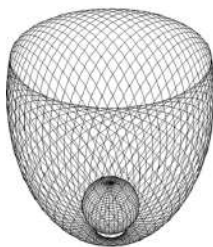


Рис. 5.11. Орбита ИСЗ «Молния» (спутник связи).

Земля сжата примерно на 0,3 процента (отношение полярного диаметра к экваториальному), это создает неоднородность гравитационного поля. Поэтому орбита спутника существенно изменяется примерно через 300 оборотов (рис. 5.12).

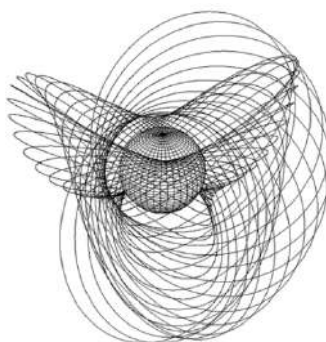


Рис. 5.12. Орбита типичного ИСЗ.

На геостационарной орбите спутник всегда висит над одной и той же точкой поверхности Земли. Почему бы нам не соединить их какой-либо жесткой связью? По сооруженному «канату» можно подниматься с помощью электрического двигателя, а электричество можно получать, например, из солнечного света, и, таким образом, задарма попадать на геостационарную орбиту.

Если мы оставим спутник на геостационарной орбите, то ничего хорошего из этого не получим, поскольку движение по ней неустойчиво. Если мы чуть притянем спутник вниз, то он перейдет на более низкую орбиту, период обращения сократится, спутник начнет наматывать канат на Землю и рухнет. Если же мы его запустим чуть выше геостационарной орбиты, то Земля будет крутиться быстрее спутника и будет тянуть его за собой, увеличивая силу натяжения каната, такая орбита будет устойчивой (рис. 5.13). Сейчас одна японская фирма уже обещает нам к 50-му году сделать реальный космический лифт, со скоростью 200 км/ч по нему можно будет за неделю подняться на геостационарную орбиту. Наиболее подходящим по прочности материалом для такого лифта являются углеродные нанотрубки.

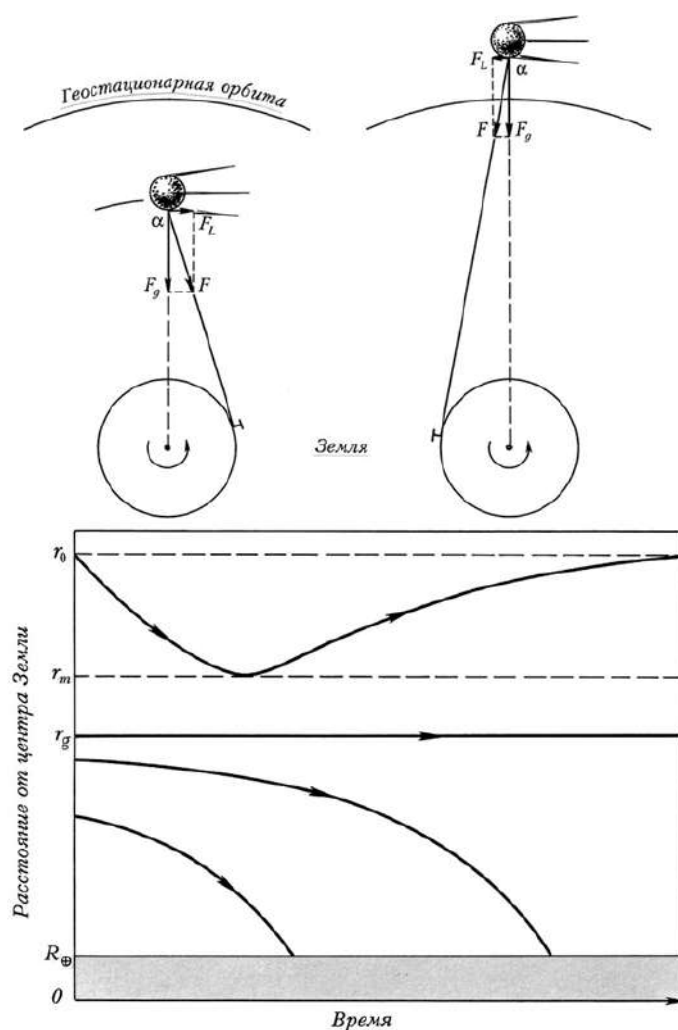


Рис. 5.13. Иллюстрация к задаче о «связанном» спутнике.

Мы уже обсуждали космические полеты с одной орбиты на другую. Однако Штернфельд открыл новый тип межпланетных орбит, который оказывается более длительным в смысле времени перелета, но более экономным в смысле затрат топлива (рис. 5.14).

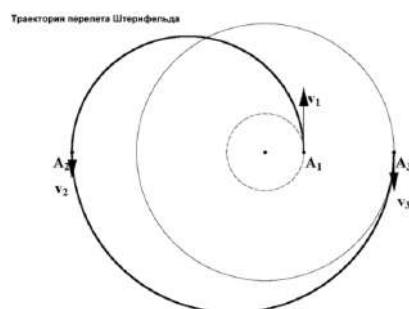


Рис. 5.14. Траектория перелета Штернфельда.

Двойные звездные системы

Помимо планет и спутников парами могут летать и звезды, например, двойная звезда Kruger 60 (рис. 5.15) или α в созвездии Центавра, ближайшая к нам. Обычно когда мы наблюдаем двойную звездную систему, мы видим ее в проекции на небесную сферу (рис. 5.16).

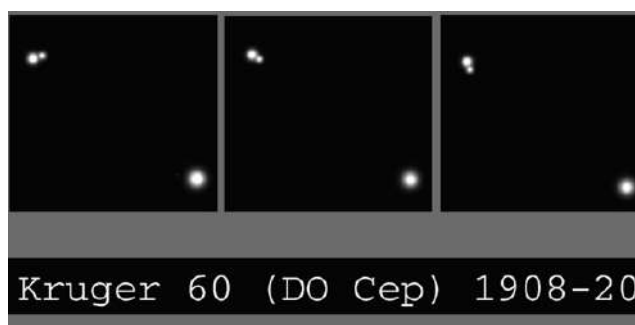


Рис. 5.15. Двойная звезда Kruger 60.

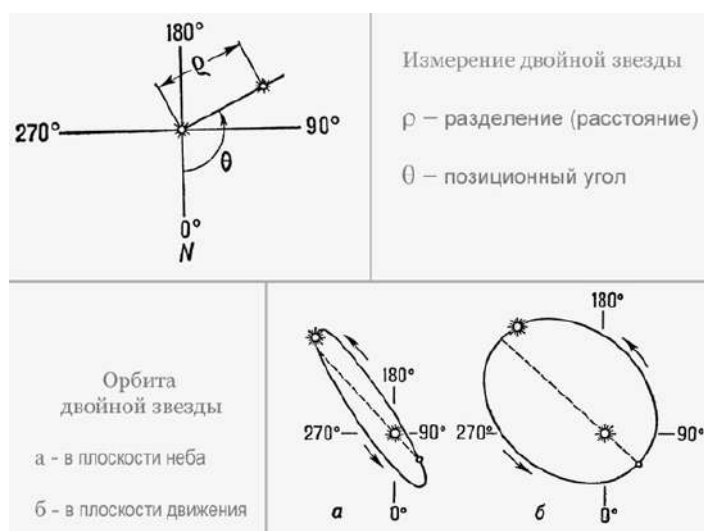


Рис. 5.16. Движение двойной звездной системы.

Движение тел, близких по массе, уже позволяет нам, наблюдая одно тело, предсказать существование другого. Наблюдая за движением Сириуса А Большого пса Бессель еще в начале XIX века понял, что существует второй невидимый компонент. Сириус В был обнаружен спустя 30 лет на оптических снимках, на рентгеновских он виден лучше (рис. 5.17).

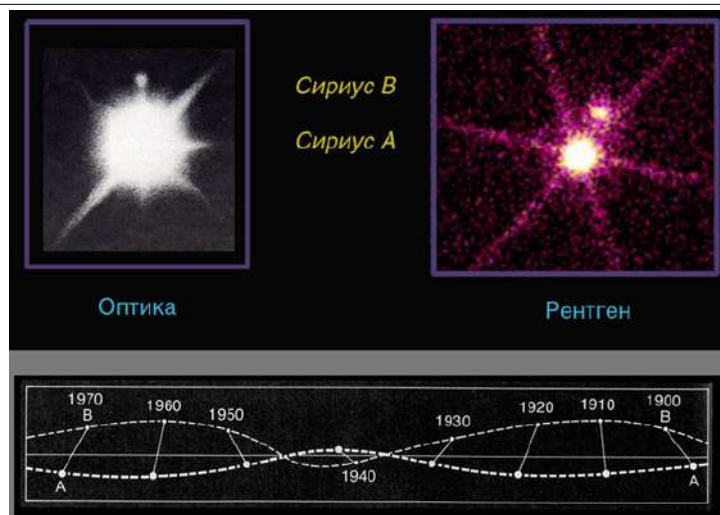


Рис. 5.17. Двойная система звезд Сириус А и Сириус В.

Изучение двойных звезд крайне полезная вещь, потому что это единственный способ измерения звездных масс.

Мы говорили о задаче двух тел, существует также задача трех тел. Аналитически она не решается, но есть масса очень красивых частных решений, в частности, пусть у нас есть два массивных тела, а третье – бесконечно легкое. Например, третье тело – это спутник, летающий в окрестности Земли и Луны. Если два массивных тела находятся на круговой орбите, то мы получаем, так называемую, круговую ограниченную задачу трех тел.

Часто траекторию Луны относительно Солнца изображают неправильно (рис. 5.18). Кривизна лунной траектории всегда направлена в сторону Солнца, это значит, что где бы на орбите не находилось Солнце, оно притягивает Луну сильнее, чем Земля. Почему тогда Луна не улетает от Земли? Солнце притягивает Луну сильнее, чем Земля, в два с лишним раза. Однако, чтобы оторвать Луну от Земли надо, чтобы разница притяжения Земли и Луны к Солнцу превосходила силу притяжения Луны к Земле.

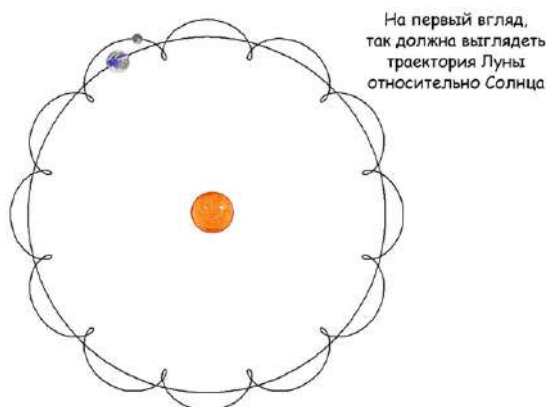


Рис. 5.18. Ошибочная траектория Луны относительно Солнца.

Большинство звезд живут парами, как образуются двойные звезды? Есть несколько способов, например, тройное столкновение, однако оно случается крайне редко. А вот двойные столкновения, совпадение траекторий двух звезд, происходят гораздо чаще, при этом тоже возможно объединение в двойную систему.

Световые эффекты

Гравитация тянет небесное тело к центру Солнца, солнечный свет – в обратном направлении. Но поскольку планета движется по орбите, направление импульса падающих фотонов немного меняется, и появляется составляющая, которая всегда тормозит движение небесного тела. Расчеты показывают, что мелкие пылинки микронного размера очень быстро за несколько тысяч лет тормозятся и падают на Солнце. Более крупная планета этого эффекта, конечно, не замечает.

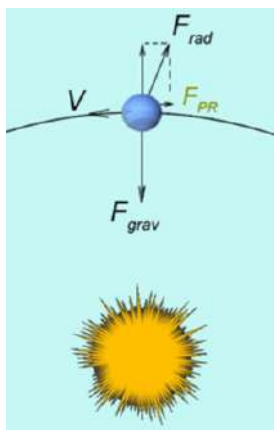


Рис. 5.19. Эффект Пойнтинга-Робертсона.

Оказалось, что есть гораздо более сильный световой эффект. Он был открыт совершенно случайно инженером Яковским. Солнце освещает планету, нагревает ее дневное полушарие, планета вращается вокруг оси, и самым теплым местом на планете является либо вечерние перед заходом солнца, либо вечерние после захода солнца области поверхности; в основном из них инфракрасный свет уходит в космос. Направление силы Яковского зависит от ориентации оси и направления суточного вращения небесного тела.

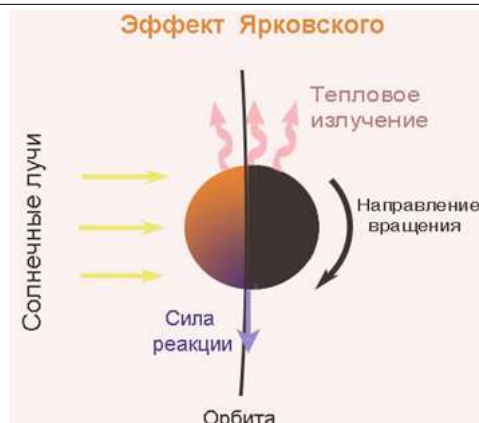


Рис. 5.20. Эффект Ярковского.

ЛЕКЦИЯ 6. РАССТОЯНИЯ И РАЗМЕРЫ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

Методы измерения расстояний:

1. Локация (радио- и оптическая)
 2. Тригонометрический параллакс
 3. Кинематические методы
 4. Фотометрические методы (стандартная свеча, $I \sim R^{-2}$)
 5. Метод аналогии (стандартный отрезок)
- и др.

Астрономическая единица - единица длины, практически равная среднему расстоянию между центрами Земли и Солнца, т. е. большой полуоси земной орбиты. Обозначение: рус. – а. е.; англ. – A. U., AU, a. u., au, ua.

Значение астрономической единицы измерено с ошибкой 3 метра и равно $149\,597\,870\,700 \pm 3$ м. Генеральная ассамблея МАС 2012 г. утвердила точное значение $1 \text{ а. е.} = 149\,597\,870\,700$ м.

Свет проходит это расстояние примерно за 500 сек (8 мин 20 с).

Большая полуось земной орбиты, фигурирующая в небесномеханических расчётах, составляет $149\,598\,261 \text{ км} = 1,00000261 \text{ а. е.}$ на эпоху J2000,0 (поскольку постепенно возрастает, примерно на 15 см/год)

Методы измерения расстояний

Радиолокация

Радиолокатор посылает к объекту сигнал, мощный импульс. Часть посланного сигнала, отразившись от объекта, возвращается через время t . Значит, расстояние равно $S = \frac{ct}{2}$, где c – скорость света.

Радиоволны имеют довольно большую длину волны, а радиоантенны не такие уж большие, поэтому дифракция расхождения пучка довольно сильная. Радиолокация не очень точный метод, но он давно освоен, и им пользовались еще в конце 40-х гг. Для того, чтобы выделить сигнал на фоне помех использовали азбуку Морзе. Метод в пределах солнечной системы работает и сегодня.

Лазерная локация

Радиолокация использует длинноволновое излучение, поэтому точнее, чем длина волны, в принципе невозможно измерить расстояние, нужно получить хотя бы одну волну. Оптика – это коротковолновое излучения, поэтому позволяет измерять расстояния намного точнее. Но оптические лучи очень плохо отражаются от темного лунного грунта, поэтому на Луну привезли отражатели лазерного света – набор маленьких стеклянных призм с прямыми углами; откуда бы не пришел световой луч,

трижды отразившись, он всегда уйдет, повернувшись на 180 градусов. Есть пять мест на Луне, где стоят такие уголкового отражатели: три аполлоновских и два наших (луноход 1 и луноход 2). Конечно, обратно приходит очень мало света. Если к Луне уходит мощность светового импульса в 50 кВт, то обратно приходит всего несколько фотонов. Поэтому надо много раз отправлять сигнал к Луне, чтобы узнать ответные импульсы на фоне помех. Расстояние до Луны определяется по временной задержке обратного импульса по сравнению с исходным. Когда только установили уголкового отражатели, расстояние определялось ошибкой в 15 см, сегодня ошибка сократилась до 1 мм.

Принцип триангуляции

Световая лазерная локация пока позволяет определять расстояние только до Луны, радиолокация – до Сатурна. Локация работает в пределах солнечной системы, а дальше за основу берутся методы триангуляции или параллакса. В результате суточного вращения Земли, наблюдатель перемещается и меняет направление своего взгляда на лунный шар. Это приводит к кажущемуся покачиванию Луны в течение ночи с запада на восток.

Горизонтальный параллакс π (p) – это изменение угла направления на источник между моментами, когда он зените и когда он у горизонта. Стандартным считают горизонтальный экваториальный параллакс, опирающийся на экваториальный радиус Земли. Суточный параллакс – угол, под которым виден радиус Земли, проведенный в точку наблюдателя, а горизонтальный параллакс – максимальное значение суточного параллакса, достигаемое, когда тело наблюдается у горизонта.

Греческий астроном Аристарх Самосский (310 – 230 до н.э.), Коперник античного мира – автор первой гелиоцентрической системы, впервые стал измерять расстояния до небесных тел путем наблюдений (рис. 6.1).

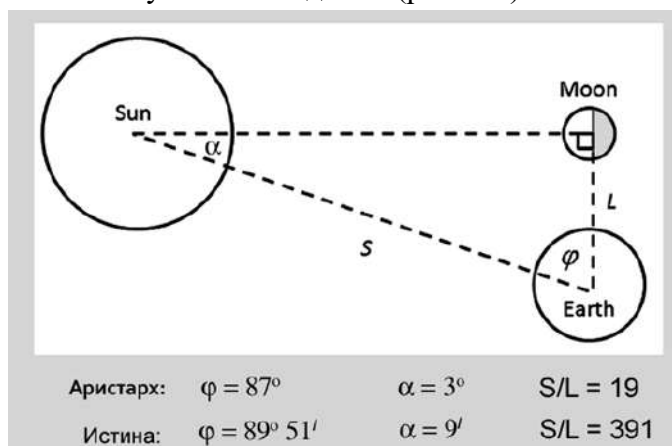


Рис. 6.1. Расчеты Аристарха Самосского.

Горизонтальный параллакс использовался еще до середины XIX века, чтобы

определять масштаб расстояний Солнечной системы. Третий закон Кеплера дает нам возможность по периодам обращения планет определить их относительное расстояние, но надо было хотя бы одно из них измерить точно в метрах. Оказалось, что это можно сделать, например, для Венеры в те моменты, когда она проходит через солнечный диск.

Земля слишком маленькая, чтобы заметить параллакс объектов вне солнечной системы, значит надо за базу брать не размер Земли, а, например, размер земной орбиты. Если мы в течение полугода дважды посмотрим на какую-то звезду близкую к нам, то можем заметить, как направление на нее меняется на фоне далеких звезд, которые можно считать просто бесконечно удаленным фоном. Данный эффект носит название годичного параллакса (рис. 6.2). Чем больше расстояние до объекта, тем меньше его параллактический угол.

Угол, под которым со звезды был бы виден средний радиус земной орбиты при условии, что направление на звезду перпендикулярно к радиусу, называется годичным параллаксом звезды p .

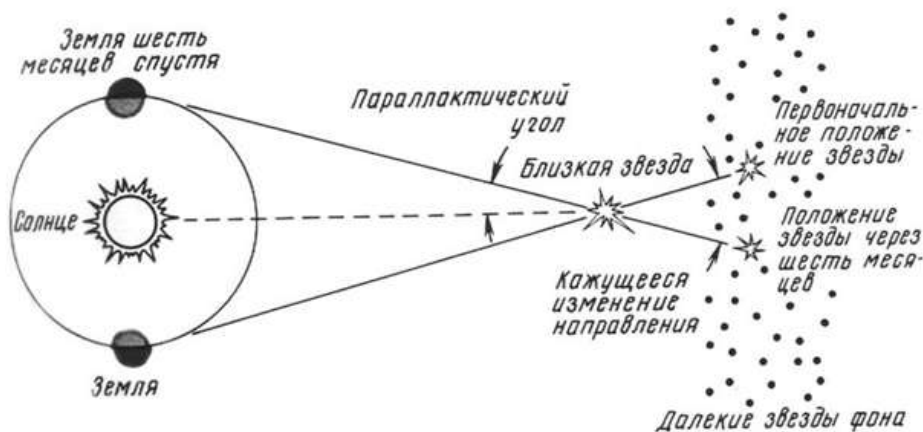


Рис. 6.2. Эффект параллактического смещения звезд.

Еще древние греки пытались измерить параллакс, но с их точностью измерений в один градус, естественно, ничего не увидели. Позже за дело взялся Тихо Браге, который раз в 20 повысил точность угловых измерений. Однако поскольку параллакс звезд, даже ближайших, намного меньше угловой минуты, он ошибочно решил, что звездного параллакса нет, т.е. звезды прибиты к небу, Земля неподвижна, Солнце вращается вокруг Земли, а планеты вокруг Солнца.

В последствии астрономы боролись за повышение точности в попытках измерить параллакс. Вильям Гершель предложил дифференциальный метод: найти на небе две близкие по расположению звезды, если одна из них менее яркая, значит, она находится дальше, и ее параллакс будет почти незаметным, можно проследить движение более яркой звезды относительно менее яркой и, таким образом, обнаружить ее параллакс. Гершель впервые открыл физические двойные звезды, но параллаксов не заметил.

Джеймс Брэдли, пытаясь обнаружить годичный параллакс звезд, открыл нутацию земной оси и явление абберации света, измерив при этом скорость света с ошибкой менее 3%.

Авторы первых успешных измерений годичных параллаксов звезд: Фридрих Георг, Фридрих Вильгельм Бессель и Томас Джеймс Хендерсон. В 1814–1838 гг. впервые были с приемлемой точностью измерены параллаксы Веги (α Лирь), 61 Лебеда и α Кентавра. Их значения оказались равными долям угловой секунды. Успех пришёл благодаря новым телескопам Фраунгофера.

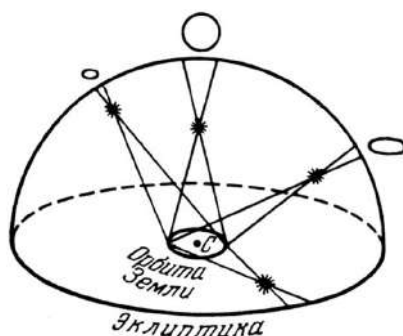


Рис. 6.3. Зависимость параллактического движения от широты.

На основе годичного параллакса в астрономии определена внесистемная единица длины – парсек или параллакс в секунду (рс, пк, пс). Парсек – это расстояние, с которого большая полуось земной орбиты видна под углом в $1''$.

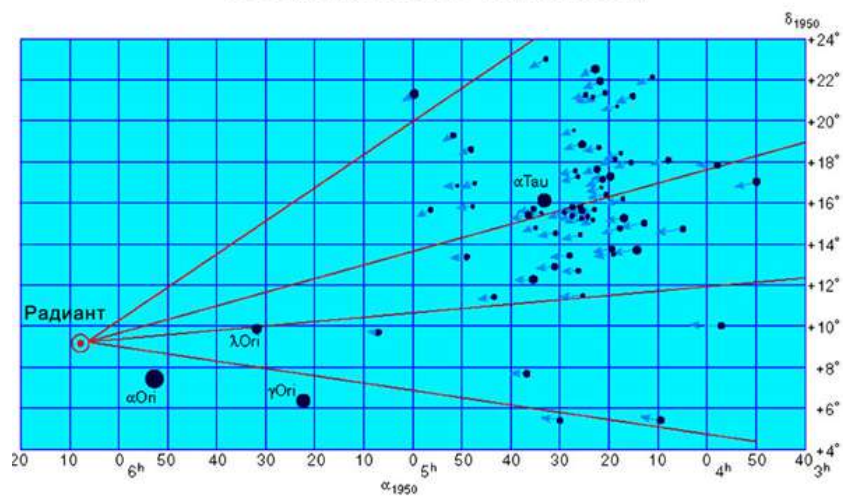
Если R – радиус орбиты Земли, а D – расстояние до объекта, то $\operatorname{tg} p = \frac{R}{D}$. Но для малых углов, выраженных в радианах, с большой точностью $\operatorname{tg} p = p$, поэтому астрономы всегда используют формулу $p = \frac{R}{D}$. Поскольку $R = 1 \text{ a.e.}$, а в одном радиане примерно $206265''$, то для p , выраженного в угловых секундах, получим $D = 206265 \text{ a.e.}/p$. Чтобы не писать длинные числа, астрономы определили новую единицу длины – парсек: $1 \text{ пк} = 3,26 \text{ св.года} = 206265 \text{ a.e.} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ м}$. Тогда $D = 1 \text{ пк}/p$.

В конце 80-х европейские инженеры запустили первый астрометрический спутник HIPPARCOS, который имел точность измерения параллаксов на околоземной орбите $0,001''$. В последствии космическая обсерватория Gaia повысила точность измерений на три порядка.

Метод перспективы

Первый и, наверное, последний раз метод перспективы использовался для измерения расстояния до ближайшего к нам звездного скопления Гиады (рис. 6.4).

Метод группового параллакса



Стрелками показано собственное движение звезд скопления Гиады за 50 тыс. лет.

Параллакс 0,022", расстояние 45 пк.

Рис. 6.4. Метод группового параллакса.

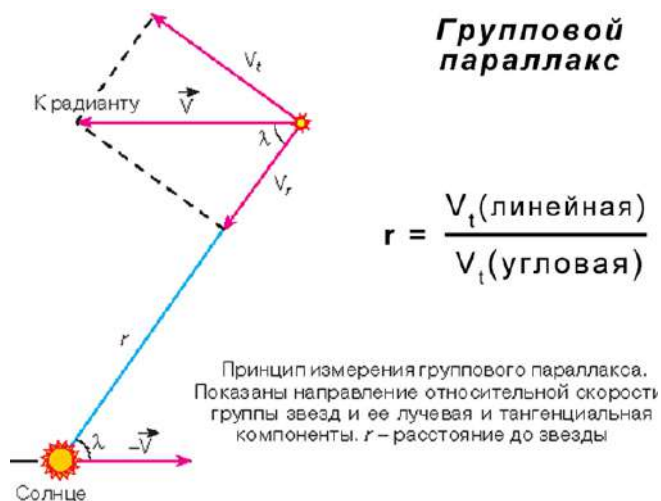


Рис. 6.5. Принцип измерения группового параллакса.

Фотометрические методы

Главное в фотометрическом методе – угадать, какой источник света перед тобой, угадав его мощность по-видимому блеску, можно определить расстояние, основываясь на простом фотометрическом законе: поверхностная яркость от источника света обратно пропорциональна квадрату расстояния.

Впервые это использовали ученые Рассел и Герцшпрунг, взяв за основу параллактически измеренные расстояния до звезд и, определив их светимость, они

нанесли все звезды на диаграмму «светимость-температура». Оказалось, что большинство звезд лежит на диагонали, на, так называемой, главной последовательности.



Рис. 6.6. Диаграмма Герцшпрунга-Рассела.

Сравнивая два звездных скопления, мы можем и в том и в другом выделить участки главной последовательности. Если среди звезд одних и тех же температур одни ярче, а другие слабее, значит, одно скопление к нам ближе, второе — дальше, по разности блеска звезд мы определяем относительное расстояние до звездных скоплений.

Скопления, таким образом, можно ранжировать по расстоянию, как быть я индивидуальными звездами? Если звезда голубая, то проблем практически нет, а если звезда красная, то она может быть и на главной последовательности, и в области гигантов, и в области сверхгигантов. Если мы ошибемся в выборе ее места на диаграмме Герцшпрунга-Рассела, то мы ошибемся в расстоянии невероятно. Существуют методы, позволяющие различать звезды одной и той же температуры по их положению на диаграмме. Можно отделить карликов от гигантов по виду спектра: у гигантов спектральные линии тоненькие, а у карликовых звезд — широкие, размытые.

Рассмотрим еще один любопытный метод определения расстояний. Некоторые звёзды живут не стационарно, например, наше Солнце железно не меняет свою светимость, потому что оно находится на главной последовательности, но когда оно будет заканчивать жизнь, то поедет в область красных гигантов, затем на горизонтальную ветвь и, наконец, попадет в полосу нестабильности. В этом положении у звезд под атмосферой возникает слой частично ионизованного гелия, который работает как клапан, пропуская и задерживая энергию, идущую из недр. Возникают

автомодельные колебания яркости звезды (рис. 6.7), то есть атмосфера звезды начинает светиться то ярче, то слабее, звезда раскачивает сама на себя. Первой звездой, которая продемонстрировала такой характерный пример переменности была δ Цефея, с тех пор все такие пульсирующие звезды называются цефеидами. Физический механизм цефеид впервые описал наш радиофизик Сергей Жевакин.

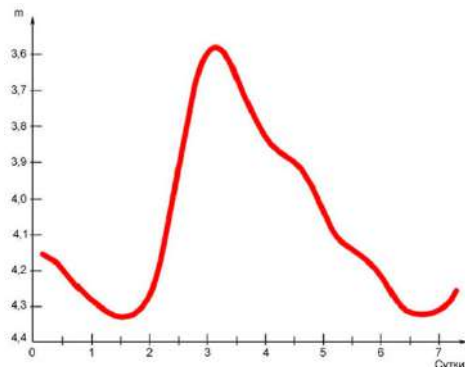


Рис. 6.7. Кривая блеска цефеиды.

Важность колебательного характера изменения блеска звезд впервые осознала американский астроном Генриетта Ливитт. Она заметила, что для цефеид Большого и Малого Магеллановых облаков выполняется следующее правило: чем больше период колебаний, тем ярче средний блеск звезды.

Метод стандартного отрезка

Метод основывается на том, что отрезки равной длины видны под разными углами в зависимости от расстояния.

Метод стандартной свечи

Метод стандартной свечи оказался более работоспособным, цефеиды по сути являются стандартными свечами, но поскольку они не очень яркие и в далеких галактиках не видны, нашли другие объекты – взрывы сверхновых. Они вполне годились бы как стандартные свечи, если бы у всех сверхновых была одинаковая мощность вспышек. Однако, как выяснилось, есть несколько механизмов взрыва массивной звезды: термоядерный, резкий коллапс, слияние двух звезд и т.д. То есть сверхновые являются довольно разнородным классом объектов, и надо как-то угадывать, с чем мы имеем дело. Более того, сложно застать сверхновую на пике ее светимости.

Существует более десяти типов сверхновых, различающихся по кривым блеска. Но оказалось, что есть сверхновые типа Ia, у которых у всех практически одинаковые кривые блеска. Даже не заметив пика светимости, можно, проследив спад кривой блеска, по нему восстановить максимальную светимость.

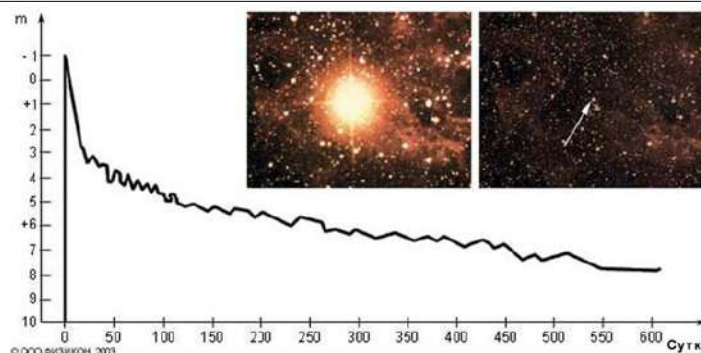


Рис. 6.8. Кривая блеска сверхновой.

Гравитационная линза

Если мы наблюдаем сквозь какое-то массивное тело далекий яркий объект, то его лучи, преломляясь в гравитационном поле, приходят к нам по разным траекториям. На этом эффекте основан метод гравитационного линзирования, который позволяет определять расстояния до далеких объектов.

Гравитационные волны

В последнее время стали применять совершенно новый метод измерения расстояний, основанный на гравитационных волнах. Гравитационные волны впервые зарегистрировали в 2015 году и получили нобелевскую премию Кип Торн и его коллеги.

Методы измерения размеров небесных тел

Метод Эратосфена

Эратосфен узнал у караванщиков, идущих из Сиены, что в день летнего солнцестояния Солнце находится точно в зените. Тогда он дождался дня летнего солнцестояния, взял гномон и измерил, под каким углом в Александрии Солнце в полдень освещает Землю. Расстояние между Александрией и Сиеной он узнал, спросив у караванщиков время, которое они провели в пути, учтя, что верблюды всегда движутся с одной и той же скоростью. Зная угол и длину дуги, Эратосфен нашел диаметр Земли с ошибкой 5-6% (рис. 6.9).

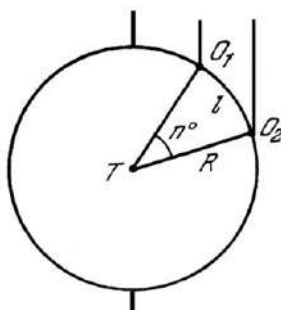


Рис. 6.9. Измерение размера Земли методом Эратосфена.

Метод геодезической сети

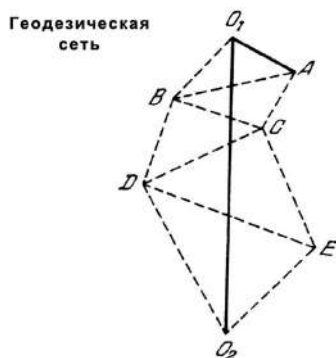


Рис. 6.10. Геодезическая сеть.

Звездный интерферометр Майкельсона

Интерферометр – это два или несколько отдельных телескопов, которые сводят свои изображения в один фокус. Иногда используется один телескоп, конструируется перископ из двух плоских зеркал, который раздвигает световые лучи, приходящие в объектив телескопа, два изображения складываются так, как будто они были получены двумя отдельными телескопами, находящимися на расстоянии в несколько десятков метров. Мы видим интерференционную картинку и, раздвигая зеркала, добиваемся момента, когда она интерференция замывается, понимаем какая база дает переход от разрешимого объекта к неразрешимому и, таким образом, определяем угловой размер объекта.

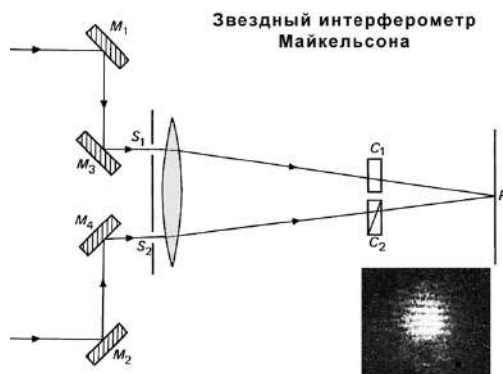


Рис. 6.11. Звездный интерферометр Майкельсона.

Метод взаимных затмений звезд

Покрытие звезд Луной

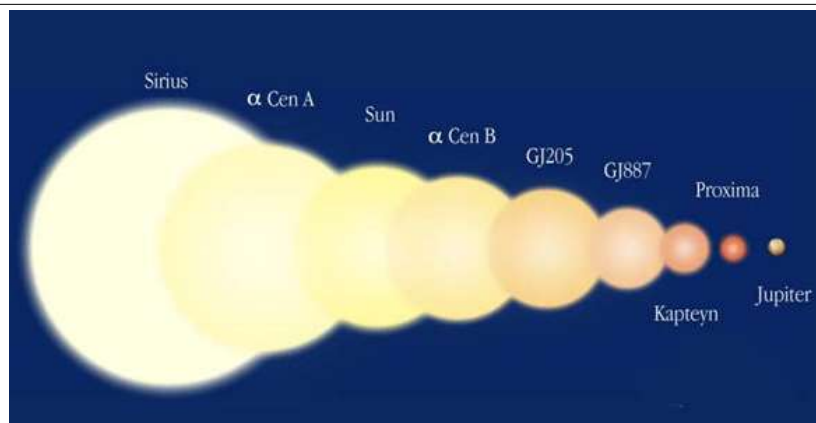


Рис. 6.12. Относительный размер ближайших звезд и Юпитера.

ЛЕКЦИЯ 7. ВОЗМУЩЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ. ПРИЛИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ. ПРЕЦЕССИЯ

Задача трех тел

Обычно в курсе общей астрономии мы говорим о задаче двух тел, но это довольно простая задача, и в жизни она не встречается. Посмотрите на солнечную систему – в ней не два тела. Конечно, Солнце доминирует, но есть и другие планеты, которые вносят весомый вклад в гравитационное взаимодействие тел, например, планеты-гиганты. Поэтому необходимо учитывать многообразные влияния со стороны многих тел на одно – переходим к задаче трех тел.

Надо сказать, что задача двух тел является простой только школьном варианте, когда мы рассматриваем ее в однородном гравитационном поле. Тогда, например, полет брошенного под углом к горизонту тела мы можем разделить на движение по горизонтали и по вертикали (рис. 7.1). В астрономическом варианте, когда два тела взаимодействуют не в однородном гравитационном поле, задача усложняется. Еще сложнее задача трех тел, на рис. 7.2 снизу представлено движение трех взаимодействующих тел, сближающихся в некоторой области пространства. Эта задача очень часто возникает в астрономии, потому что нам надо понять, как рождаются двойные звезды. Сближение трех звезд приводит к тому, что одна из них ускоряется и уносится избыток механической энергии, а две другие звезды связываются в гравитационную систему и дальше живут уже в качестве двойной звезды с отрицательной полной механической энергией.

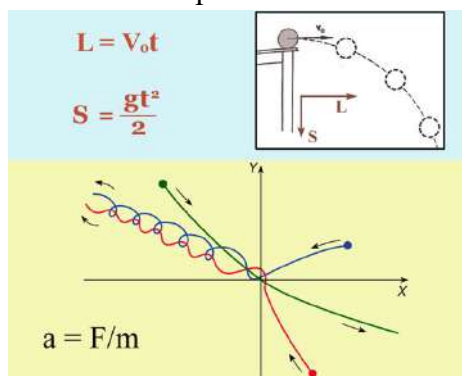


Рис. 7.1. Задача двух тел в однородном поле (сверху) и задача трех тел (снизу).

Задача трех тел

Зная начальные положения и скорости трех точечных тел произвольной массы, найти их координаты и скорости в любой иной момент времени.

Задачу трех тел всегда можно решить численно, но ошибка растет $\sim \Delta t$. Только в 1912 году финский математик К. Зундман нашел ее аналитическое решение в виде сходящихся рядов. Но их сходимость невероятно медленная: чтобы вычислить

положение Земли, Луны или Солнца с точностью, даваемой астрономическими ежегодниками, нужно взять сумму $10^{8\,000\,000}$ членов!

Любопытно, что некоторые варианты задачи трех тел представляют собой довольно простую картину, так называемые, хореографии (рис. 7.2). Но поскольку в природе реализуются без исключения только устойчивые решения, мы можем сделать вывод, что три тела одинаковой или сравнимой массы не могут в общем случае двигаться устойчиво относительно общего центра масс, обязательно произойдет что-то наподобие вот этого, два тела свяжутся в вечно существующую двойную систему, а третье унесет избыток энергии и уйдет из этой системы навсегда.

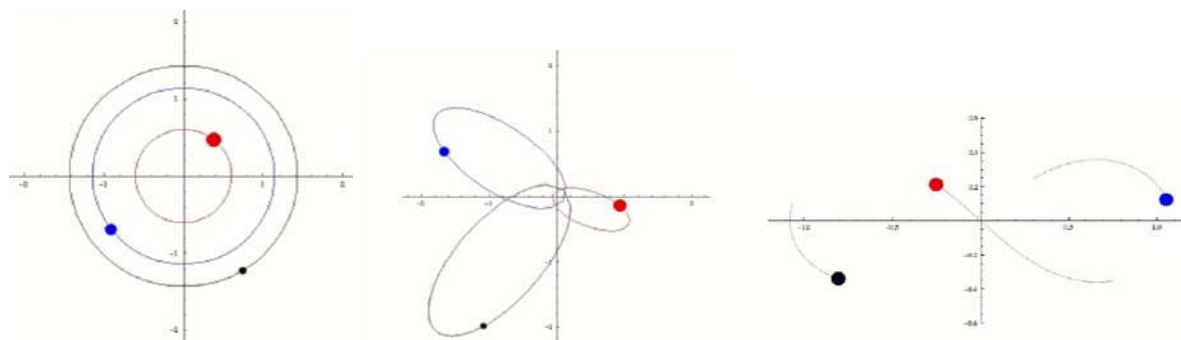


Рис. 7.2. Периодические хореографические системы трех тел.

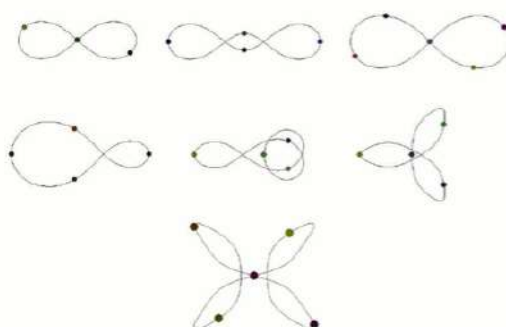


Рис. 7.3. Периодические хореографические системы N тел.

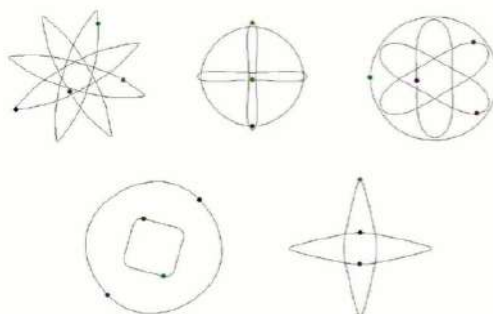


Рис. 7.4. Периодические нехореографические системы N тел.

Вообще говоря, вечность – это чисто математическая абстракция, физики работают с конкретными диапазонами времени. Оказывается, на больших (не вечных) диапазонах времени можно найти решение задачи трех, четырех взаимодействующих тел, но для этого нужно, чтобы в их взаимных расстояниях была какая-то иерархия, например, два тела были рядом, а третье – вдали (рис. 7.5). Чем больше отношение большего расстояния к меньшим, тем устойчивее такая система. Надежно обнаружены 6-кратные системы, есть предположение, что существуют 7 и 8-кратные системы, но пока доказать их реальность не удастся.

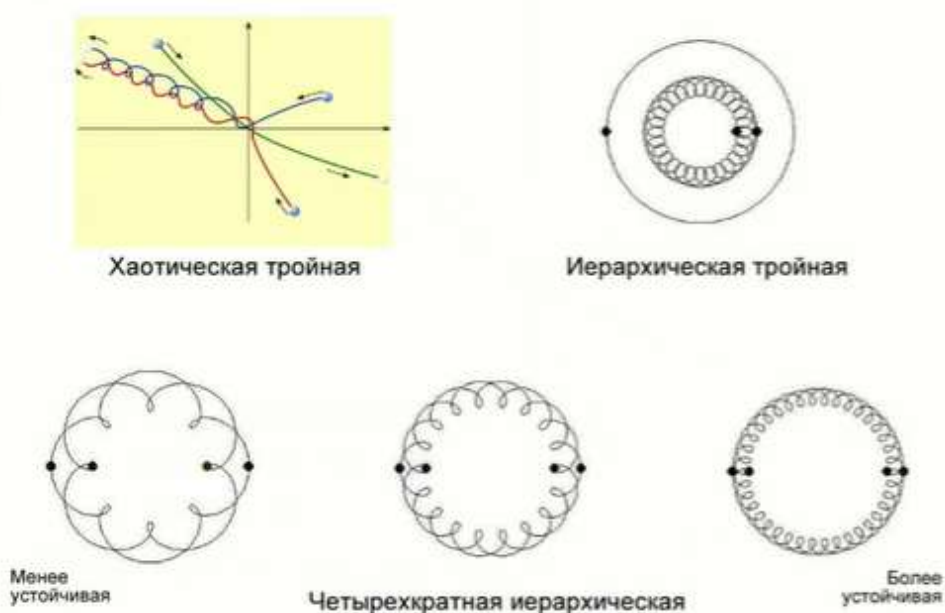


Рис. 7.5. Иерархические (условно устойчивые) и хаотические системы N тел.

Система Земля-Луна-Солнце является классическим примером задачи трех тел. Если мы сравним силы притяжения Луны к Земле и к Солнцу, то с удивлением обнаружим, что Солнце сильнее притягивает Луну, чем Земля, почему же Луна продолжает двигаться вокруг Земли? Дело в том, что эффект Солнца приливный (дифференциальный), то есть Солнце почти одинаково притягивает к себе и Землю, и Луну. Оказывается, что притяжение Луны к Земле превосходит разницу притяжения Земли и Луны к Солнцу, поэтому Луна движется вокруг Земли. Тем не менее Солнце вносит довольно сильные возмущения в движение Луны по орбите.

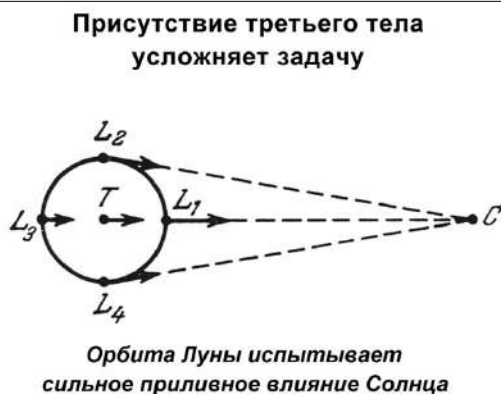


Рис. 7.6. Система Земля-Луна-Солнце.

Самым популярным вариантом упрощения является круговая ограниченная задача трех тел. Предполагается, что два тела сравнимы друг с другом по массе, а масса третьей точки бесконечно мала по сравнению с первыми двумя. Таким образом, два тела вносят искажение в движение третьего, а само третье тело на них не влияет. Два массивных тела движутся по круговой орбите вокруг центра масс. На рис. 7.7 изображены эквипотенциальные поверхности гравитационного и центробежного потенциалов. Мы видим две гравитационных ямы (у массивных тел системы есть практически замкнутые области их гравитационного влияния) и потенциал центробежной силы вдали от них. В этой системе есть пять выделенных точек (рис. 7.8), так называемых, точек Эйлера (L_1, L_2, L_3) и Лагранжа (L_4, L_5). Если третье тело движется синхронно с первыми двумя, то есть неподвижно во вращающейся системе координат, то это точки равновесия. В системе Земля-Луна-Солнце третьим телом можно считать Луну, ее орбита будет проходить в области гравитационного влияния Земли. В последние годы точка L_2 стала очень популярной для запуска туда космических аппаратов, особенно тех, которые страдают от излишков падающего на них тепла.

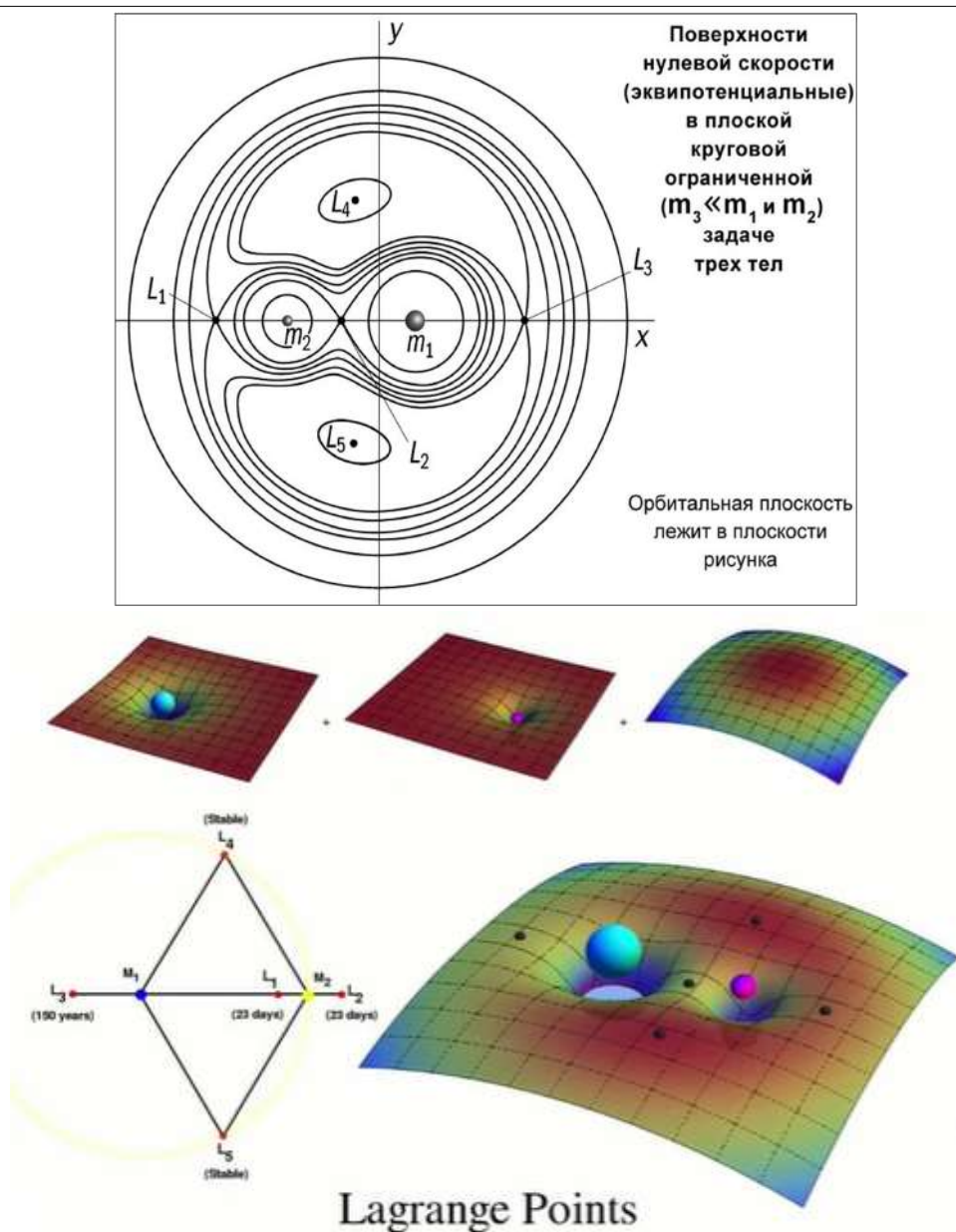


Рис. 7.7. Плоская круговая ограниченная задача трех тел.

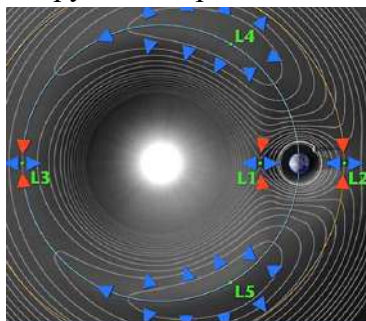


Рис. 7.8. Точки Эйлера (L_1, L_2, L_3) и Лагранжа (L_4, L_5).

Движение внутри области гравитационного влияния одного из тел происходит совсем не по кеплеровской орбите, чувствуется влияние второго массивного тела. На рис. 7.9 представлена траектория космического аппарата, который движется, приближаясь к границам гравитационного влияния Земли, недалеко находясь от точки L_1 , которая является пограничной между двумя областями.

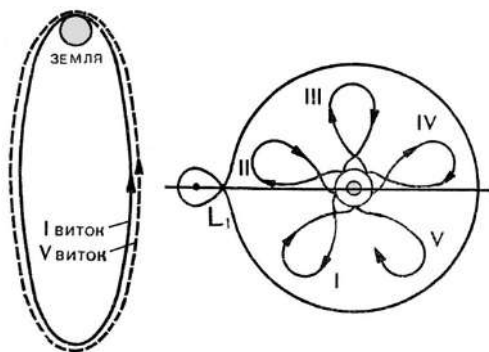


Рис. 7.9. Траектория движения космического аппарата вблизи границы области гравитационного влияния Земли.

В точках L_4 и L_5 системы Солнце-Юпитер скопилось довольно много небольших космических тел (астероидов, ядер комет), поскольку эти области устойчивы относительно небольших возмущений со стороны далеких тел. Небольшие гравитационные углубления на потенциальной поверхности позволяют телам длительное время оставаться в районе точек L_4 и L_5 , как правило, около тысячи лет (рис. 7.10).

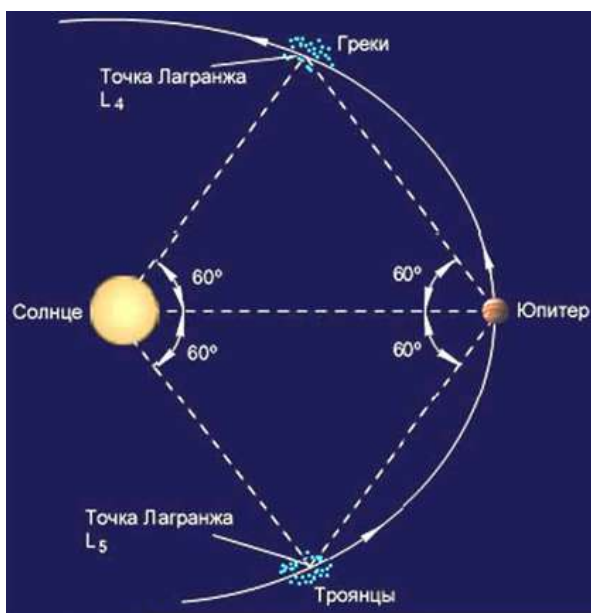


Рис. 7.10. Скопления астероидов в точках L_4 и L_5 системы Солнце-Юпитер.

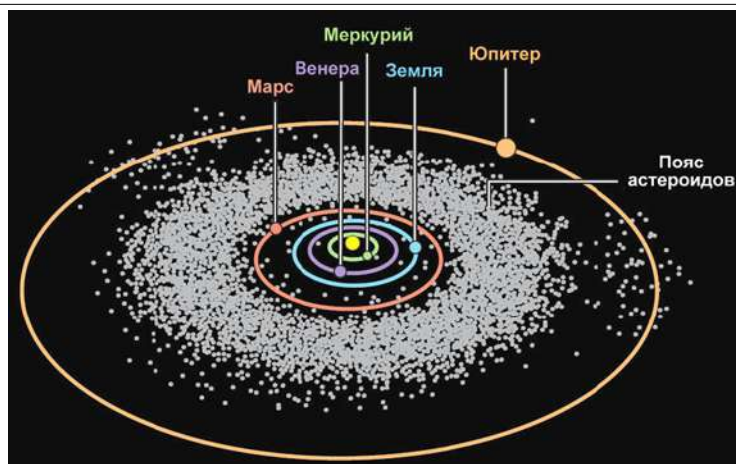


Рис. 7.11. Распределение астероидов в солнечной системе.

Приливные явления

Представим себе кабину лифта, у которой в начальный момент времени обрезали подвес, и она свободно падает к центру Земли. Распределим в ней несколько пробных масс и будем наблюдать за ними, падая вместе с этим лифтом. Точка, которая была ближе к центру Земли, будет падать с большим ускорением и уходить вперед, наиболее удаленная от центра Земли точка будет отставать от группы, а точки, которые находятся на одинаковом расстоянии от центра Земли в начале движения, будут сближаться. Как видим, система свободных масс деформируется, вытягиваясь относительно своего центра масс (рис. 7.12).

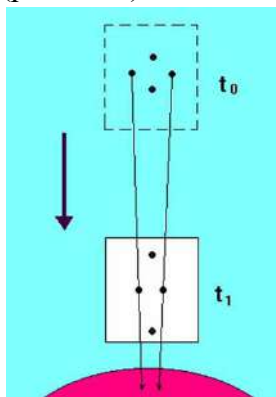


Рис. 7.12. Приливный эффект в свободно падающем лифте.

Можно говорить о поле приливных сил (рис. 7.13), если наблюдатель находится в точке А и свободно падает по направлению к гарантирующему телу m , то разбросав вокруг наблюдателя пробные массы, мы увидим, как они будут двигаться с разными ускорениями относительно наблюдателя.

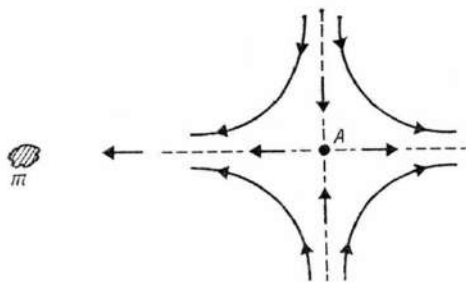


Рис. 7.13. Поле приливных сил.

На поверхности Земли можно представить себе поле приливных сил, действующих на наиболее подвижные среды: атмосфера и океан. Представим, что вся Земля твердая и покрыта слоем океанской воды, поле приливных сил в этом случае вытягивает океан в двух диаметрально противоположных точках и прижимает его к поверхности Земли в плоскости, перпендикулярной этому направлению (рис. 7.14).

Поскольку Луна делает один оборот по орбите за месяц, а земной шар – за сутки, на побережьях материков дважды в течение суток наблюдаются приливы, дважды в течение суток – отливы.

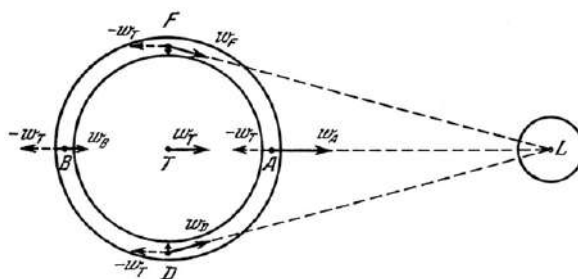


Рис. 7.14. Поле приливных сил системы Земля-Луна.

Приливные эффекты от Луны и Солнца конкурируют, хотя Луна и выигрывает, Солнце иногда усиливает, а иногда ослабляет действие Луны. Обычно разделяют две крайние точки этого влияния, говоря о сизигийных и квадратурных приливах (рис. 7.15).

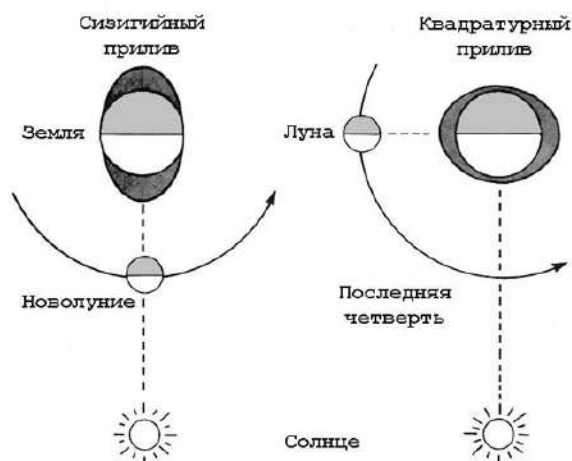


Рис. 7.15. Сизигийный и квадратурный приливы.

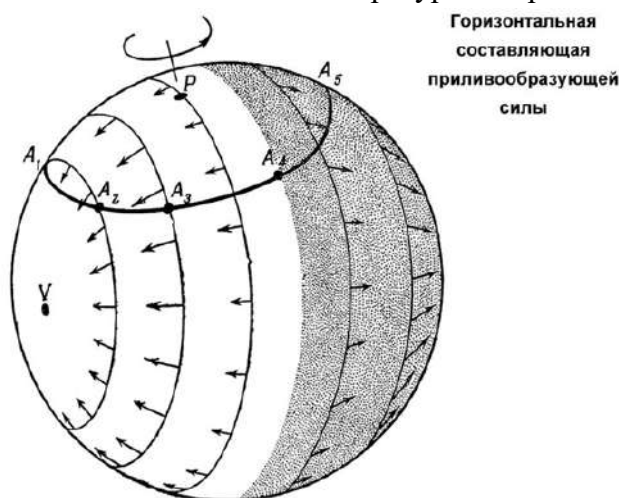


Рис. 7.16. Горизонтальная составляющая приливообразующей силы.

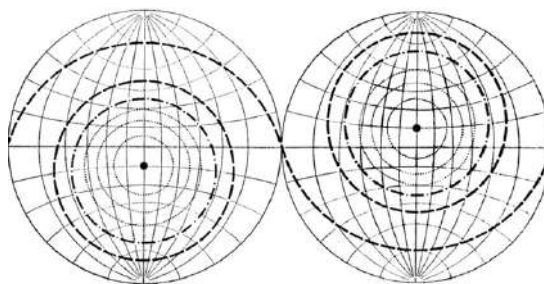


Рис. 7.17. Карта статического прилива: Луна в зените на широте 15° .

Мы рассмотрели идеальную картину, потому что на самом деле мирового океана нет, а есть отдельные океаны, каждый из которых является самостоятельной колебательной системой. Приливное ускорение влияет на движение воды, но в каждом океане есть еще и собственная частота колебаний. Кроме того, океан довольно мелкий: в ширину он составляет тысячи километров, в глубину – всего несколько километров, а

мелкая вода не так охотно перемещается из одного края океана в другой. Все это надо учитывать, поэтому расчеты приливов довольно сложные.

Из приливных течений (перемещение воды из области отлива в область прилива) можно извлекать энергию, например, поставив турбину, которую вода будет вращать. Первая (1963-66 гг.) и крупнейшая в мире приливная электростанция «Ля Ранс» находится во Франции.

Казалось бы, прилив слабо проявляется в небольших замкнутых водоемах, однако есть исключения, например, Женевское озеро на границе Франции и Швейцарии. В нем влияние Луны попало в резонанс с его собственной частотой колебаний воды в озере, поэтому приливы там заметны, их называют сейшами (стоячие волны большого периода).

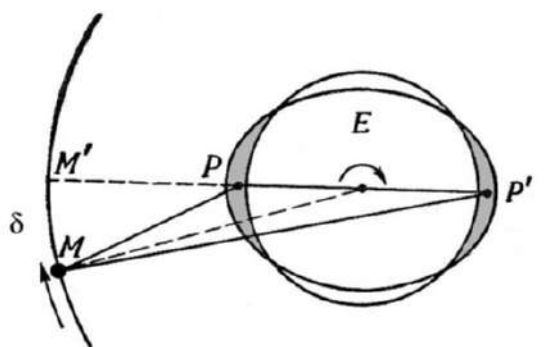
Максимально высокие приливы наблюдаются на восточных побережьях материков, потому что материк за счет вращения Земли движется с запада на восток и, таким образом, набегаёт на приливный выступ океана. Морские приливы в узких заливах значительно выше, чем в открытом море. Амплитуда статического прилива составляет около 0,5 м, а, например, в заливе Фанди (Канада) разница уровней полной воды и малой воды составляет от 9 до 15 м.

Можно вести статистику приливов, измеряя уровень воды при помощи механического мореографа. Приливы прогнозируются с трудом, но если у вас есть накопленная статистика, вы можете разложить это квазипериодическое движение в ряд Фурье, отбросив второстепенные члены, просуммировать главные и сделать расчет. Во всех больших портах есть прогнозы высоты воды, чтобы корабль не сел на мель.

Теперь давайте вспомним о том, что не только Луна и Солнце действуют на Землю, вызывая приливы, но в ответ на них действует сама Земля. Вращение Земли происходит намного быстрее (один оборот в сутки), чем движение Луны по орбите (один оборот в месяц), поэтому приливные выпуклости океана направлены не точно на Луну. За счет трения океанской воды о твердое дно океана приливные горбы сносятся в направлении движения Земли. Обратите внимание на то, что Земля как целое притягивает Луну по радиус-вектору к центру масс, тогда Луна вращается по эллиптической орбите, как положено. Но избыток гравитации по отношению к приливным выступам немножко сбивает Луну с ее идеальной орбиты, причем приливный выступ ближе к Луне, и он увеличивает ее механическую энергию, орбита Луны понемногу повышается. Луна действительно по наблюдениям каждый год примерно на 4 см удаляется от Земли. Но Земля тоже тормозится, передавая свою энергию вращения Луне, и длина суток на Земле понемногу увеличивается.

В системе спутников больших планет, например, Юпитера это явление еще более заметно. Высота приливного горба у Ио составляет около 10 км. Заметный эксцентриситет орбиты Ио ($e = 0.0041$) вызывает «дыхание» приливного горба примерно на 100 м. Эксцентриситет орбиты Ио поддерживается влиянием его соседей

(Европы и Ганимеда), поскольку они движутся в резонансе 1:2:4. У Луны высота приливного горба около 25 м, поэтому несмотря на большой эксцентриситет орбиты ($e = 0.055$) «дыхание» приливного горба составляет всего 3 м. Довольно мощная деформация твердого тела спутника естественно рассеивает свою энергию, превращаясь в тепло, поэтому Ио внутри раскалён.



δ — угол запаздывания прилива ($2-5^\circ$ для Земли)

Рис. 7.18. Приливное трение.

В области двойных звезд приливы не менее важны. Если две звезды проходят близко друг другу, то они оказывают друг на друга мощное приливное влияние. Приближаясь к массивному телу, менее массивное тело деформируется, и часть его орбитальной кинетической энергии переходит в энергию деформации, значит скорость звезды немного уменьшается, и она переходит с гиперболической орбиты на эллиптическую. Несколько таких пролетов переводят тело на практически круговую орбиту, таким образом, мы можем говорить о приливном захвате одной звезды другой (рис. 7.19).

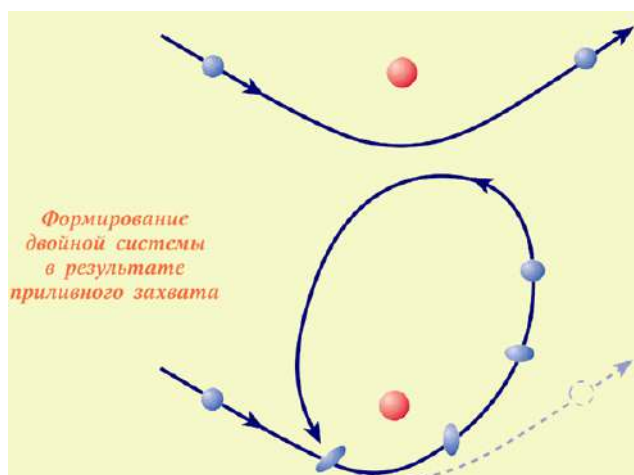


Рис. 7.19. Приливный захват.

Приливы особенно ярко себя проявляют в тех системы, где одно из тел компактное, но массивное, например, рядом с нормальной звездой расположена звезда релятивистская, то есть белый карлик, нейтронная звезда или черная дыра.

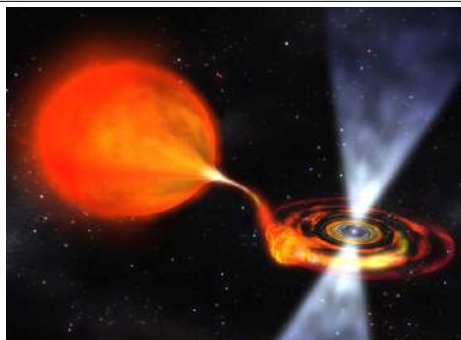


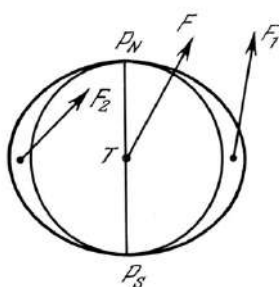
Рис. 7.20. Система с релятивистской звездой.

Прецессия

Земля как целое и твердое тело также испытывает приливное влияние со стороны Луны и Солнца, оно не так заметно, как приливы в морях, но на больших промежутках времени становится очень важным. На рис. 7.21 представлена Земля в истинной форме в виде эллипсоида, сжатого вдоль оси вращения Земли, в данном случае это не приливные выступы, а экваториальные вздутия Земли. Внутренняя часть планеты притягивается к внешнему телу как ее центр масс, а экваториальные вздутия – немного в разных направлениях, следовательно, возникает момент сил, который старается повернуть планету. Момент, который прикладывает Луна, добавляется в перпендикулярном направлении к общему моменту вращения тела, и Земля как волчок прецессирует (рис. 7.23).

Причина
прецессии

• L



Силы, действующие
на экваториальное
вздутие
вращающейся
планеты

Рис. 7.21. Эллипсоид вращения Земли.

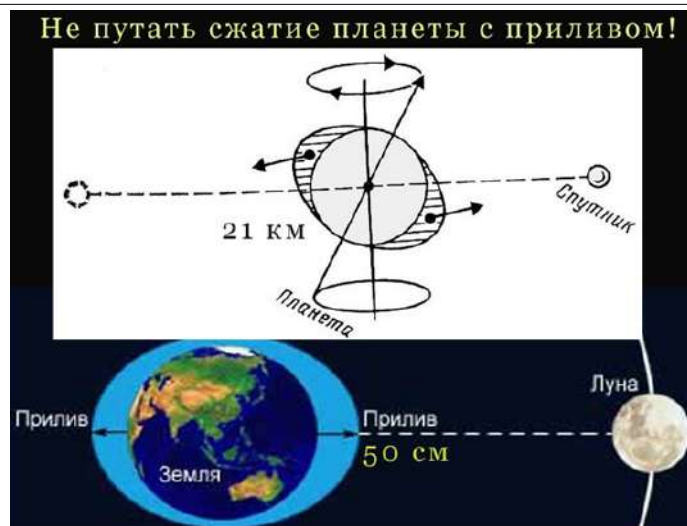


Рис. 7.22. Момент приливных сил.

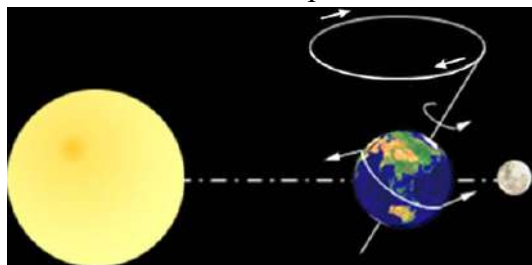


Рис. 7.23. Прецессия Земли.

Период общей прецессии земной оси составляет 25 770 лет. Лунно-солнечная прецессия сдвигает точку равноденствия на $50,39''$ в год к западу (от Солнца – $15,9''$, от Луны – $34,5''$); прецессия от планет (движение эклиптики!) – на $0,105''$ в год к востоку; общая прецессия – на $50,29''$ к западу.



Рис. 7.24. Полярные звезды.

Малые колебания относительно конуса прецессии называются нутационными колебаниями, их амплитуда очень мала: если амплитуда прецессии 23 градуса, то нутации составят всего несколько угловых секунд. Период нутаций составляет около

18 лет и равен периоду прецессионного движения лунной орбиты под действием притяжения к Солнцу.



Рис. 7.25. Нутации.

Ориентация тела планеты относительно оси ее вращения, вообще говоря, может меняться. Сама ось вращения, если нет посторонних влияний, конечно, остается неизменной, но тело планеты на этой оси может немного колебаться. Такие колебания мы наблюдаем в виде колебаний северного полюса Земли по ее поверхности (рис. 7.26), они очень велики. Они приводят к тому, что широта всех точек на Земле меняется, это необходимо учитывать.

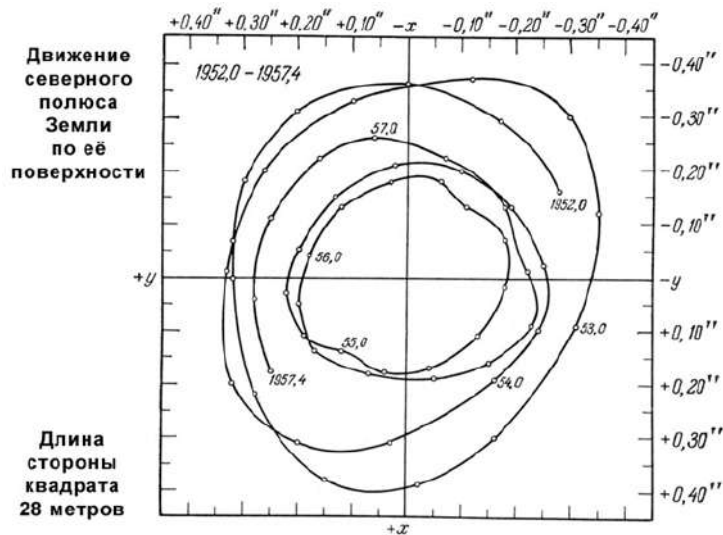


Рис. 7.26. Движение северного полюса Земли.

ЛЕКЦИЯ 8. ПРАКТИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ

Измерительные приборы

Астрономия является прикладным знанием и полезна даже не только для астрономов, для любого человека знание некоторых созвездий довольно полезная вещь. С помощью ковша Большой медведицы можно найти Полярную звезду, которая указывает на север, поэтому, заблудившись в лесу в ясную погоду вы всегда найдете направления сторон горизонта (рис. 8.1).

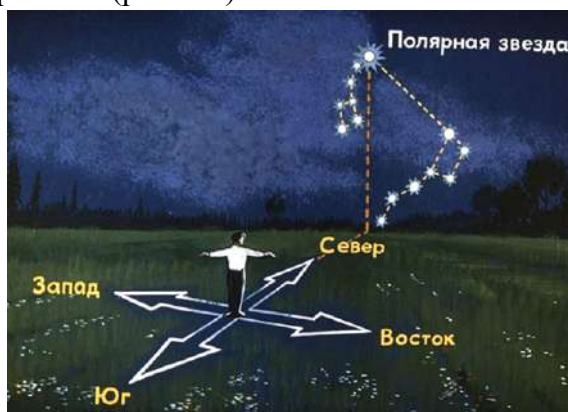


Рис. 8.1. Определение направления сторон горизонта.

Астроному полезно носить в голове действующую карту неба, то есть ожидаемую карту на ближайшие несколько дней или недель, потому что иногда на небе возникают новые светила, вспыхивают новые звёзды, взрываются сверхновые, таким образом, вы их сразу обнаружите, это может помочь вам в вашей карьере. Более того полезно уметь быстро оценивать угловые расстояния между светилами на небе (рис. 8.2). Если на небе появится новая комета, метеор, яркий болид, летающая тарелка и т.п., вы сможете быстро оценить ее расположение относительно ориентиров на звездном небе.

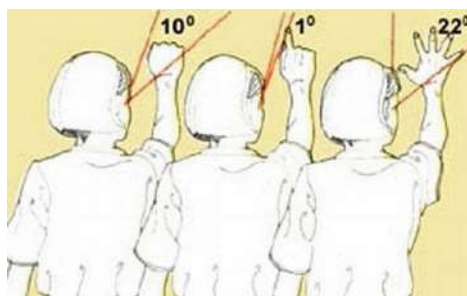


Рис. 8.2. Способ оценки угловых расстояний между светилами на небе.

Астрономы в течение веков понемногу увеличивали точность своих измерений, в средневековье уже пользовались достаточно аккуратно сделанными угломерными инструментами (квадранты, сектанты), уже тогда повышенная точность измерений позволила перейти от геоцентрической системы координат к гелиоцентрической, от

представления о круговых орбитах к эллиптическим. Обратим внимание на то, что все это было сделано еще без участия оптических приборов (телескопов).

Особенно важно для астрономов в те времена было наладить службу времени. На рис. 8.3. представлена карта Земли, составленная в XV веке. Посмотрите, как неправильно с современной точки зрения выглядят карты того периода: наблюдаются явные деформации материков по долготе. Это связано с тем, что тогда не было приборов для точного счета времени, а определить свою долготу на Земле можно только, имея точные часы и таблицы небесных явлений (движение Луны на фоне звезд или движение спутников Юпитера). Когда появились хорошие часы, так называемые, морские хронометры, уже на каждом судне можно было хранить время своего порта, и, имея таблицы небесных явлений, например, прохождение Луны рядом с некоторыми звёздами, и сравнивая местное время и данное явление, определять свою географическую долготу.

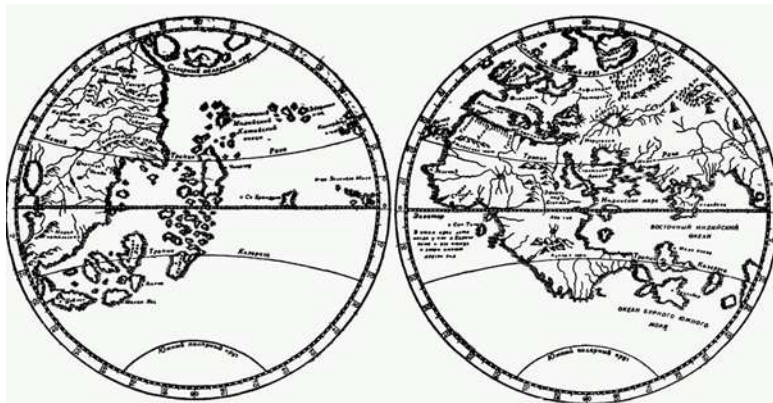


Рис. 8.3. Глобус немецкого картографа Мартина Бехайма (1492 г.)

Измерение на палубе корабля – это непростое дело, если на земле можно установить стационарный прибор, поставить отвес, создать вертикаль, то на движущейся палубе это не так просто. Но к счастью на морских просторах есть горизонт, который очень близок к математическому горизонту, и горизонтом можно пользоваться как заменой направления на вертикаль. Но поскольку сама палуба корабля неустойчива, необходимо компенсировать действие волн на корабль, приходится использовать ручные нестационарные угломерные инструменты, например, морской секстант (рис. 8.4). Секстант может служить и для других целей, например, если есть хорошая карта, на которой отмечены высоты некоторых горных пиков, и мы видим их с моря на континенте, то по угловой высоте горного пика можно вычислить расстояние от берега до корабля. Секстант используют даже космонавты на МКС.

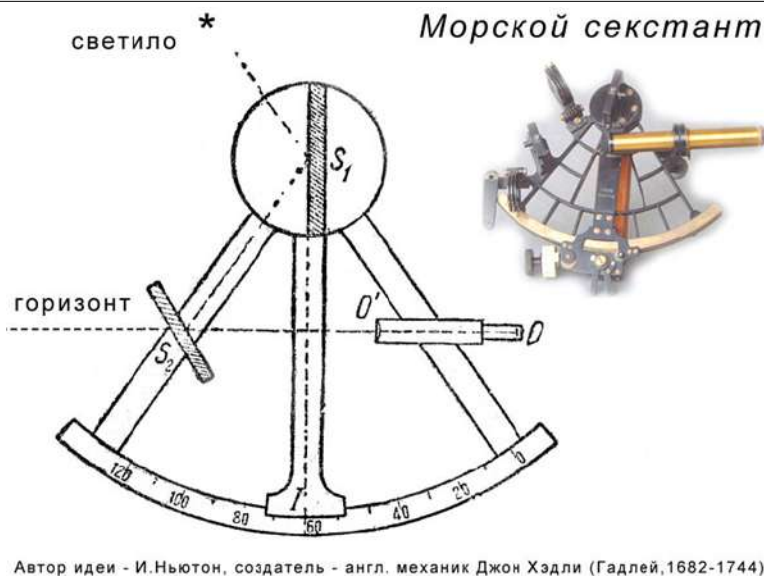


Рис. 8.4. Морской секстант.

У астрономов есть приборы типа секстанта, так называемые, астролыбии, они позволяют делать стационарные очень точные измерения высоты светила над горизонтом особенно в момент его прохождения через меридиан. В качестве горизонтальной плоскости математического горизонта используется ртутный сосуд (рис 8.5).

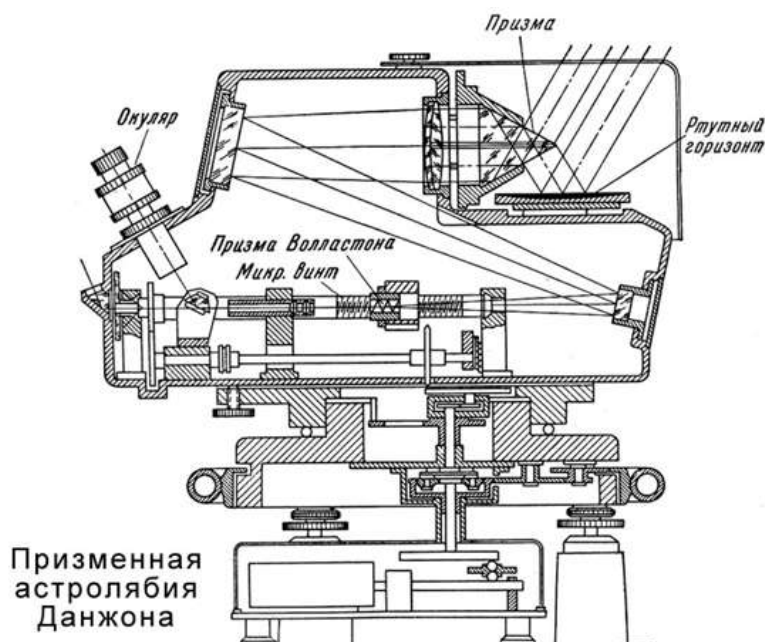
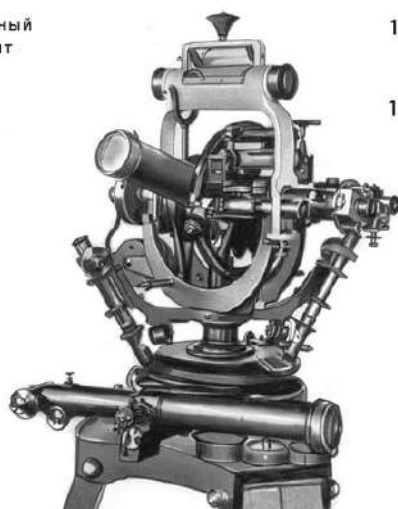


Рис. 8.5. Призменная астролыбия Данжона.

Существуют более универсальные инструменты, которые позволяют измерять и азимут, и высоту, они так называются у астрономов и геодезистов – универсальные

Инструменты, у них есть свои особенности, которые обеспечивают им высокую точность измерений (рис. 8.6).

Универсальный
инструмент



$$1' = \frac{1}{3438} \text{ рад}$$

$$1'' = \frac{1}{206265} \text{ рад}$$

Рис. 8.6. Универсальный инструмент.

Стационарные угломерные инструменты у астрономов часто выполняются в виде меридианного круга (рис. 8.7). Такое название объясняется тем, что он наблюдает только в плоскости небесного меридиана (север-юг), как правило, именно в этой плоскости мы измеряем моменты прохождения звезд через меридиан и высоту над горизонтом, когда звезда пересекает меридиан.

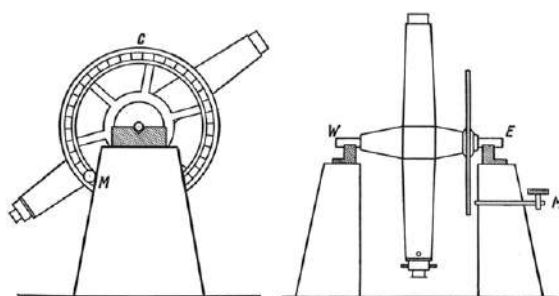


Рис. 8.7. Схема меридианного круга.

Существуют отдельного типа специализированные телескопы, которые тоже позволяют измерять координаты звезд: зенит-телескоп, работающий в основном в области зенита, и зенитная фотографическая труба, которая ориентирована только в зенит (рис. 8.8).

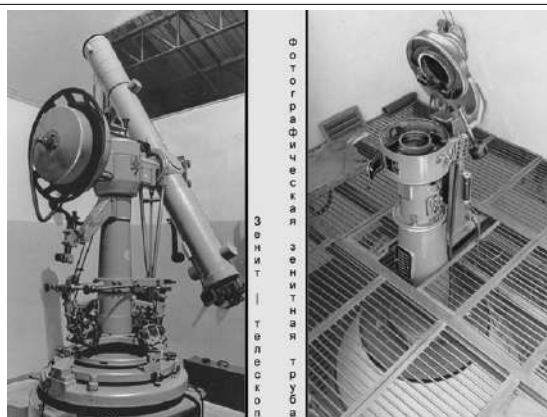


Рис. 8.8. Зенит-телескоп (слева) и фотографическая зенитная труба (справа).

Точное измерение звездных координат позволяет составлять каталоги звезд (рис. 8.9). Фундаментальные каталоги потому и называются фундаментальными, что мы отдельно, не опираясь на положение других небесных объектов, измеряем положение конкретных звезд, то есть относительно меридиана, вертикального направления и так далее. Когда уже составлен фундаментальный каталог, и несколько тысяч звезд на небе получили свои надежные координаты, тогда, опираясь на их положение, можно измерять положение звезд, которые находятся рядом с ними.

Название каталога	Приблизительное число звёзд	Точность координат на 1990 г.	Точность годичных собственных движений на 1990 г.
FK5	1 500	0",05	0",002
FK5 Sup	3 000	0",08	0",003
IRS	40 000	0",20	0",005
PPM	325 000	0",30	0",006
ACRS	320 000	0",30	0",006
SAO	260 000	1",50	-
GSC	20 000 000	1",50	-
HIP	118 000	0",001	0",001
HCRF	113 500	0",001	0",001
TYC	1 060 000	0",040	0",040
ACT	990 000	0",040	0",0025
TRC	990 000	0",040	0",0025
AC-2000	4 620 000	0",30	-
USNO-A2	526 000 000	0",040	0",040
TYC2	2 539 000	0",50	-

Рис. 8.9. Каталоги звезд.

Аберрация света

Аберрация света – это эффект специальной теории относительности. Иногда его грубо интерпретируют следующим образом: скорость движения Земли по орбите складывается со скоростью света, приходящего к нам, поэтому направление визирования источника света меняется. Вообще говоря, это неправильно, потому что

мы не можем складывать со скоростью света что-то еще, так как получится скорость больше световой, но при небольших скоростях движения получаются достаточно точные расчеты. Аберрация и параллакс – это совершенно разные вещи, параллакс зависит только от положения Земли на орбите, а аберрация от направления вектора скорости Земли по орбите. Аберрация позволяет измерять скорость орбитального движения Земли, а параллакс – размер орбиты Земли, либо, если мы знаем размер орбиты, расстояние до светила.



Рис. 8.10. Аберрация света.

Измеряя положение звезд год от года, век от века, мы убедились, что одни звезды перемещаются относительно других, такое перемещение называется собственным движением звезд. Например, на рис. 8.11 мы видим, как ковш Большой медведицы со временем изменяет свою форму. Пять центральных звезд движутся примерно в одном направлении, это звезды одного возраста, генетически связанные между собой, видимо родившиеся в одном месте, в одно время, и они летят туда, куда двигалось исходное облако, в котором они родились. Крайние звезды ковша движутся в другом направлении, поэтому и искажается видимая форма ковша.

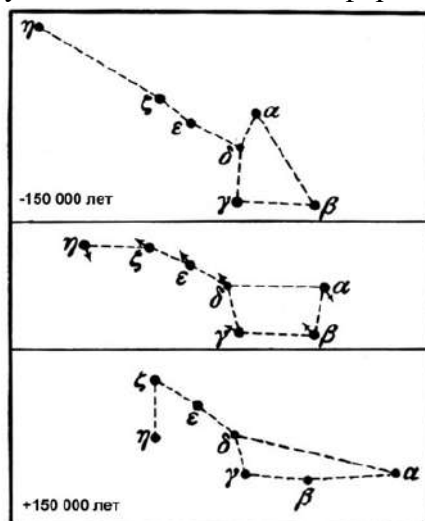


Рис. 8.11. Собственное движение звезд.

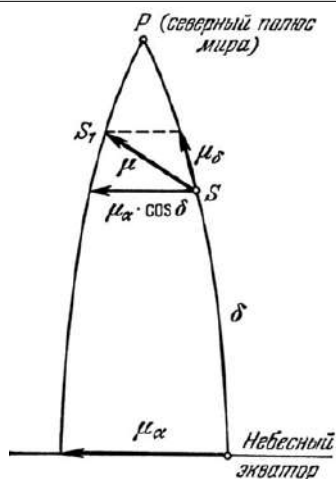


Рис. 8.12. Компоненты собственного движения.

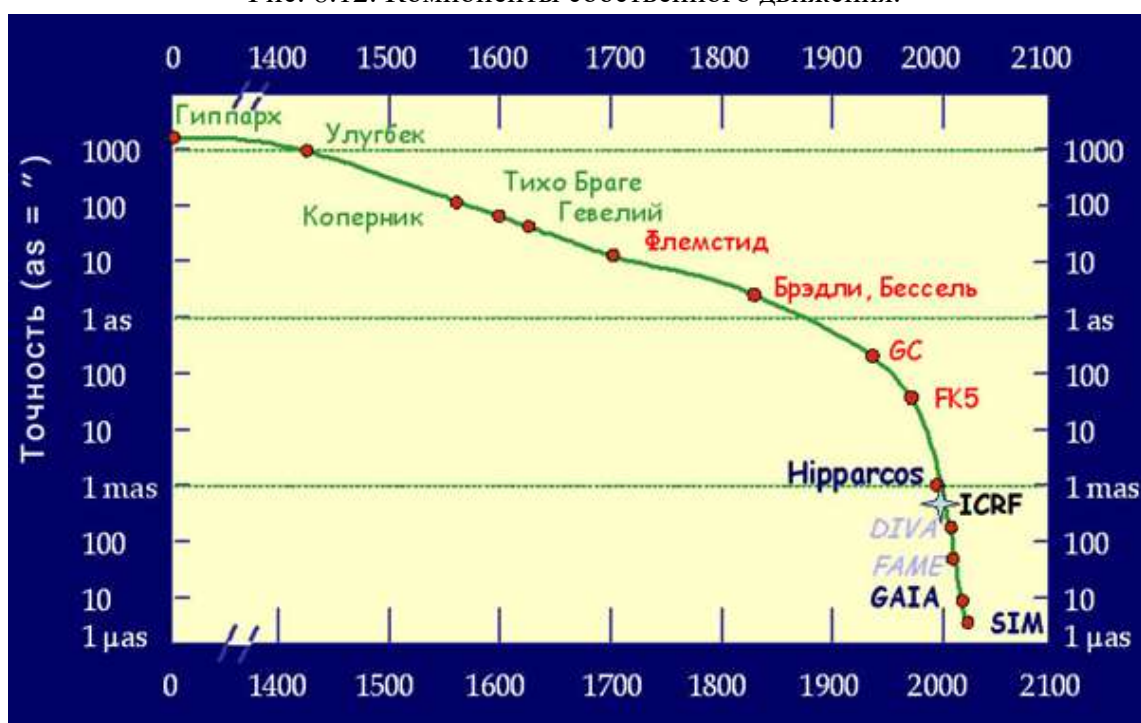


Рис. 8.13. Прогресс в измерении углов на небесной сфере.

Измерение времени

- Хронометр
 - Используется в экспедициях и в мореплавании
 - Карданный подвес обеспечивает горизонтальное положение
 - Точность хода составляет $\pm 0,3^s$ в сутки (для сравнения, маятниковые часы Шорта имеют точность хода $\pm 0,001^s$, Федченко – $\pm 0,0003^s$)
- Кварцевые часы
 - Колебания суточного хода: $\pm 10^{-5} \div 10^{-5}$ с

- Атомные часы (квантовые часы)
 - Речь идет о колебаниях электронов в оболочках атомов
 - Относительная стабильность частоты: $10^{-13} \div 10^{-14}$
 - В 1967 г. международным соглашением длительность секунды была определена как 9192 631 770,0 периодов колебаний, соответствующих энергетическому переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атомов единственного стабильного изотопа цезия ^{133}Cs .
 - Есть варианты и более точных атомных часов, например, на основе водорода (рис. 8.15)
 - Системы спутниковой навигации основаны на работе атомных часов



Схема атомнолучевой трубки

- 1 — источник пучка Cs; 2 и 4 — отклоняющие магниты, создающие неоднородные магнитные поля H_1 и H_2 ;
3 — объёмный резонатор электромагнитных волн, находящийся в постоянном и однородном магнитном поле H ;
5 — раскалённая вольфрамовая проволока;
6 — коллектор ионов Cs; 7 — измерительный прибор

Цезий — щелочной металл с одним электроном во внешней оболочке. Ориентация его спина относительно ядра даёт сверхтонкое расщепление. Из печки ($150\text{ }^{\circ}\text{C}$) вылетают возбуждённые и невозбуждённые атомы, их магнитный момент разный. В резонатор попадают только возбуждённые. Излучение от кварцевого генератора с близкой частотой вынуждает их излучать. В измеритель потока попадают только невозбуждённые атомы.

Рис. 8.14. Цезиевый стандарт частоты.

Водородный генератор ($\lambda = 21$ см, $\nu = 1420,4...$ МГц)

Активный квантовый стандарт частоты
(мазер, maser)

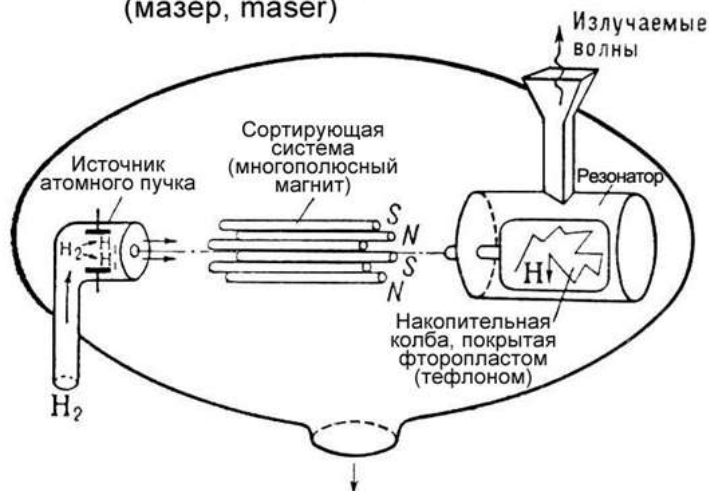


Рис. 8.15. Водородный генератор.



Рис. 8.16. Повышение точности часов.

Системы глобальной навигации

Каждая спутниковая система глобальной навигации обычно имеет 24 действующих спутника на орбитах с разным наклоном относительно экватора Земли, то есть, где бы вы ни находились в любой точке Земли, вы увидите у себя над головой несколько таких спутников. Нам надо точно знать, где в какой момент времени они находятся, для этого существуют специальные службы лазерной локации спутников, они с помощью угловых отражателей, специализированных телескопов, у которых есть мощный лазерный источник, и телескопа для приема отраженного сигнала точно измеряют характеристики гравитационного поля Земли, а значит, позволяют нам прогнозировать движение спутников системы глобальной навигации.

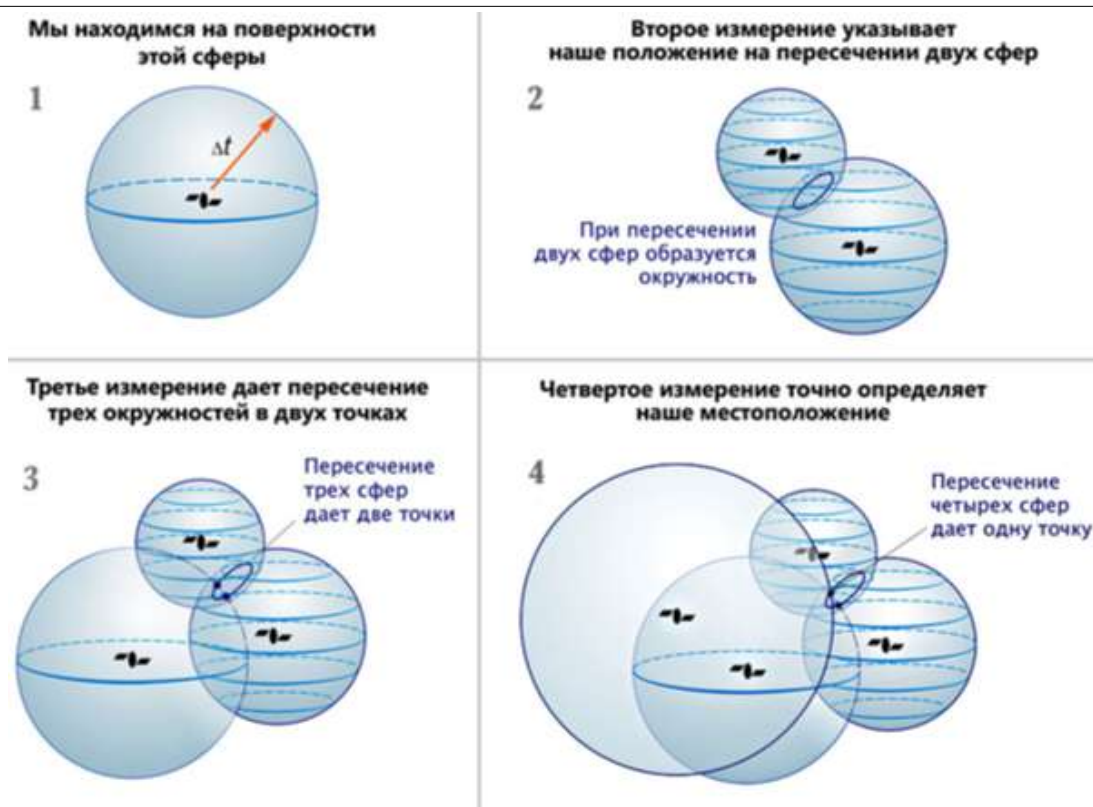


Рис. 8.17. Принцип работы системы глобальной навигации.

Системы глобальной навигации:

- ГЛОНАСС – глобальная навигационная спутниковая система (Россия)
- GALILEO (Евросоюз)
- BeiDou и BeiDou-2 (Китай)
- Indian Regional Navigation Satellite System (Индия)
- QZZS – Quasi-Zenith Satellite System (Япония)

Вообще говоря, спутниковые системы навигации были созданы для военных нужд, уже позже под давлением общественности их сигналы рассекретили, и теперь мы, гражданские люди, ими пользуемся. Но военные ими сегодня не удовлетворены, потому что это радиосистемы, а в радиодиапазоне легко создать помехи, ложные сигналы и обмануть таким образом навигаторы. Военные требуют создать новые навигационные системы, опирающиеся на поля, которые невозможно испортить, у Земли есть такие поля: магнитное и гравитационное. Сейчас идут работы над тем, чтобы использовать их для навигационных целей. Любопытно, что гравитационное поле Земли меняется от сезона к сезону, как правило, из-за влажности воздуха.

Наконец, астрономы предложили свою опору для навигации – это рентгеновские пульсары. Это надежная система, испортить ее ничем невозможно, но, к сожалению,

рентгеновские детекторы довольно массивные, и применять их в военных целях пока нет смысла, а вот скажем при межпланетных перелетах вполне.

Астрономы время от времени публикуют списки постоянных. Некоторые постоянные такие, как масса планеты или расстояния между планетами, конечно, меняются, но для того, чтобы в данную эпоху все расчеты всех астрономов в мире были согласованы, публикуются списки постоянных.

Системы астрономических постоянных:

- система Ньюкома, 1898
- система IAU, 1964
- система IAU, 1976
- система DE102, 1977
- система DE200, 1982
- система IERS, 1992
- система DE403, 1995

Имена астрономических объектов

Наименованием объектов на небе заведует специальная комиссия в рамках международного астрономического союза. Она действует по следующим принципам:

- Звёздам и галактикам имена не дают.
- Планетам дают мифологические имена.
- Кометам дают имена первооткрывателей.
- Астероидам дают имена выдающихся людей по предложению первооткрывателей.

ЛЕКЦИЯ 9. АТМОСФЕРА

Атмосфера – это разные слои воздуха, имеющие разную температуру, движущиеся относительно друг друга, перемешивающиеся, турбулентные, постоянно живущие.

Свойства атмосферы:

- Неабсолютная прозрачность
- Сумеречные явления
- Собственное свечение
- Рефракция
- Атмосферное дрожание

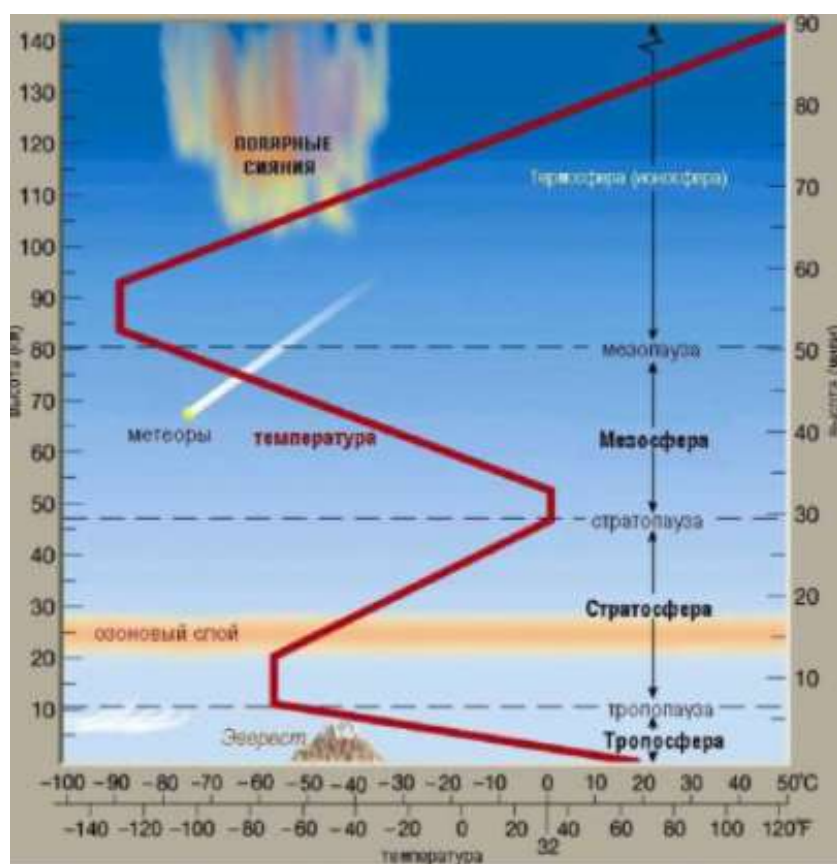


Рис. 7.1. Строение атмосферы Земли.

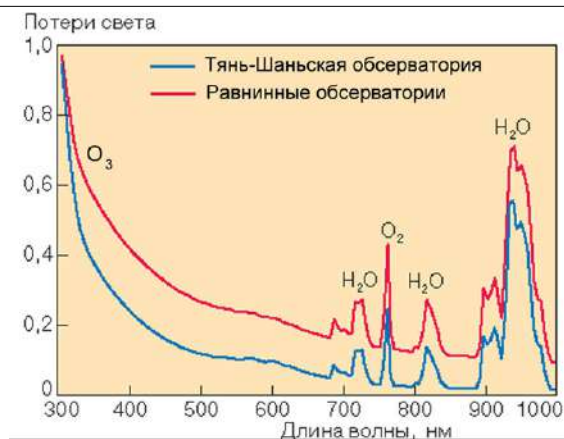


Рис. 7.2. Прозрачность атмосферы Земли.

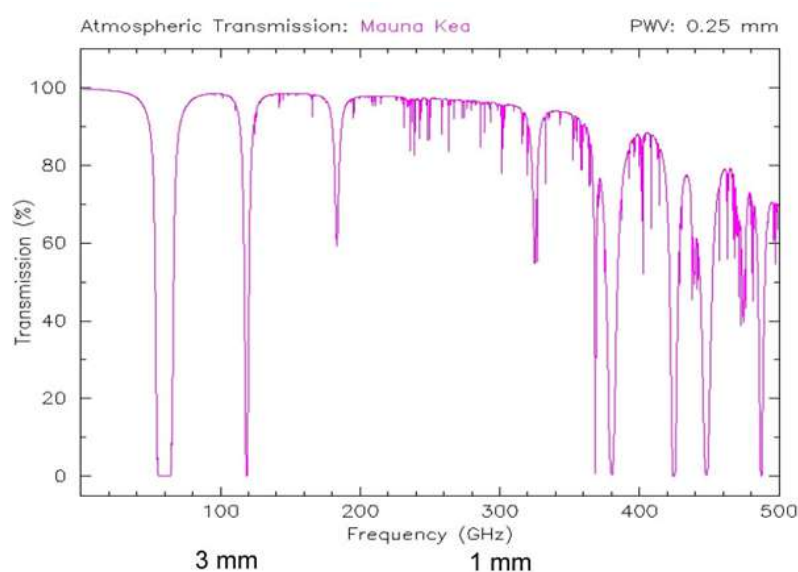


Рис. 7.3. Прозрачность атмосферы Земли в длинноволновой области.

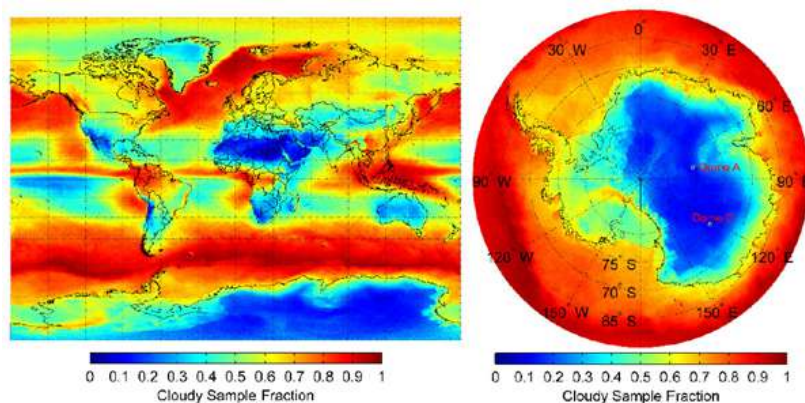


Рис. 7.4. Карта среднегодовой облачности атмосферы Земли.

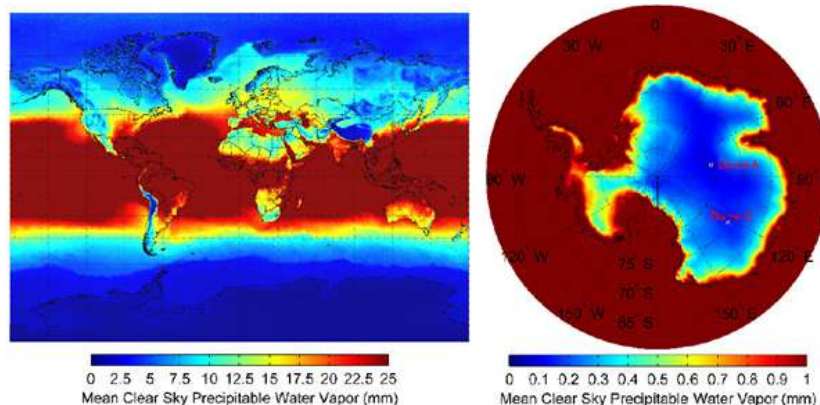


Рис. 7.5. Карта влажности атмосферы Земли.

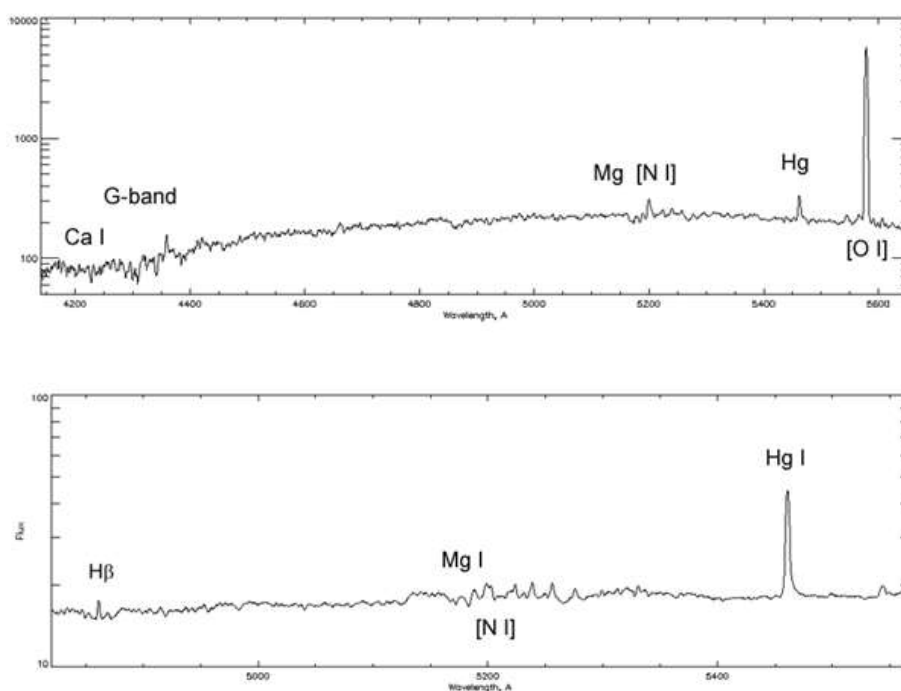


Рис. 7.6. Спектр ночного неба (БТА, 2005 г., И. Чилингарян): $4150 \div 5650 \text{ Å}$ (сверху) и $4800 \div 5550 \text{ Å}$ (снизу).

На рис. 7.6. представлен спектр ночного неба, обратим внимание на то, что линия излучения ртути в спектре присутствует из-за ртутных фонарей, которые раньше использовались.

Атмосферу в первом приближении можно представить как набор плоскопараллельных слоев воздуха со все меньшей и меньшей плотностью. Луч, идущий от звезды на границах слоев преломляется, и в итоге мы видим небесные объекты ближе к зениту, чем они есть на самом деле. Это явление носит название атмосферной рефракции (рис. 7.7). При приближении объекта к горизонту рефракция

очень быстро нарастает, у самого горизонта она достигает 35 угловых минут, а это больше размера лунного и солнечного диска. В частности, поэтому день чуть длиннее ночи, потому что видимое изображение солнца раньше восходит и позже заходит из-за рефракции. Поскольку рефракция быстро увеличивается с приближением к горизонту, нижний край круглого объекта (Луна, Солнце) значительно сильнее поднят рефракцией, чем верхний, это проявляется эффект дифференциальной рефракции. При неоднородной температуре воздуха рефракция становится причиной миража.

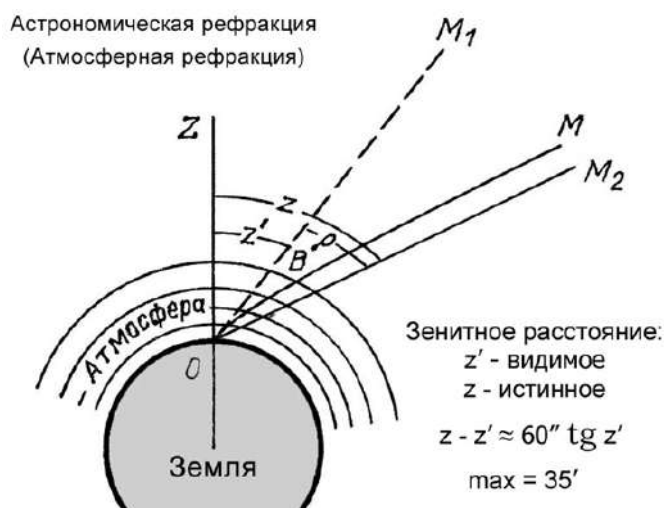


Рис. 7.7. Астрономическая рефракция.

НЛО

Как правило, многие сообщения об НЛО связаны с атмосферными явлениями. Первый интерес к НЛО начался после второй мировой войны. В России интерес вообще к внеземной жизни и в том числе к проблеме НЛО возник после публикации замечательной книги И. С. Шкловского «Вселенная, жизнь, разум».



Рис. 7.8. Кумулятивные облака, похожие на тарелки НЛО.



Рис. 7.9. Атмосферное явление, похожее на НЛО.



Рис. 7.10. Первый межзвездный объект Оумуамуа.

Первый межзвездный объект Оумуамуа был открыт 19 октября 2017 г. телескопом Pan-STARRS 1 (Гавайи) через 40 суток после прохождения перигелия.

ЛЕКЦИЯ 10. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. ФОТОМЕТРИЯ

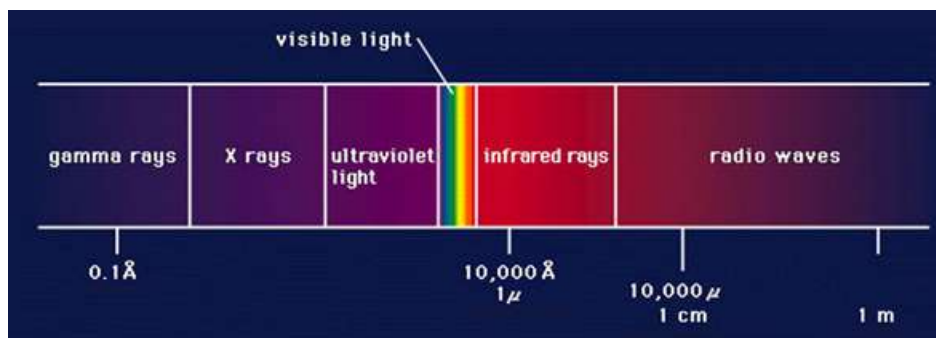


Рис. 8.1. Электромагнитный спектр.

Электромагнитный спектр, исследуемый в астрофизике	
Область спектра	Длина волны
Радио	$> 1 \text{ мм}$
ИК излучение	$0,76 \text{ мкм} - 1 \text{ мм}$
Видимое излучение	$390 - 760 \text{ нм}$
Близкий УФ	$310 - 390 \text{ нм}$
Далекий УФ	$10 - 310 \text{ нм}$
Рентген	$0,01 - 10 \text{ нм}$
Гамма-лучи	$< 0,01 \text{ нм}$

Рис. 8.2. Таблица длин волн, исследуемых в астрофизике.

Основные понятия

Колебание электрического заряда рождает электромагнитную волну (рис. 8.3). Пунктиром на рис. 8.3. показана диаграмма направленности излучения.

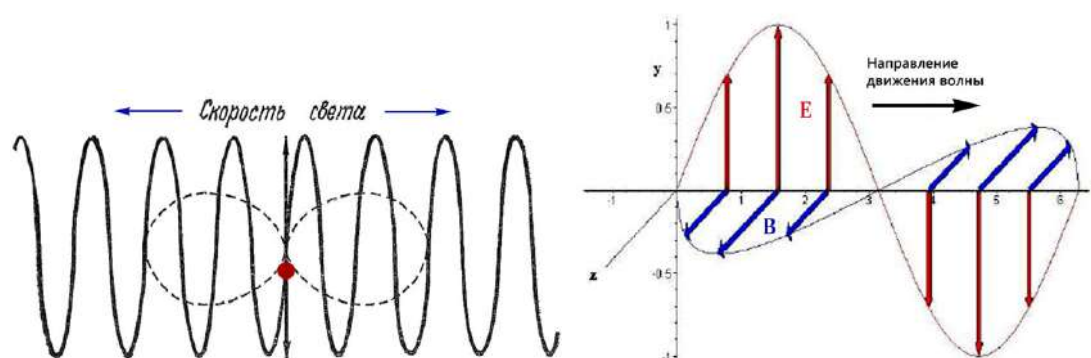


Рис. 8.3. Электромагнитная волна.

The diagram shows three transverse waves of light. The first wave, labeled 'Неполяризованный (естественный) свет' (Unpolarized (natural) light), has a circular cross-section with arrows pointing in all directions. The second wave, labeled 'Частично поляризованный свет' (Partially polarized light), has an elliptical cross-section with arrows pointing in multiple directions. The third wave, labeled 'Полностью поляризованный свет' (Fully polarized light), has a narrow elliptical cross-section with arrows pointing only in one direction.

The diagram illustrates the Bohr model of a hydrogen atom with concentric circular orbits labeled $n=1$ through $n=6$. A central red dot represents the nucleus. Three spectral series are shown as lines connecting orbits:

- Lyman series (green lines):** Transitions from $n=2, 3, 4, 5$ to $n=1$. Wavelengths are labeled: 122 nm, 103 nm, 97 nm, 95 nm, 94 nm.
- Balmer series (black lines):** Transitions from $n=3, 4, 5, 6$ to $n=2$. Wavelengths are labeled: 656 nm, 486 nm, 434 nm, 410 nm.
- Paschen series (red lines):** Transitions from $n=4, 5, 6$ to $n=3$. Wavelengths are labeled: 1875 nm, 1282 nm, 1094 nm.

Labels for the series are placed to the right of the diagram: "Lyman series" (green), "Balmer series" (black), and "Paschen series" (red).

Фотон (квант электромагнитного излучения) – уникальная безмассовая частица, движущаяся со скоростью $c = 299792458 \text{ м/с}$, энергия которой $E = h\nu = hc/\lambda$, где постоянная Планка $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.

$$1 \text{ эВ}, 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}.$$

Кванту с энергией в 1 эВ соответствует длина волны $\lambda = 12399 \text{ \AA} = 1240 \text{ нм} = 1,24 \text{ мкм}$ и частота $\nu = 2,18 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$.



Рис. 8.6. Прохождение электромагнитных волн через атмосферу.

Поток — это количество лучистой энергии, проходящей за единицу времени через данную поверхность (например, объектив телескопа), иными словами это мощность световой энергии. Единица измерения потока: Вт.

Освещенность — это плотность светового потока, т.е. световой поток, приходящийся на единицу площади освещенной поверхности. Единицы измерения освещенности:

- Интегральная освещенность — $\text{Вт}/\text{м}^2$
- Монохроматическая освещенность — $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ Гц})$ или $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ мкм})$
- В радиоастрономии — $1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ Гц})$

Интенсивность — это плотность потока излучения, создаваемого элементом среды в данном направлении:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega d\sigma}.$$

Яркость — это плотность потока с элемента поверхности в данном направлении:

$$B = \frac{d\Phi}{d\omega dS \cos \theta}.$$

Светящееся тело создаёт в месте наблюдения на нормальной площадке освещённость, равную его средней яркости, умноженной на телесный угол, под которым оно видно на небе:

$$E_A = \frac{d\Phi}{r^2 d\omega} = B \frac{dS \cos \theta}{r^2} = \frac{B d\sigma}{r^2} = B d\Omega.$$

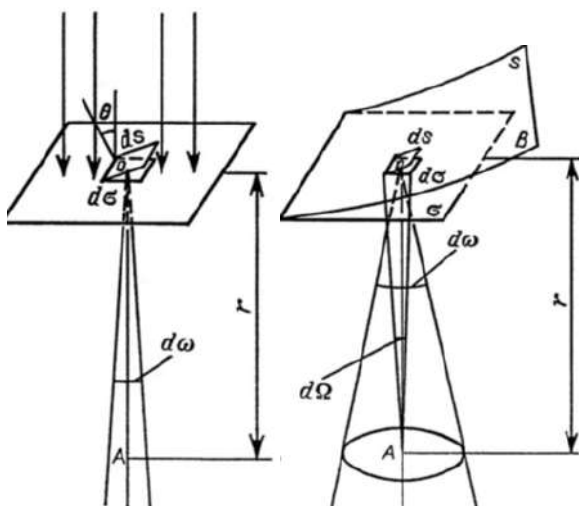


Рис. 8.7. Иллюстрации к определениям интенсивности, яркости и освещенности.

Звездные величины

Идея разделять звезды на несколько групп по яркости (астрономы говорят – «по блеску») принадлежит древнегреческому астроному Гиппарху (II век до н. э.). Все видимые глазом звёзды он разделил на 6 классов от 1-й до 6-й звёздной величины. Самые яркие обозначены как 1^m , а самые тусклые (астрономы говорят – «слабые») обозначены как 6^m . Индекс m происходит от латинского magnitude – величина.

Измерения английского астронома Нормана Погсона, проведенные в XIX веке, показали, потоки света от соседних звездных величин отличаются примерно в 2,5 раза, а разность в 5 звездных величин соответствует отношению освещенностей около 1 к 100. Погсон предложил за основание шкалы принять значение $\sqrt[5]{100} \cong 2,512$.

Формула Погсона:

$$m_2 - m_1 = -2,5 \lg(E_{m2}/E_{m1}).$$

Отношение освещенностей двух звезд:

$$E_{m1}/E_{m2} = (2,512 \dots)^{-(m_1-m_2)}.$$

Звездные величины могут быть и целыми, и дробными, и даже отрицательными (если светило очень яркое).

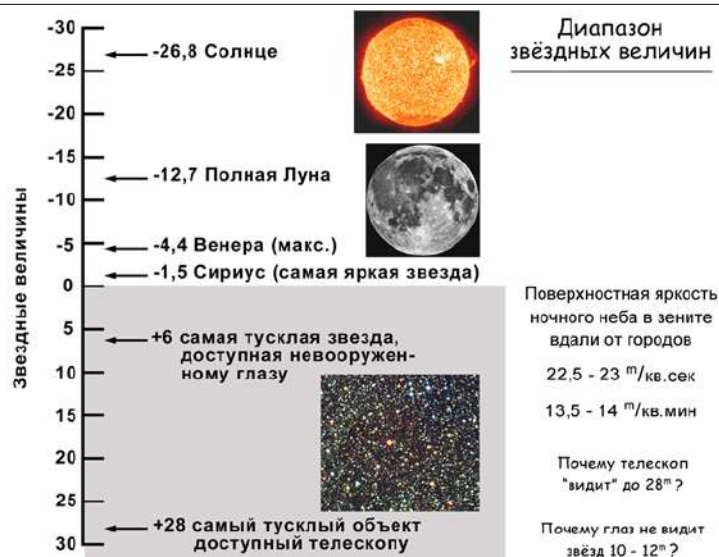


Рис. 8.8. Диапазон звездных величин.

Шкала	Интервал	Запись	Выражение
exp	степень экспоненты	$n \text{ exp}$	e^n
dex	степень десяти	$n \text{ dex}$	10^n
B	бел	$n \text{ B}$	10^n
dB	децибел	$n \text{ dB}$	$10^{0,1n}$
mag	звездная величина	$n \text{ mag}$ или n^m	$10^{-0,4n}$

Рис. 8.9. Логарифмические шкалы.

Наша неявная склонность к логарифмическому представлению чисел имеет глубокое физиологическое обоснование: оказывается, наши органы чувств пользуются логарифмическими шкалами. Впервые это заметил французский физик Пьер Бугер (1698-1758): глаз фиксирует относительное различие яркости поверхностей. В виде правила это сформулировал немецкий физиолог Эрнст Вебер (1795-1878), изучавший мышечную и кожную чувствительность. В 1830-34 гг. он установил, что мы воспринимаем не абсолютное, а относительное изменение силы раздражителя. Например, если в руке у вас гирька весом в 10 г, то вы уверенно ощущаете добавку к ней еще такого же веса, но если вы держите вес в 10 кг, то добавление к нему 10-граммовой гирьки вы не ощутите. Позже это подтвердилось и для других органов чувств: зрения, слуха, вкуса. В 1858 г. немецкий физик и психолог Густав Фехнер (1801-1887) сформулировал это математически:

$$S = a \lg I + b,$$

где S — интенсивность ощущения, I — сила раздражителя, a и b — константы.

Психофизический закон Вебера-Фехнера:

1. Ощущение пропорционально логарифму раздражения;
2. Если раздражение меняется в геометрической прогрессии, то ощущение – в арифметической.

Видимые звездные величины обычно пересчитывают в абсолютные. Абсолютная звездная величина – это реальная мощность излучения данного объекта.



Рис. 8.10. Абсолютная звездная величина.

Спектры

Мы привыкли, что цвет несёт информацию о свойствах объекта, астрономы тоже пользуется цветом. Обычно газы или электроны в твердом теле движутся хаотически, какие-то быстро, какие-то медленно; цветом мы называем преобладающую энергию квантов. Когда тонко анализируем это распределение, говорим о спектре, то есть о детальном распределении интенсивности излучения вдоль длины волны.

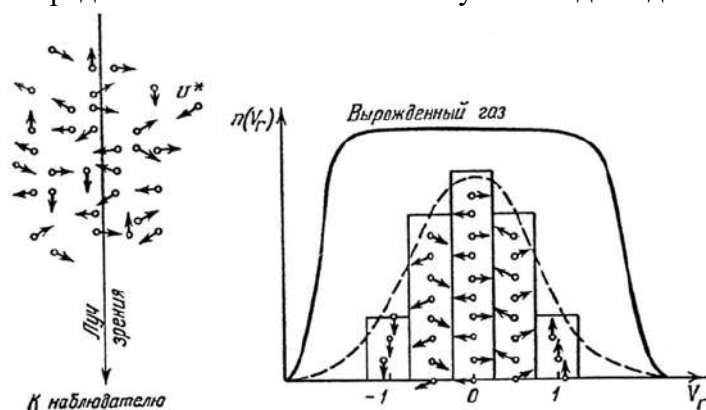


Рис. 8.11. Распределение частиц газа по скорости.

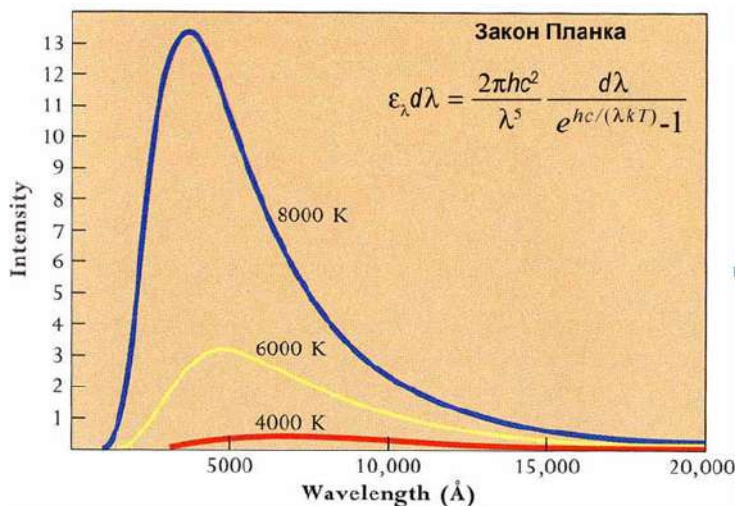


Рис. 8.12. Излучение абсолютно черного тела.

Закон Планка:

$$\varepsilon_{\lambda} d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{e^{hc/\lambda kT} - 1};$$

Закон Вина:

$$\lambda_{max} = \frac{3 \text{ мм}}{T};$$

Закон Стефана-Больцмана:

$$\varepsilon = \sigma T^4,$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-4}$.

Рассмотрим, как астрономы получают спектр, чтобы анализировать излучения звезд. Самый простой способ – перед объективом телескопа поставить призму, тогда все изображения звезд превратятся в маленькие полоски спектра (рис. 8.13). На одной фотографии мы получаем очень много информации о каждой яркой звезде, однако получаемые спектр плох. Конечно, лучше получать спектры с помощью окулярной спектрографии (рис. 8.14). Кроме как призмой свет можно расщепить дифракционной решеткой (рис. 8.15). К сожалению дифракционная решетка распределяет свет на многочисленные порядки спектров. Для физика в лаборатории это не страшно, он может сделать яркий источник света, найти тот порядок, который его удовлетворяет и изучать его, проигнорировав все остальные. Для астронома это беда, так как мы итак получаем мало света от небесных объектов.

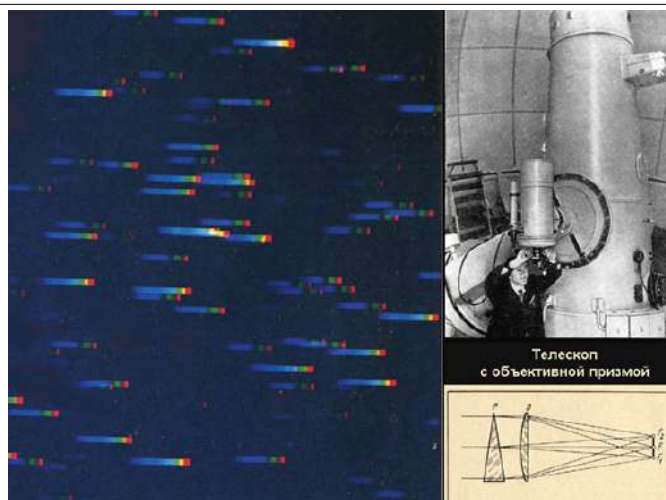


Рис. 8.13. Телескоп с объективной призмой.

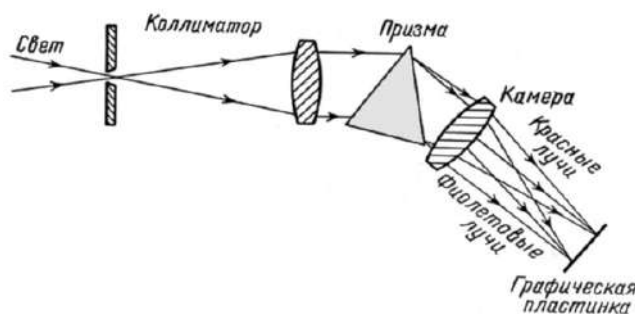


Рис. 8.14. Прибор окулярной спектрографии.

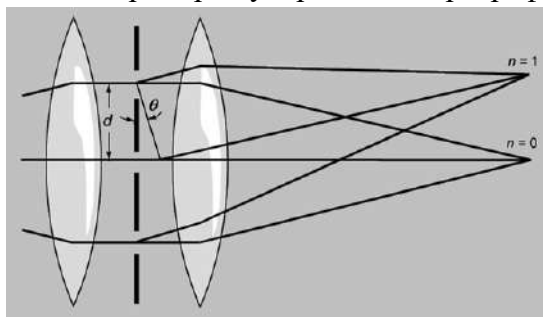


Рис. 8.15. Дифракционная решетка.

Горячее непрозрачное тело излучает свет, в котором присутствуют все цвета, его спектр непрерывный. Горячий газ излучает кванты нескольких фиксированных энергий в зависимости от химического состава газа (рис. 8.16).

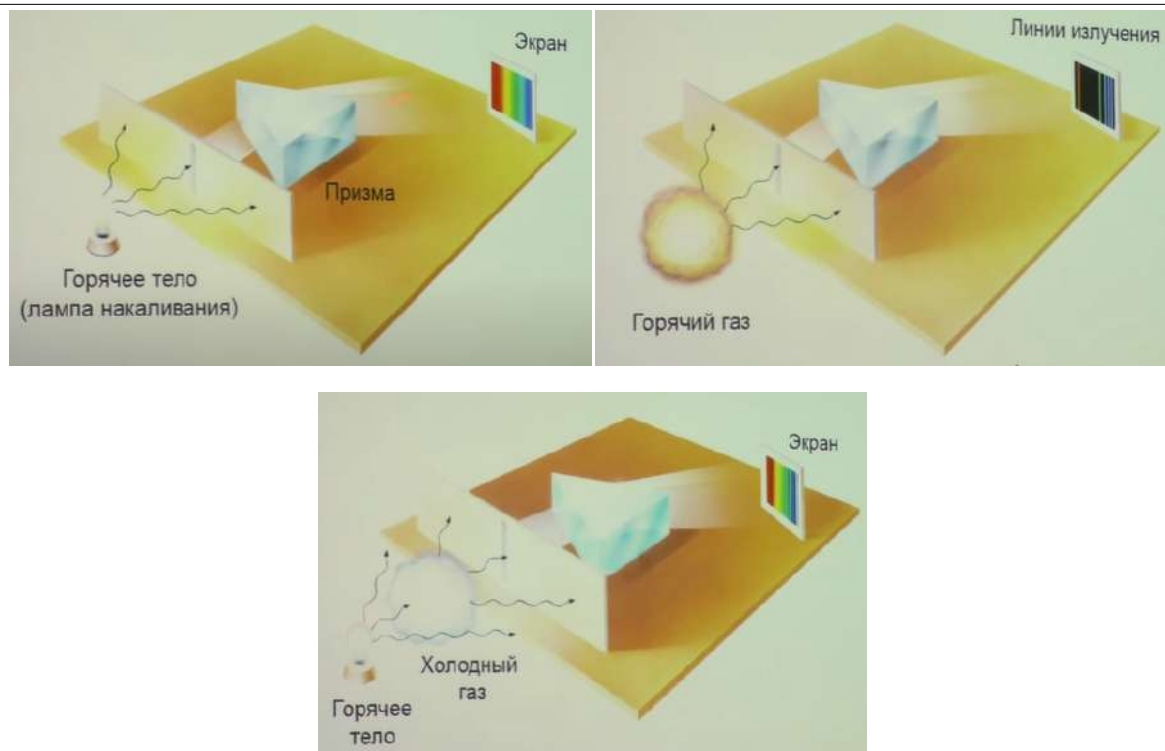


Рис. 8.16. Результат работы спектрографа для различных источников.

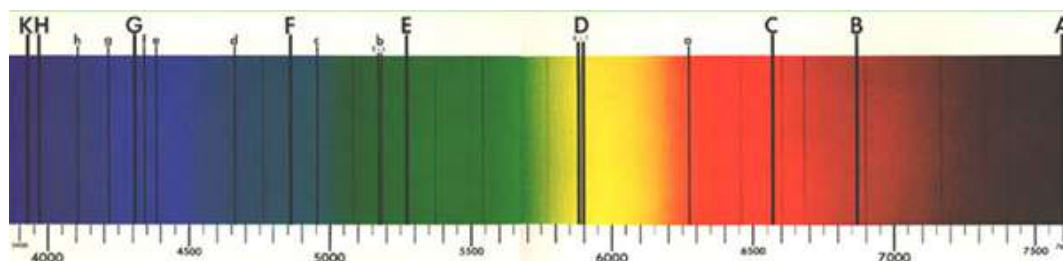


Рис. 8.17. Оптический спектр типичной звезды.

Спектр в частности несет информацию о движении небесного объекта. Эффект Доплера позволяет нам измерять скорости движения оптических источников. При удалении источника линии в его спектре смещаются в красную область, то есть их длина волны увеличивается, при приближении – в синюю область. Орбитальное движение звезд вызывает периодическое смещение линий в спектрах.

Общая форма спектральной линии говорит о движении атомов. Согласно эффекту Доплера, чем шире линия, тем выше температура газа. Однако это не всегда верно, бывают и другие эффекты, влияющие на толщину спектральной линии. Рассмотрим, например, спектры трех звезд: Солнца, белого карлика и голубого гиганта. Эти объекты имеют примерно одинаковую температуру, разница между ними заключается в плотностях атмосферы. Заметим, что одни и те же спектральные линии у гиганта тоненькие, а у карлика широкие и размытые. В процесс формирования спектра

вмешалась взаимная близость атомов. У гиганта разреженная атмосфера, атомы летают сами по себе далеко друг от друга и никак не меняют энергетические уровни соседа. У карлика атмосфера плотная, атомы расположены близко друг другу, поэтому энергетический портрет каждого из них немного изменяется.

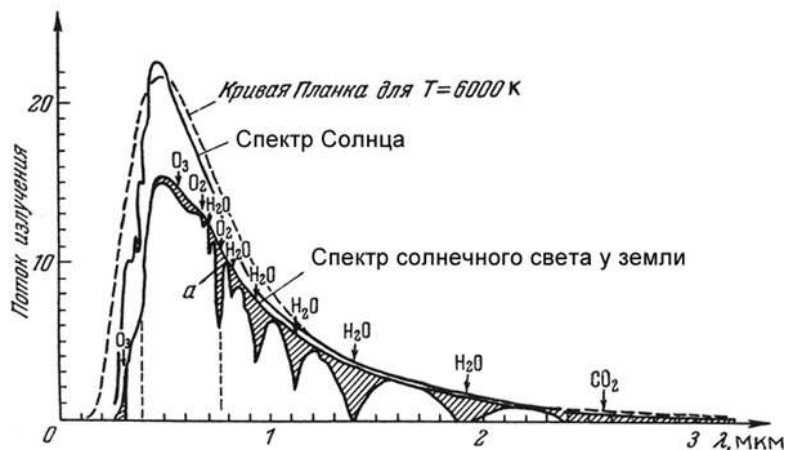


Рис. 8.18. Спектр Солнца.

Астрономы работают по тому же принципу, что и человеческое зрение (рис. 8.19), желая получить цветную информацию об объекте мы фотографируем его через три светофильтра (рис. 8.20).

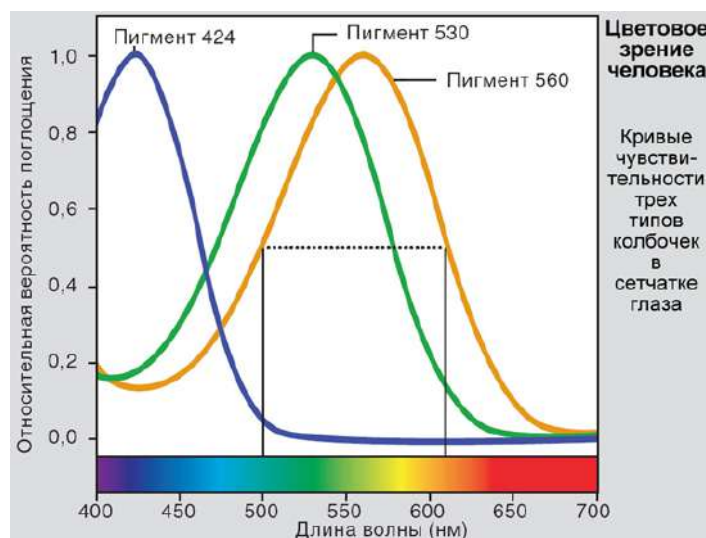


Рис. 8.19. Цветовое зрение человека.

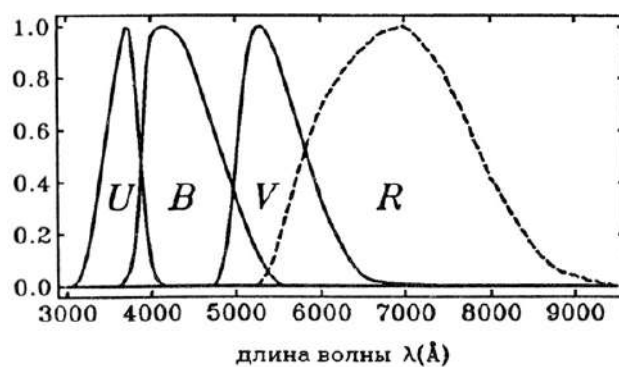


Рис. 8.20. Кривые реакции системы UBV Джонсона.

ЛЕКЦИЯ 11. ОПТИКА

Задачи и инструменты оптики

Задачи оптики:

1. Различать мелкие детали
2. Заметить тусклые объекты

Способы управления светом:

1. Ограничивать (экран, камера-обскура)
2. Отражать (зеркало)
3. Преломлять (линза, призма)
4. Дифракционная решетка

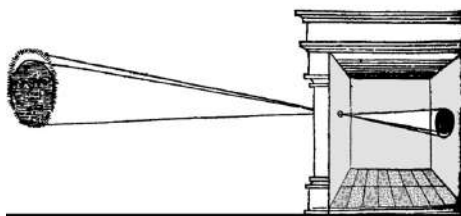


Рис. 9.1. Камера-обскура.

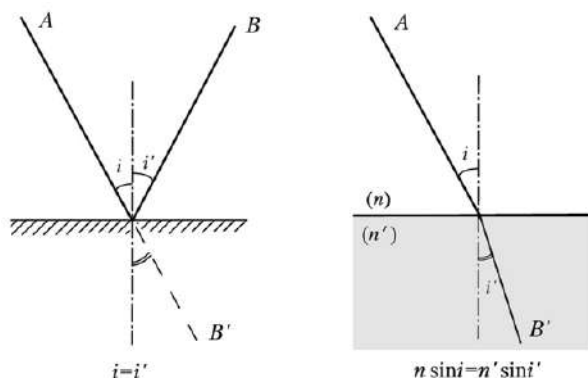


Рис. 9.2. Отражение и преломление светового луча.

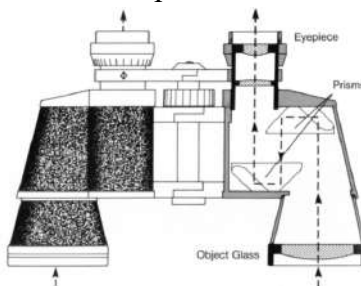


Рис. 9.3. Схема бинокля.

Тонкие линзы:

- выпуклые

- двояковыпуклая
- плосковыпуклая
- выпуклый мениск
- вогнутые
 - двояковогнутая
 - плосковогнутая
 - вогнутый мениск

Аберрация

Школьный учебник нам говорит, что линза собирает параллельные лучи в точке фокуса на плоском экране на фокальной плоскости. Однако природа устроена немного сложнее, все, что отличается от простого представления называется аберрацией.

Оптическая аберрация – искажение изображения, построенного объективом оптического прибора. (Не путать с аберрацией света – кажущееся смещение направления на светило, вызванное движением наблюдателя.)

Виды аберрации в зависимости от причины и характера искажений:

- хроматическая
- сферическая
- кривизна поля
- астигматизм
- дисторсия
- кома

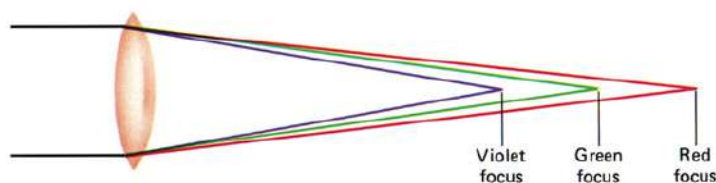


Рис. 9.4. Хроматическая аберрация простой линзы.

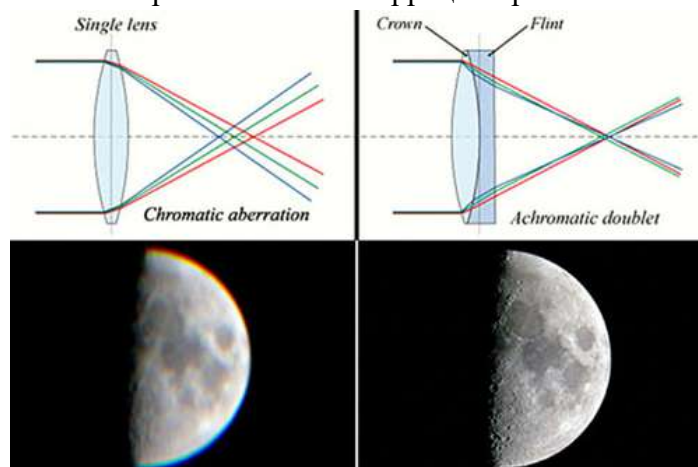


Рис. 9.5. Борьба с хроматической аберрацией.

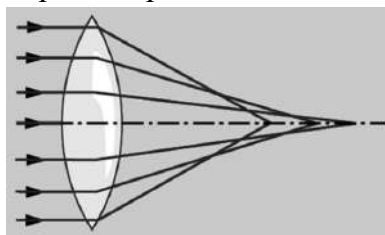


Рис. 9.6. Сферическая аберрация.

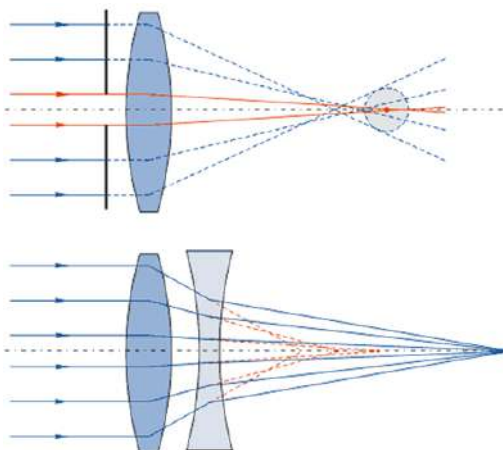


Рис. 9.7. Борьба со сферической аберрацией.

У зеркала не может быть хроматической аберрации (лучи любого цвета отражаются одинаково), но сферическая аберрация возможна (рис. 9.8). Лучи соберутся точно в точке излучения, если она лежит в центре кривизны сферы, но этот случай не интересен на практике. Нам надо, чтобы издалека пришедшие параллельные лучи собрались в одной точке, сфера этого не даёт, лучи от разных частей зеркала, отразившись, соберутся в разных фокусах, это и есть сферическая аберрация сферического зеркала. А вот параболоид обладает замечательным свойством, если лучи приходят параллельно оси симметрии параболоида, то они все соберутся в одной точке. Но если они приходят под углом к оптической оси, то уже появляются внеосевые аберрации. Поэтому телескопы в основном имеют главные зеркала параболической формы, поле зрения которых ограничено очень маленькой площадкой на небе. Астигматизм и кома являются внеосевыми аберрациями.

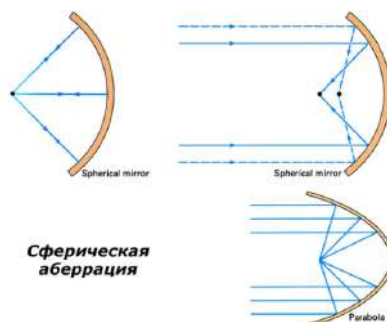


Рис. 9.8. Сферическая абберация сферического зеркала.

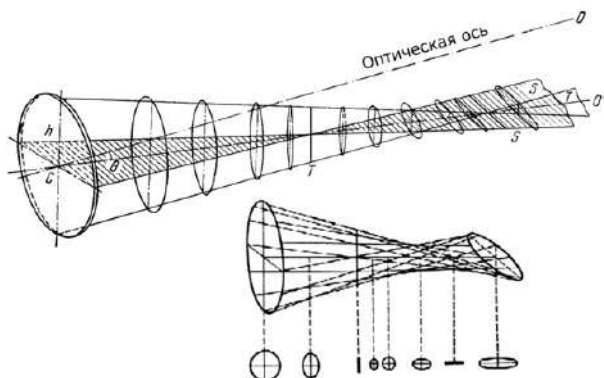


Рис. 9.10. Астигматизм.

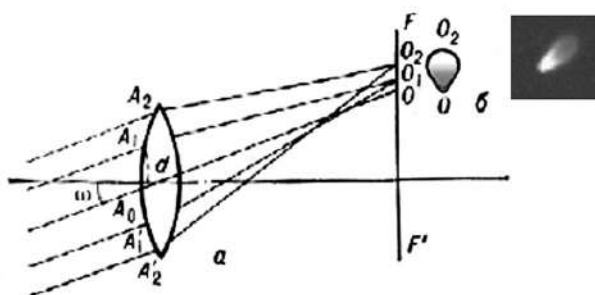


Рис. 9.11. Кома.

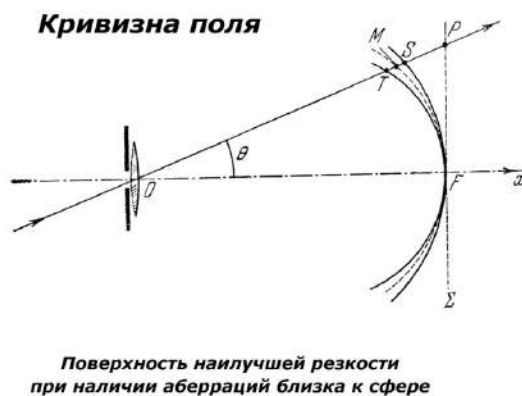


Рис. 9.12. Кривизна фокальной плоскости.

Дисторсия (проблема проекции сферы на плоскость)

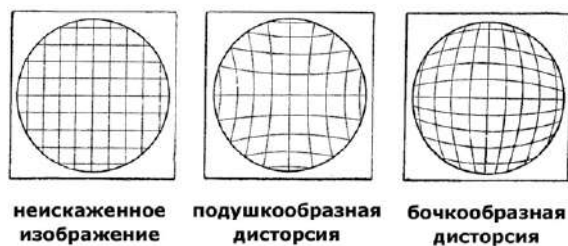


Рис. 9.13. Дисторсия.

Из-за большого количества разных аберраций приходится делать много линзовые объективы со множеством свободных параметров, чтобы оптик смог подбором разных параметров компенсировать недостатки (рис. 9.14).

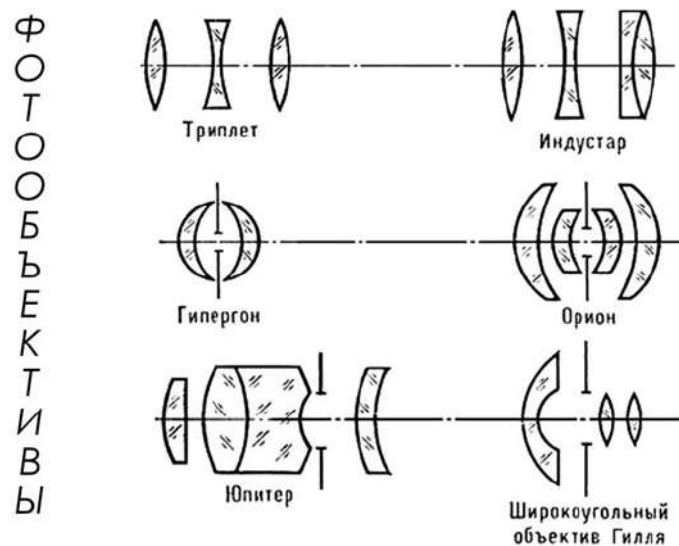


Рис. 9.14. Фотообъективы.

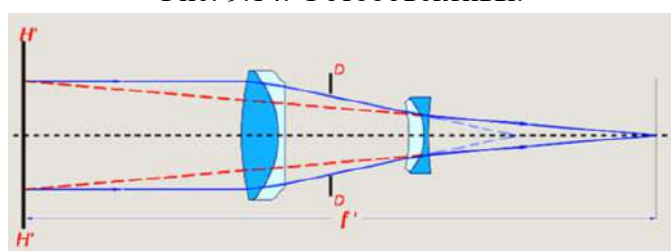


Рис. 9.15. Телескопический объектив.

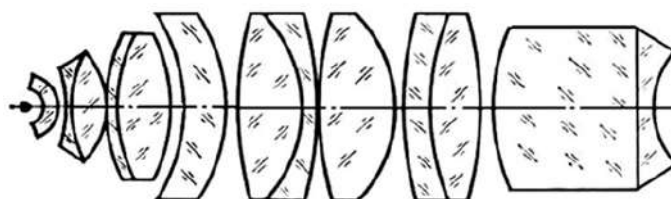


Рис. 9.16. Объектив микроскопа.

Фотограф, как правило, отвернёт поле зрения своего объектива от яркого источника, чтобы избежать бликов. Однако луч Солнца сбоку всё равно может попасть на переднюю линзу, часто от бликов спасает бленда.

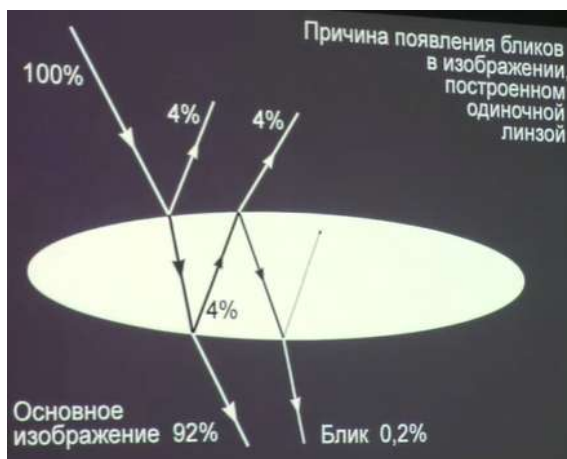


Рис. 9.17. Причина появления бликов.

Виньетирование — ограничение наклонных пучков света оправой или диафрагмой оптической системы, приводящее к ослаблению потока лучей, проходящего под углом к оптической оси. В результате снижается яркость изображения от центра к краям кадра, особенно заметно по углам кадра.



Рис. 9.18. Виньетирование.

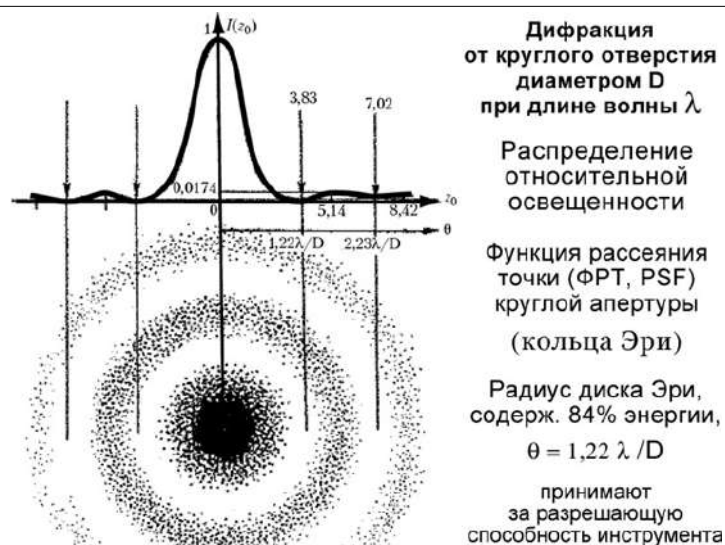


Рис. 9.19. Дифракция.

Атмосфера портит изображение, например, на рис. 9.20 представлены фотографии Альфа Близнецов (сложная звезда, имеющая несколько компонентов).

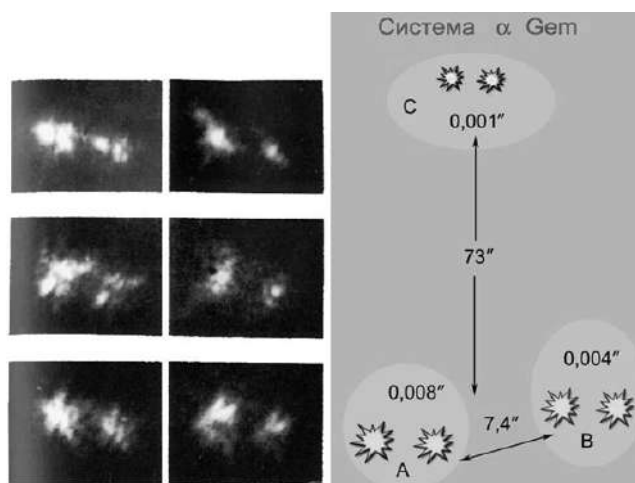


Рис. 9.20. Изображение системы α Gem.

Французский астроном оптик А. Лайбери впервые стал продвигать методы спекл-интерферометрии. Он предложил получить много-много изображений объекта и утверждал, что в них всё равно сохраняется информация о структуре этого объекта, которую можно извлечь с помощью Фурье-преобразования.

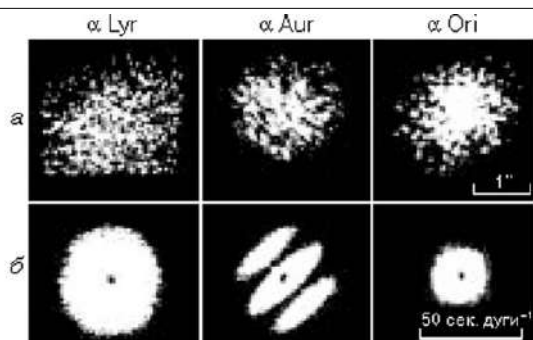


Рис. 4. Спекл-изображения (а) и спектры мощности (б) неразрешаемой звезды α Lyr, двойной звезды α Aur и звезды α Ori с разрешаемым диском (фотографии заимствованы из кн.: Токовинин А.А. Звездные интерферометры. М.: Наука, 1988)

Рис. 9.21. Спекл-интерферометрия.

Адаптивная оптика

Адаптивная оптика – это изобретение последних двух десятилетий, реализовать его удалось только с появлением хороших быстрых компьютеров (рис. 9.23). Плоский волновой фронт от далекой звезды, проходя через атмосферу искажился, поэтому изображение звезды будет размытым. Что мы можем этому противопоставить? Собранный телескопом свет отправляем на мягкое зеркало с регулируемой поверхностью и анализируем отражённый свет. Ставим полупрозрачную пластинку, половину света пропускаем в фотокамеру, чтобы зафиксировать изображение, а вторую половину – на анализатор волнового фронта. Анализатор представляет собой матрицу из большого количества маленьких линз, каждая из которых строит на фокальной поверхности изображение части объектива. На каждую часть объектива приходит небольшой плоский участок. Далее информация передается на компьютер, который вырабатывает управляющий сигнал и искривляет часть мягкого зеркала так, чтобы компенсировать искажения. Форму зеркала необходимо менять до 1000 раз в секунду.

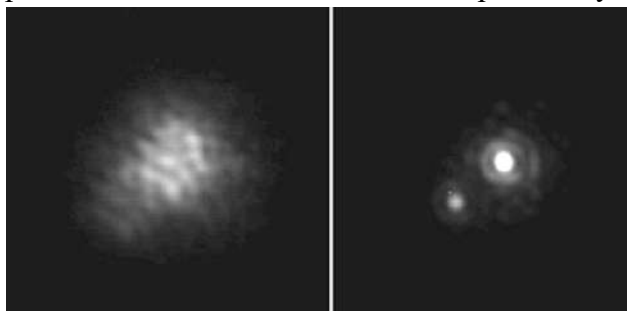


Рис. 9.22. Изображение двойной звезды, исправленное адаптивной оптикой телескопа «Субару» (Япония).

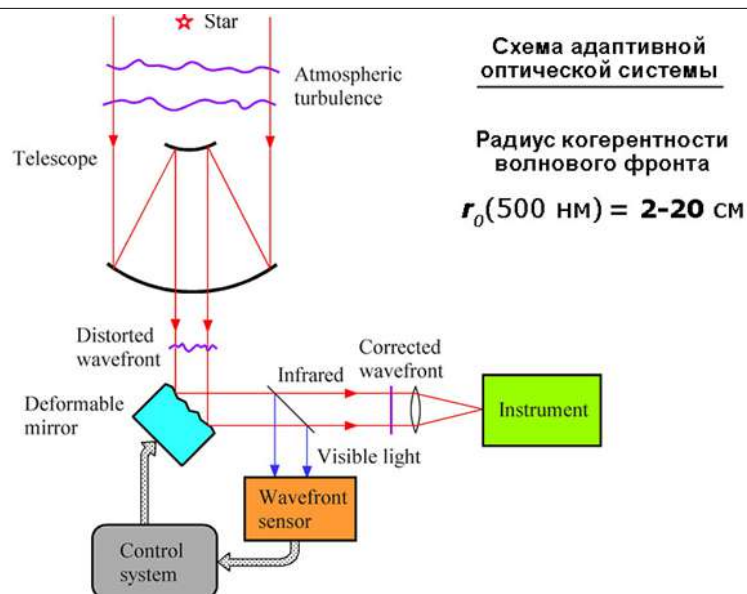


Рис. 9.23. Схема адаптивной оптики.

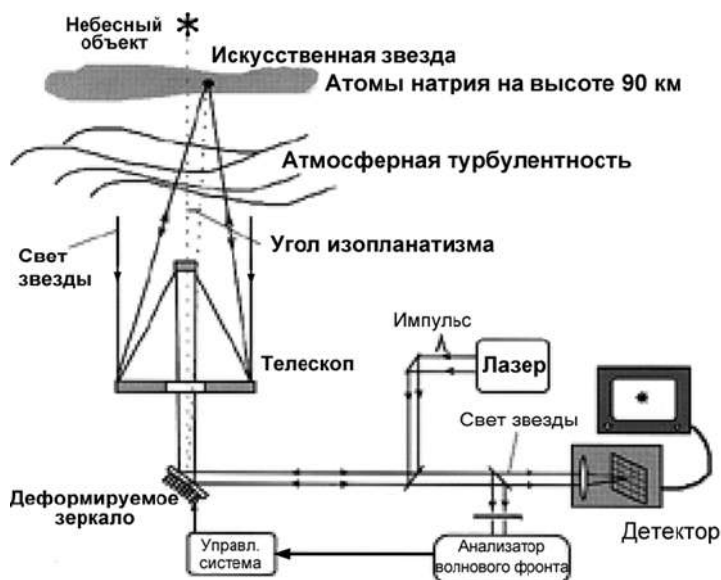


Рис. 9.24. Адаптивная оптика с использованием искусственных звезд (лазеров).

Как нам наблюдать диапазоны излучения, которые плохо проходят через атмосферу? Довольно дешёвый способ избежать атмосферного поглощения – поднять телескоп на воздушном шаре. Для этой цели также используются самолеты (КАО, SOFIA) и космические аппараты (Hubble, James Webb, Herschel, Kepler).

ЛЕКЦИЯ 12. ОПТИЧЕСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ

Не телескопическая астрономия

Не телескопическая астрономия:

- Клавдий Птолемей (II до н.э.)
- Тихо Браге (1546-1601)
- Первую карту Луны зарисовал Леонардо да Винчи (1452-1519).
- Самая точная карта Луны принадлежит Вильяму Гильберту (1540-1603).

До 1609 г. телескопа не было, и наблюдения велись глазом. Аккомодация глаза – наведение на резкость путем перемещения хрусталика (рыбы, земноводные, пресмыкающиеся) или путем изменения его кривизны (млекопитающие).

В конце XVI века от мореплавателей поступил запрос на изобретение подзорной трубы, и голландские мастера очковых стекол поняли, что нужно два стекла: одно стекло создаёт изображение далекого объекта рядом с нами, а второе подобно лупе позволяет рассмотреть детали этого изображения. Принцип телескопа: объектив создает изображение объекта, а глаз рассматривает его в лупу.

Галилей узнал, что в Голландии изобрели подзорную трубу. Но голландские подзорные трубы были очень слабыми, они обеспечивали всего лишь 2-х или 3-х кратное увеличение. В 1609 г. Галилей, основываясь идее голландской подзорной трубы, смог создать телескоп с 25-30 кратным увеличением.

Телескопы

Простейший телескоп может не иметь второй линзы (рис. 10.1). Однако использовать его неудобно, например, для 100 кратного увеличения длина трубы должна быть 25м. Именно поэтому используют окуляр, который позволяет наблюдать фокальную плоскость с расстояния не 25 см, а 0,5 см. Кроме того роль окуляра заключается в том, что он сжимает поток света, пришедший на объектив, и направляет усиленный поток в зрачок вашего глаза.

Простейший телескоп

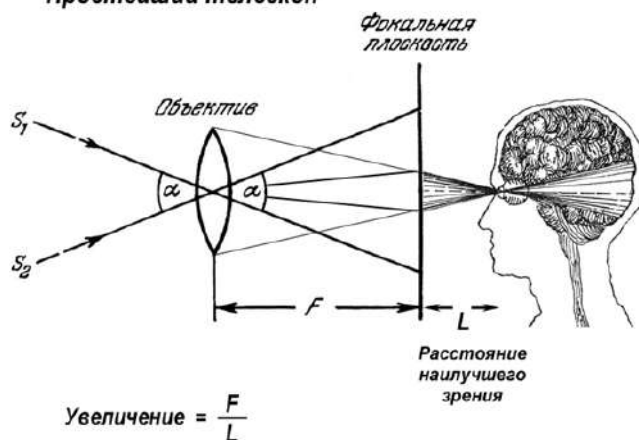


Рис. 10.1. Простейший телескоп.

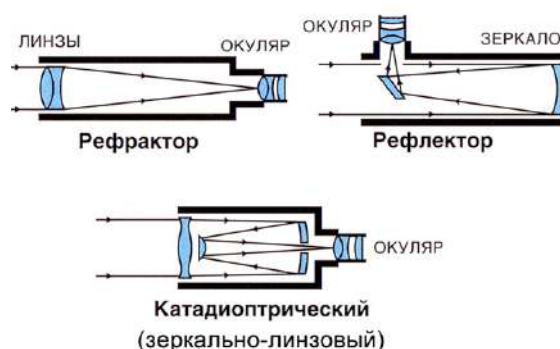


Рис. 10.2. Типы телескопов.

Первые телескопы были только рефракторами и использовали всего одну линзу, чтобы избежать абберации делали очень длиннофокусные трубы. Многие астрономы даже после изобретения Галилея не пользовались линзовой оптикой, они предпочитали старые надежные квадранты, как у Тихо Браге.

Первым человеком, который доказал пользу линзового телескопа, был Оле Ремер, он наблюдал движение спутников Юпитера и таким образом очень точно измерил скорость света, у него получилось около 200 тысяч километров в секунду.

Китайские астрономы уперлись и до XIX века не использовали телескопы, их астрономия стремительно скатилась и потеряла всякий авторитет.

Хорошие оптические телескопы астрономы стали использовать с конца XVII века, и тогда же появились государственные обсерватории, первыми были Гринвичская, Парижская и Ленинградская обсерватории.

В начале XIX века к нам приехал Вильгельм Струве, он построил Пулковскую обсерваторию и принес нам европейскую традицию астрономических измерений.

Первым человеком, который доказал всем профессионалам пригодность зеркального телескопа, был Вильям Гершель. Он был музыкантом, увлеченным астрономией. Он не мог купить или сделать самостоятельно линзовый телескоп, поэтому стал полировать зеркала и создавать качественные зеркальные телескопы. Другим любителем астрономии, увлекшимся идеей создания зеркального телескопа, был богатый лорд Росс. Он с помощью помощников механиков сделал зеркальной телескоп Ньютона диаметром почти два метра.

С появлением фотографии потребности астрономов изменились, теперь уже нельзя было рывками поворачивать телескоп, поскольку фотопластинки были очень слабо чувствительны к свету. Экспозиции достигали часов иногда даже десятков часов, надо чтобы телескоп равномерно сопровождал движение небесного свода, а для этого надо было уже сделать часовой механизм, который бы аккуратно со скоростью один оборот в сутки поворачивал трубу.

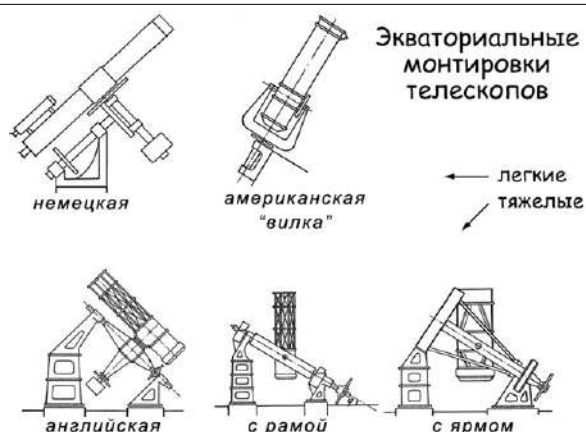


Рис. 10.3. Монтажки телескопов.

Два самых больших телескопа-рефрактора находятся в Ликской и Йорской обсерваториях (рис. 10.4).

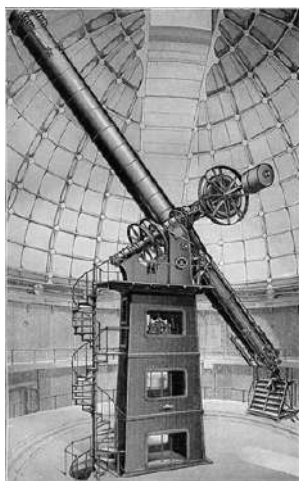


Рис. 10.4. Ликский 36-дюймовый рефрактор.

В начале XX века телескопы-рефлекторы выросли до невероятного размера, первый такой гигант с двух с половиной метровым зеркалом появился в Калифорнии в обсерватории Маунт Вилсон. Еще большего размера телескоп с диаметром объектива 5 м появился в середине XX века в Калифорнии. Это была уже такая большая машина, что астронома можно было держать не рядом с телескопом, а внутри – появилась кабина главного фокуса (рис. 10.5).



Рис. 10.5. Кабина телескопа.

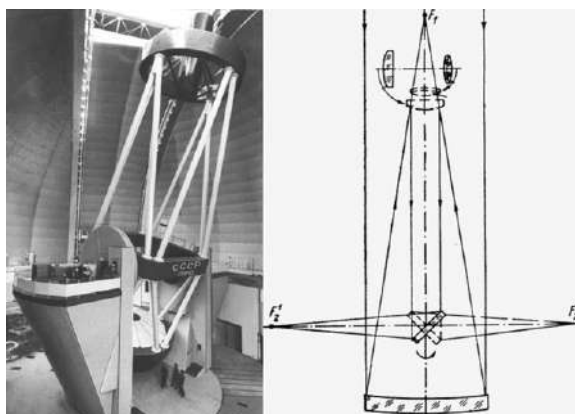


Рис. 10.6. 6-м телескоп БТА.

Качество телескопа определяется диаметром объектива и фокусным расстоянием. Чем больше диаметр объектива, тем больше света мы собираем, чем больше фокусное расстояние, тем сильнее собранный свет размазывается по фокальной плоскости, а значит яркость изображения падает. Если мы хотим получить яркое изображение, надо делать короткофокусный телескоп, но тогда качество будет плохое, сделаем длиннофокусный – качество будет хорошее, зато яркость изображения будет небольшая.

Еще одна проблема заключается в том, что чем длиннее труба, тем больше должен быть размер обсерватории, особенно купола. Он огромный, тяжелый и очень дорогой. Самый большой купол в мире имеет наш 6-метровый телескоп БТА.

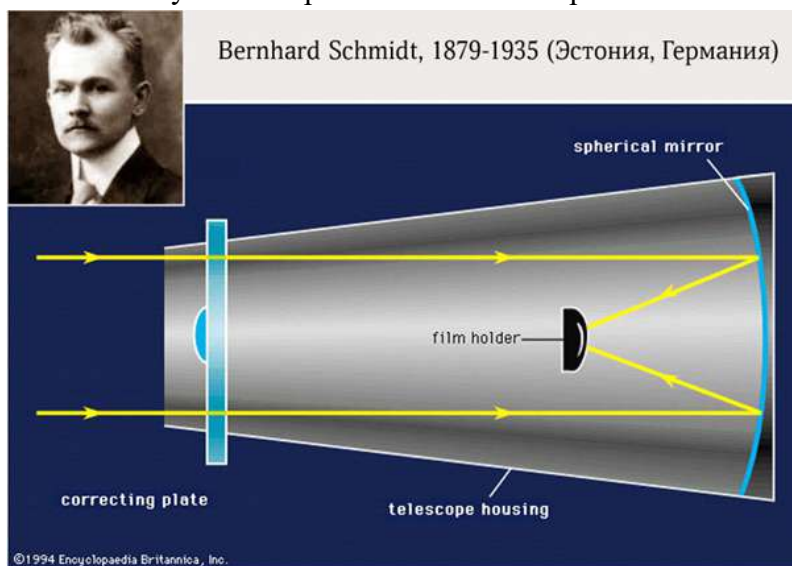


Рис. 10.7. Широкоугольный телескоп Шмидта.

Широкоугольный телескоп Шмидта впервые позволил получить фотографию всего небосвода, до этого момента астрономы получали только отдельные кусочки на небе.

Где лучше установить телескоп? Мы свои поставили в начале 50-х гг. на краю Москвы, как тогда казалось. С такой же проблемой столкнулись и другие европейские астрономы, прекрасная обсерватория недалеко от Парижа было в Медоне, а теперь она оказалась уже внутри Парижа. Первыми поняли, что надо уходить от цивилизации, американские астрономы, и Липский рефрактор поставили на горе Гамильтон.

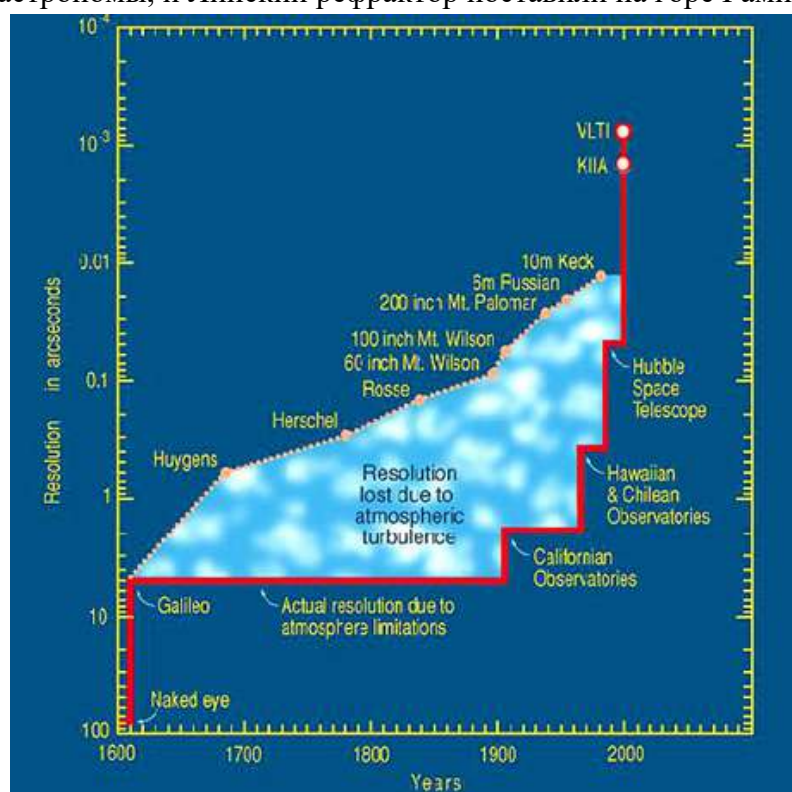


Рис. 10.8. Угловое разрешение телескопов.

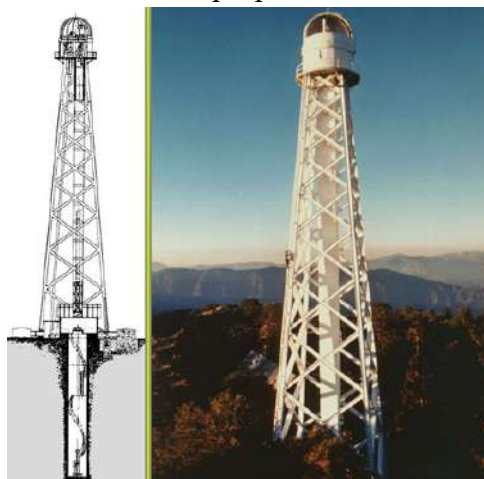


Рис. 10.9. Солнечный башенный телескоп обсерватории Маунт Вилсон (Калифорния).

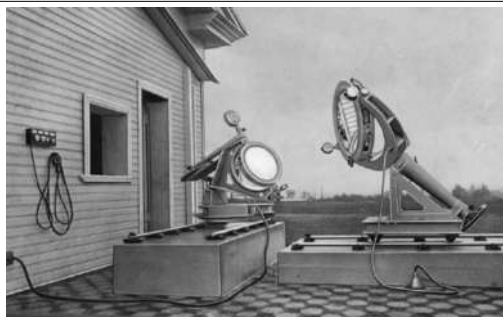


Рис. 10.10. Целоскоп.

Поскольку земля вокруг телескопа нагревается, калифорнийские астрономы придумали поставить телескоп на воде на высокогорном озере, результаты получились очень хорошие. В последствии стали строить обсерватории на островах (Европейская Северная Обсерватория Ла-Пальма на Канарских островах).

Теперь астрономы работают уже не внутри трубы, даже не внутри башни, а где-то в подсобных помещениях, где тепло, светло, или вообще управляют машиной где-то вдали по интернету.

Самая престижная обсерватория современности расположена на вершине старого потухшего вулкана Мауна-Кеа на острове Гавайи. Гигантские 10-метровые телескопы Кеск I и Кеск II весят 8 тонн (рис. 10.11). Они не зря стоят рядом друг с другом на расстоянии около 100 м, это дает им возможность объединять свой след и работать в режиме интерферометра.

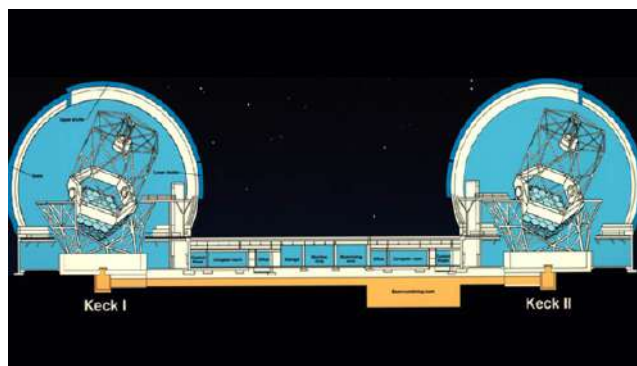


Рис. 10.11. Телескопы Кеск I и Кеск II обсерватории Мауна-Кеа.

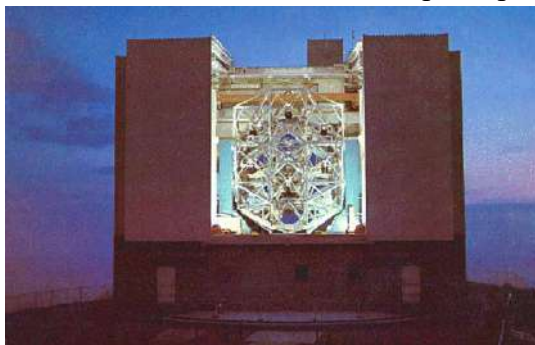


Рис. 10.12. Многозеркальный телескоп ($6 \times 1,8\text{м}$) ММТ Аризонского университета (гора Хопкинс, 1979-98 гг.).

Как изготавливают большие зеркала? Раньше нагревали стеклянную массу, она становилась жидкой, и ее выливали в большую тарелку, где она очень долго остывала. Остужать надо очень долго и равномерно, иначе зеркало может легко лопнуть. Нашли новый выход: небольшое количество жидкой массы выливают в форму, которая вращается, и центробежная сила разносит это небольшое количество массы по параболической поверхности. Отдельная проблема заключается в том, чтобы доставить большое зеркало с оптического производства на горную вершину.

Башня обсерватории – это важная вещь, которая оберегает тонкую оптику от снега, дождя, ветра и пыли, она не должна создавать дополнительных проблем при наблюдении. Внутри башни должна быть кондиционированная атмосфера. Днем яркое Солнце нагревает телескоп и главное зеркало, а ночью в горах очень быстро падает температура. Когда мы откроем отверстие в башне, хлынувшей внутрь холодный воздух начнет охлаждать элементы телескопа, особенно зеркало. Необходимо, чтобы у зеркала была ровная температура, потому что температурные флуктуации вызывают деформацию его формы. Значит надо днем внутри башни сохранять такую температуру воздуха, какая прогнозируется ближайшей наблюдательной ночью. Башня должна быть устойчива к землетрясениям, которые часты в горах.



Рис. 10.13. Сравнение монтажных телескопов Mt. Plomar и Keck I.

	Главное зеркало материал форма	Монтировка	Башня	Место	Прототип
I	стекло парабола	жесткая экваториал	полусферический купол	близ университета	2,5-м М.Вилсон 1917 г.
II	пирекс парабола ячеистая	компенсация гнутия	солнцезащитное покрытие	горы на континенте	5-м М.Паломар 1950 г.
III	ситалл гипербола Ричи-Кретьен	альт-азимутальная	высокая башня	высокие и сухие горы	3,5..4-м Чили, Аризона 1975 г.
IV	кварц тонкое, гибкое сервит диаметр до 8 м, церодур составное до алюминий 36 сегментов бериллий диам. до 11м	короткая, активная	вентиляция башни	острова в океане	4...8...10-м Гавайи и Канары 1980-90 гг.
V	Космические телескопы				

Рис. 10.14. Четыре поколения телескопов-рефлекторов.

Чтобы дешево сделать большой телескоп можно пожертвовать возможностью поворачивать его, куда хочешь, например, Hobby-Eberly Telescope (HET) вращается только по азимуту, он не может менять наклон труб (рис. 10.15).



Рис. 10.15. Hobby-Eberly Telescope (HET).

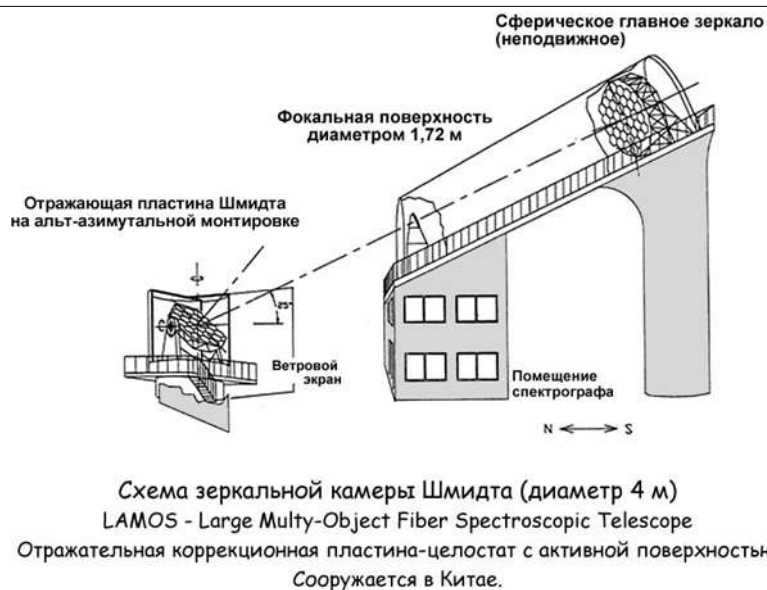


Рис. 10.16. Телескоп LAMOS (Китай).

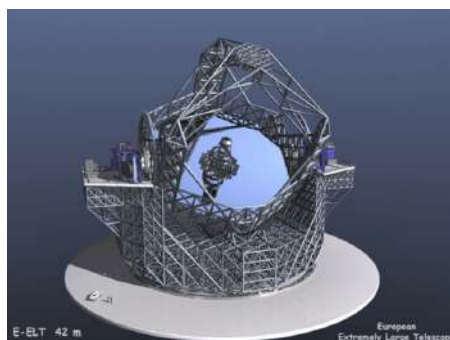


Рис. 10.17. Наибольший строящийся сегодня телескоп E-ELT.

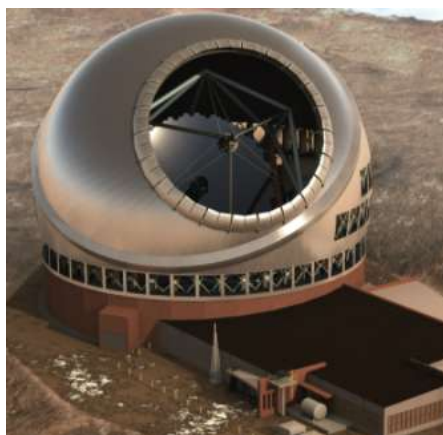


Рис. 10.18. Thirty Meter Telescope (TMT).



Рис. 10.19. Large Synoptic Survey Telescope (LSST).

ЛЕКЦИЯ 13. ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Человеческий глаз

Главным приёмником света в астрономии является наш глаз. В конце концов информация придет к нам через глаз, будем мы смотреть на экран компьютера или в окуляр телескопа. Глаз будет работать как конечный приёмник света.



Рис. 11.1. Строение человеческого глаза.

Характеристики человеческого глаза:

- Диаметр глазного яблока: 24мм
- Поле зрения: 180° по горизонтали, 140° по вертикали
- Диаметр центрального отверстия радужки (зрачка): $2 \div 8$ мм
- В сетчатке 7 млн. колбочек (цветовое зрение) и 120 млн. палочек (ч/б зрение)
- Колбочки: синие, зелёные, красные (оранжевые)
- Угловое разрешение (центральная ямка): $\sim 1''$
- Временное разрешение: $\sim 0,1$ сек

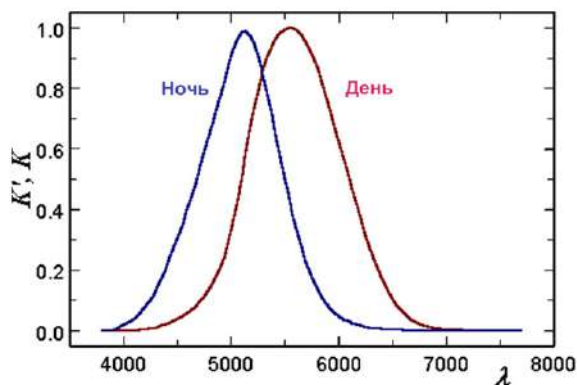


Рис. 11.2. Спектральная чувствительность человеческого глаза.

Аккомодация глаза – наведение на резкость путем перемещения хрусталика (рыбы, земноводные, пресмыкающиеся) или путем изменения его кривизны (млекопитающие).

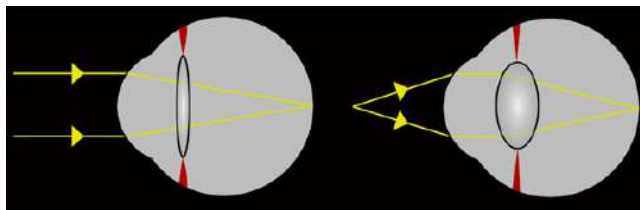


Рис. 11.3. Аккомодация глаза.

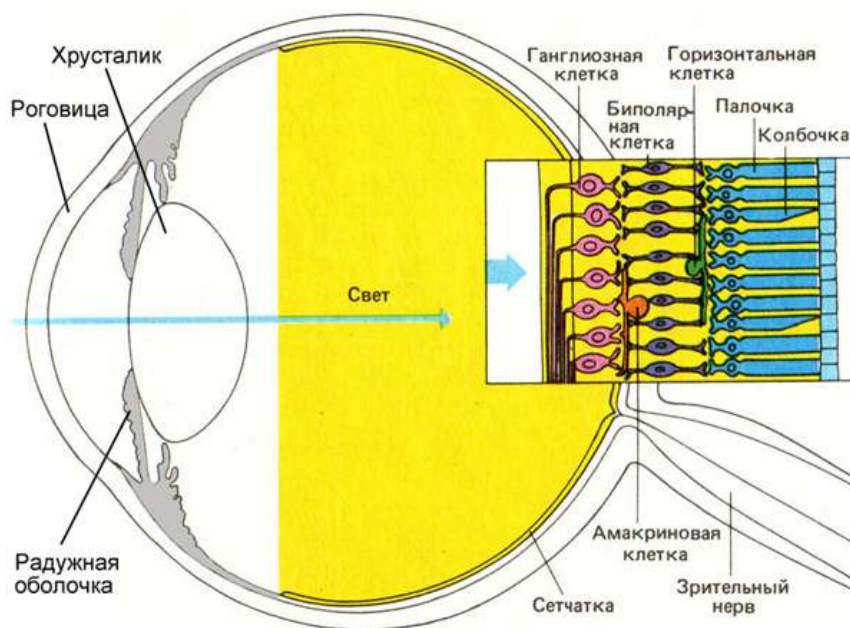


Рис. 11.4. Строение сетчатки глаза.

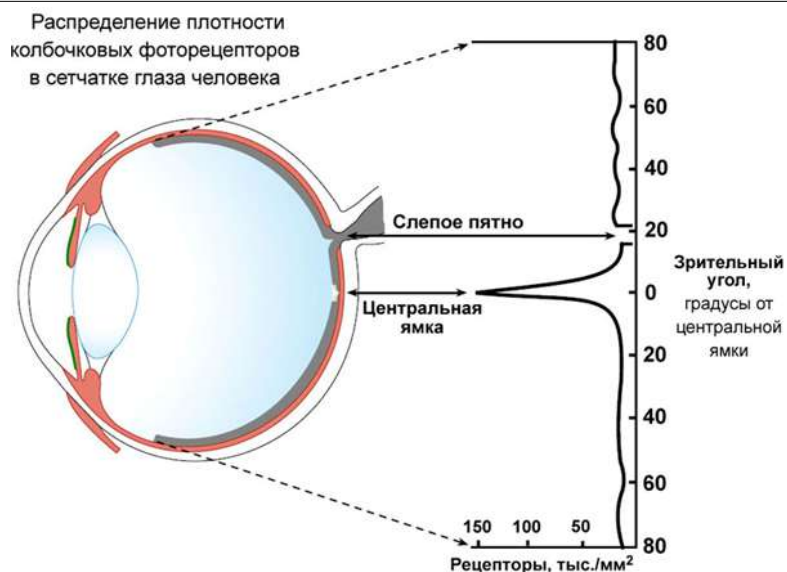


Рис. 11.5. Распределение плотности колбочковых фоторецепторов.

Ганглиозные и прочие обрабатывающие изображение клетки превращают пиксельное изображение в геометрическое, то есть некая более или менее линейная структура в изображении, которая занимает много пикселей при обработке превращается в линию, и в мозг передается информация о длине и об ориентации этой линии. Это сыграло злую шутку с астрономами, которые в конце XIX века смотрели на Марс (рис. 11.6).

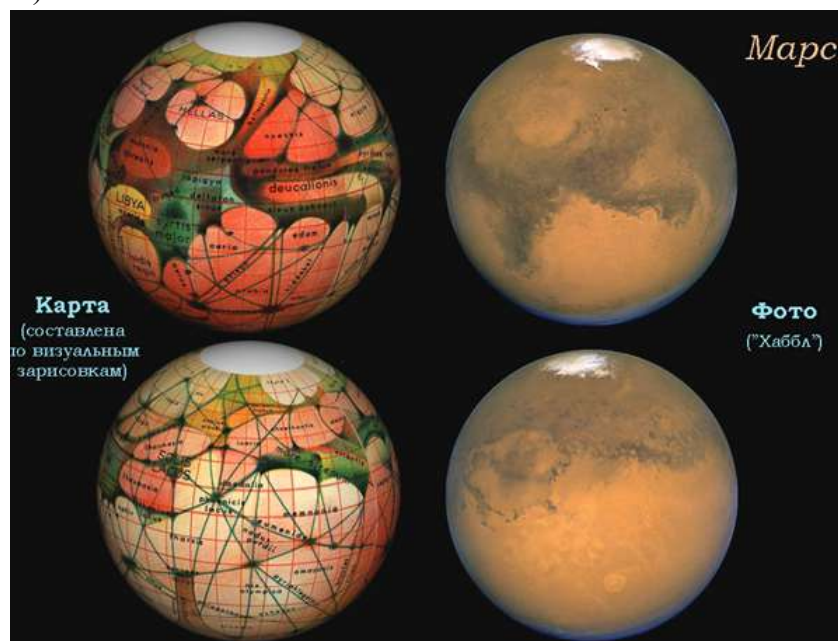


Рис. 11.6. Карта Марса, составленная по визуальным зарисовкам (слева) и фотографии Хаббла (справа).

Фотопластинки

В середине XX века придумали фотографию, то есть химический способ фиксации изображения. Фотоны попадают на кристаллики фотоэмульсии, после того, как мы сняли фотопластинку с телескопа, принесли в лабораторию и окунули в специальный раствор (проявитель), внутри фотопластинки началась химическая реакция, и кристаллики почернели. Самые лучшие пластинки для астрономов делала фирма Кодак.

Основа фотопроцесса - галогениды серебра (AgBr , AgCl ,...)



Рис. 11.7. Фотоэмульсии.



Рис. 11.8. Спектральная чувствительность фотоэмульсии.

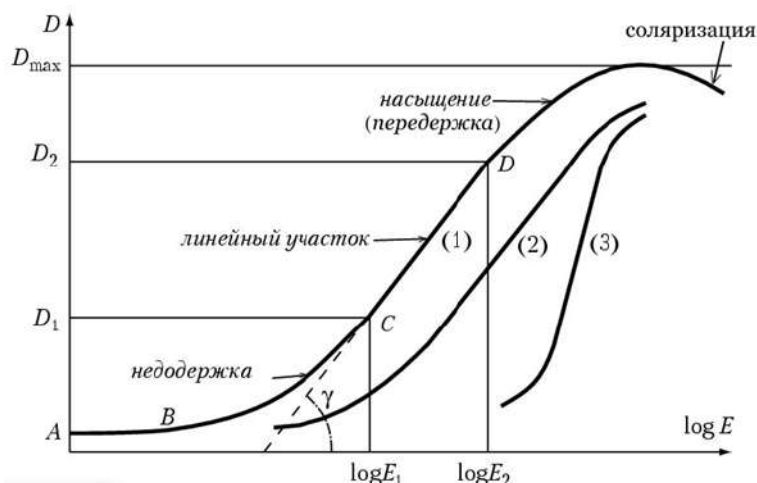


Рис. 11.9. Зависимость почернения фотопластинки от количества упавшего на нее света.

На фотопластинке изображение звезды зачастую размазано (рис. 11.10). Это, во-первых, связано с тем, что телескоп фокусирует не идеально. Но даже когда он хорошо сфокусировал, пятно остается, это происходит из-за вторичного отражения света внутри фотоэмульсии. Для борьбы с этим эффектом с обратной стороны фотопластинки стали наносить специальный противоореольный слой, который должен был поглощать вторичные лучи.

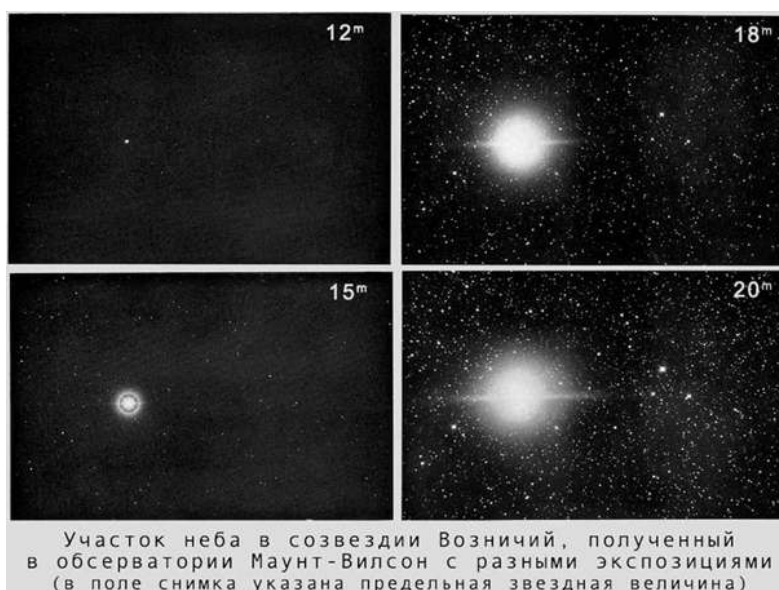


Рис. 11.10. Эффект размывания ярких звезд на фотопластинке.

Электронные приемники

Эпоха фотопластинок продолжалась почти до конца XX века, но уже в середине не XX века стали появляться первые электронные приемники. В первом приемнике появилась такая элементарная вещь как фотоэлемент. Он представлял собой

стеклянную колбочку, из которой откачан воздух, внутри два электрода, причем один из них (катод) с малой работой выхода электрона. Когда фотон падает на фотокатод, он довольно легко выбивает оттуда электрон, в цепи возникает электрический ток.

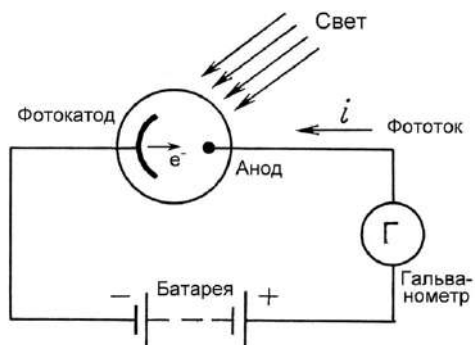


Рис. 11.11. Фотоэлемент с внешним фотоэффектом.

Ясно, что один электрон совершенно незаметен для измерительного прибора, поэтому такие фотоэлементы применяли только для ярких объектов. Для того, чтобы усилить эффект создали, так называемые, фотоэлектронные умножители (ФЭУ).

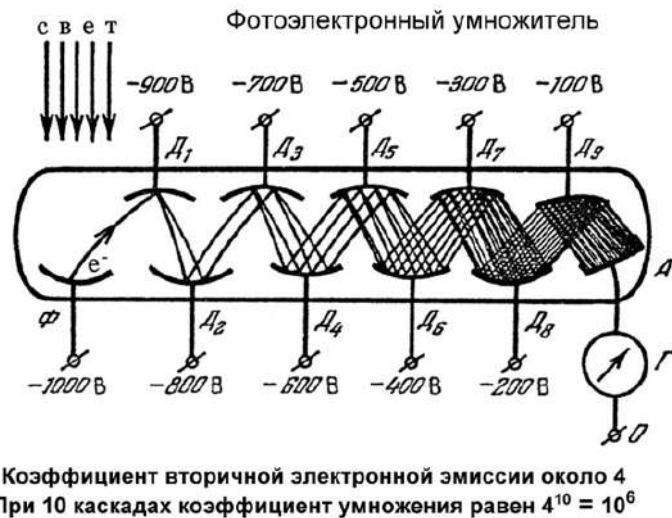


Рис. 11.12. ФЭУ.

Недостаток фотоэлектронного умножителя в том, что он считает фотоны, то есть поток света, но он не дает изображения. Для этого придумали электронно-оптический преобразователь (ЭОП), они до сих пор очень активно используются, например, в приборах ночного видения. ЭОП показывает картинку, усиливая ее яркость.

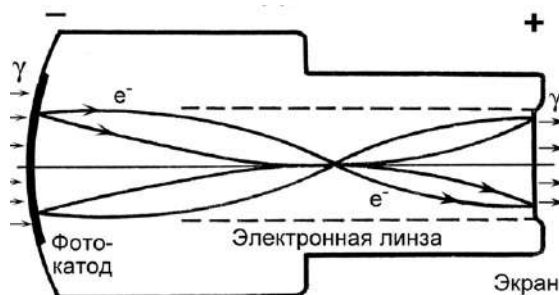


Рис. 11.13. ЭОП.

Позже изобрели микроканальную пластинку – это тоненькая стеклянная пластинка, в которой много дырочек, они такие мелкие, что глазом их не видно, и каждая дырочка работает как фотоэлектронный умножитель.

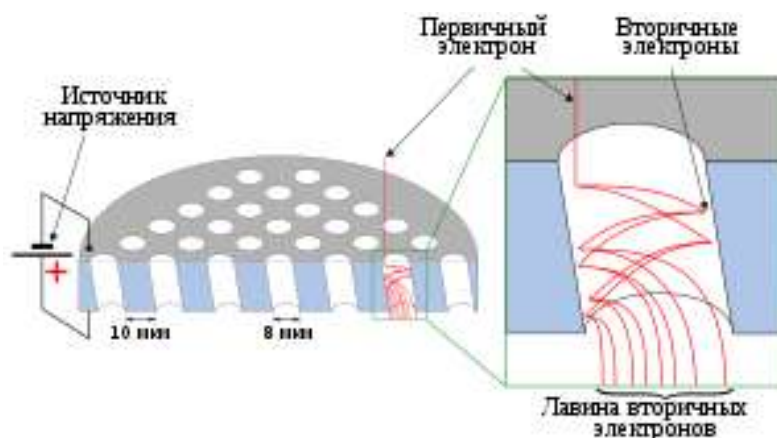


Рис. 11.14. Микроканальная пластинка.

ПЗС-матрица – прибор с зарядовой связью. В потенциальной яме одной ячейки ПЗС может поместиться $10^5 \div 10^6$ электронов. Звезда 10^m в полосе V на 1-м телескопе наполняет ячейку за 1 сек, затем заряд начинает переливаться в соседние пиксели. В ходе считывания избыточный заряд создаст паразитный «хвост», тянущийся за изображением.

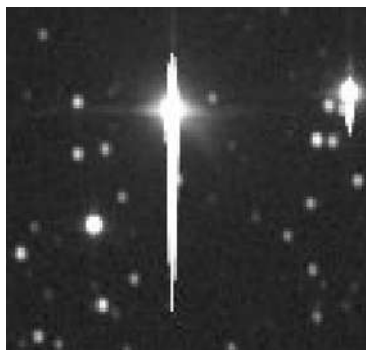


Рис. 11.15. Переполнение пикселей ПЗС-матрицы.

Недавно была разработана технология изгибания ПЗС-матриц. По сравнению с плоскими такие матрицы теряют гораздо меньше света по краям (виньетирование), а также меньше подвержены влиянию aberrаций (кривизна поля).

Квантовый выход – эффективность приёмников света.

- Квантовая эффективность сетчатки глаза составляет 3-4%.
- В фотографии требуется примерно 100-200 квантов, чтобы создать скрытое изображение в зерне фотоэмульсии.
- В фотокатоде для освобождения одного фотоэлектрона требуется в среднем 10 квантов. Их еще нужно собрать и зарегистрировать. Типичная квантовая эффективность популярного советского ФЭУ-79 составляла около 6%.
- В благоприятных условиях ПЗС в максимуме спектральной чувствительности обладают квантовым выходом около 90%, а в среднем по всей области спектральной чувствительности квантовый выход ПЗС составляет 50-60%.

Объем информации в одном фрейме:

- Сетчатка глаза человека – 120 Мрпх
- Фотопластинка 35х35 см – 200 Мрпх
- ПЗС-матрица бытовая – 12 Мрпх
- Астро ПЗС-матрица (4х4) – 260 Мрпх

Астроном устроили свою систему фотометрии небесных объектов схожей с устройством сетчатки человеческого глаза. Делаем 3 фотографии: через ультрафиолетовый U, синий B, желтовато-зеленый фильтр V. Много лет мы работали в такой трехцветной системе, потом появились ПЗС-матрицы, чувствительные еще и к ближнему инфракрасному свету, и мы стали использовать четвертый фильтр R. Из четырех цветов в разных спектральных диапазонах можно сложить любой цвет и узнать особенности излучения какой-либо звезды.

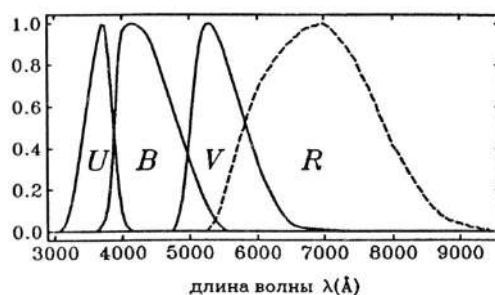


Рис. 11.16. Кривые реакции в системе UBVR Джонсона.

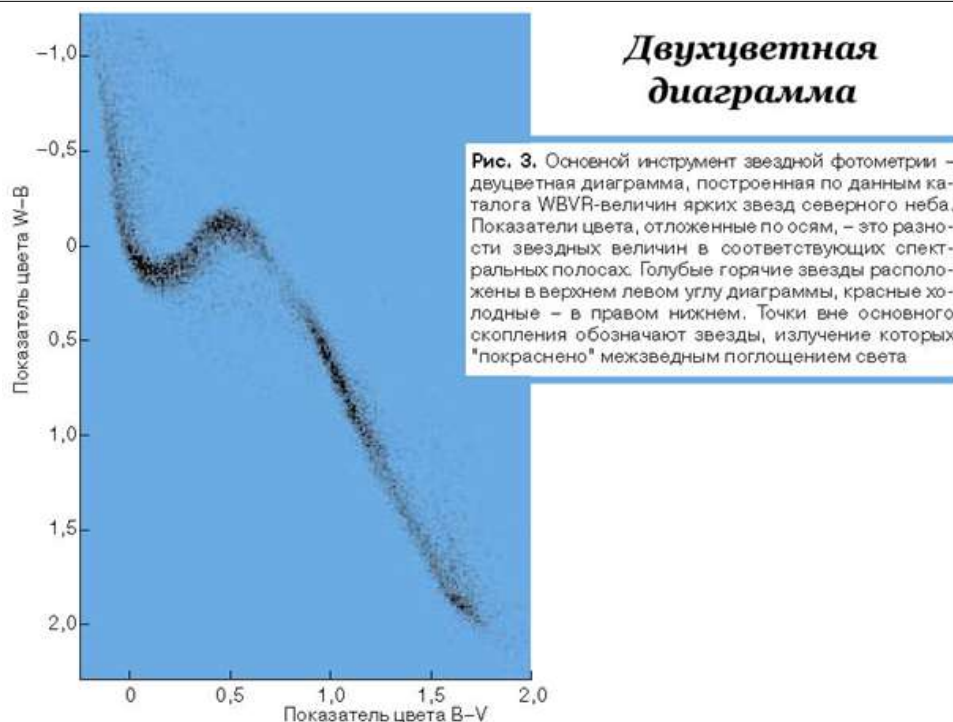


Рис. 11.17. Двухцветная диаграмма.

Цвет – это избыток яркости в одном диапазоне по сравнению с другим. Астрономы обычно строят двухцветные диаграммы, по осям отложены разности яркости двух спектральных нот.

ЛЕКЦИЯ 14. НЕОПТИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ

Введение

Оптика покрывает лишь малую часть всего электромагнитного спектра: видимый свет ($3500\text{--}7000\text{ \AA}$) - 1 октава, спектр от гамма ($0,1\text{ \AA}$) до радио (10 м) – 40 октав.

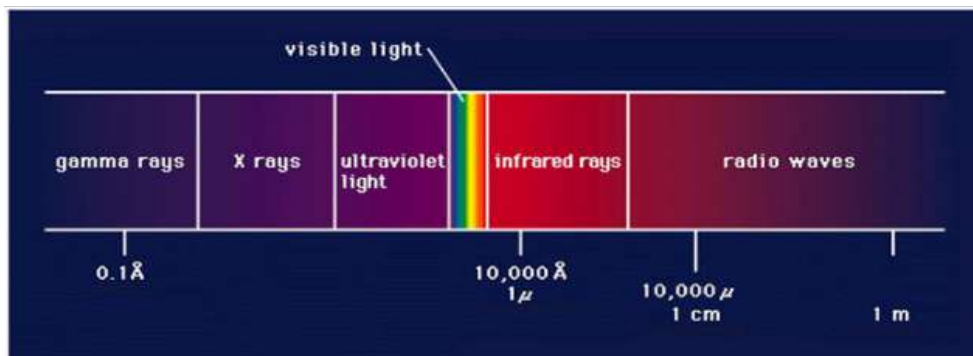


Рис. 12.1. Доля видимого излучения в электромагнитном спектре.

Проводя обзор с поверхности Земли, мы имеем два окна прозрачности: узкое окно оптики и широкое еще не до конца изученное радио-окно.

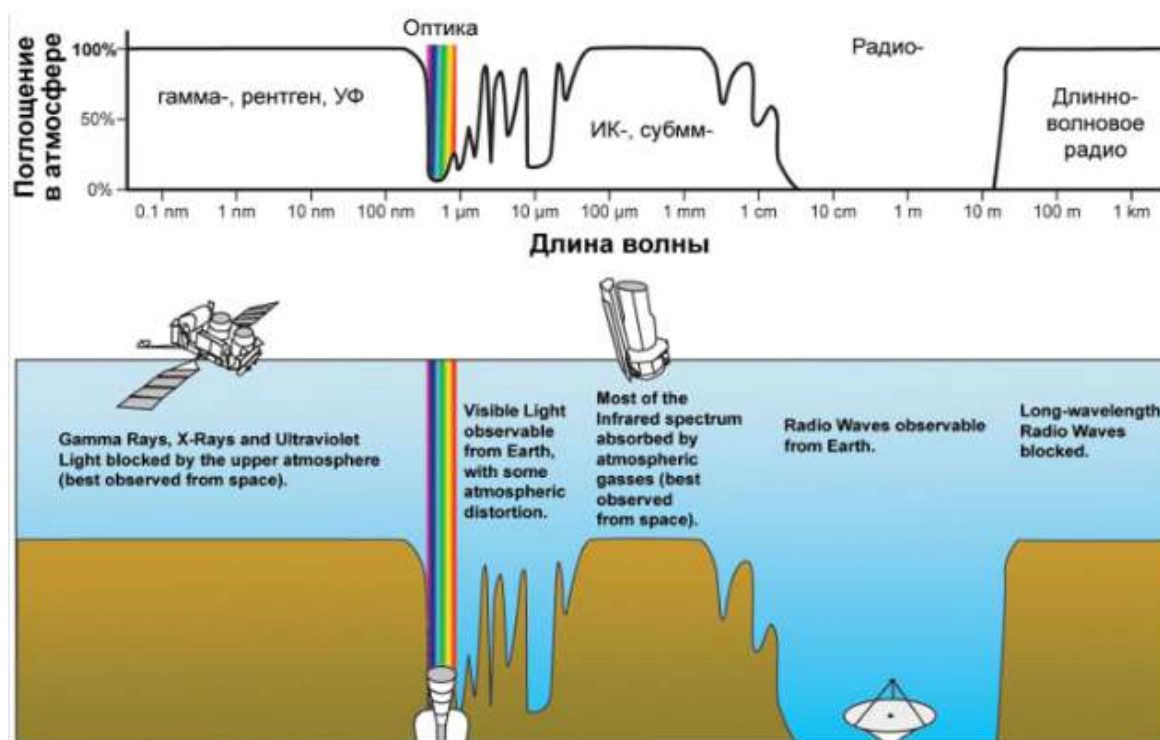


Рис. 12.2. Поглощение волн различной длины в атмосфере.

Даже в узком оптическом окне важно проводить наблюдения в разных диапазонах спектра: берем видимый свет, дальний инфракрасный, ближний

инфракрасный или одну спектральную линию излучения водорода, это позволяет увидеть различные типы объектов.

Радио окно шире оптического, там информация гораздо более разнообразная, поэтому наблюдение должно производиться в еще большем количестве диапазонов.

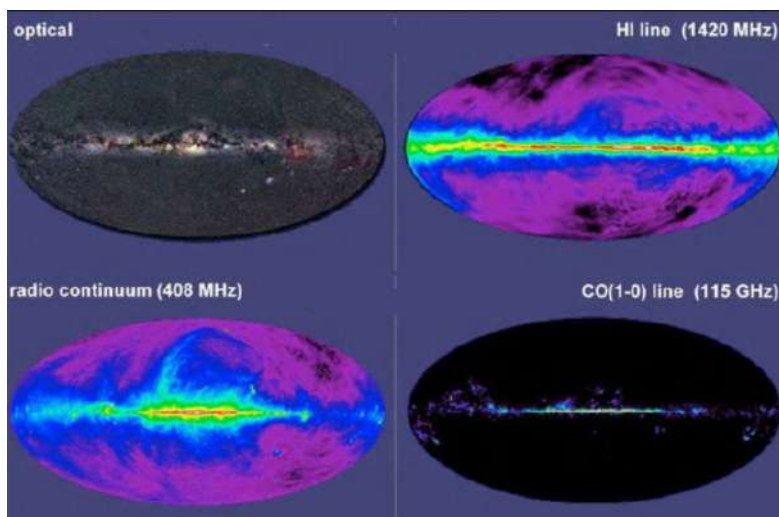


Рис. 12.3. Сравнение оптического и трех радио снимков неба.

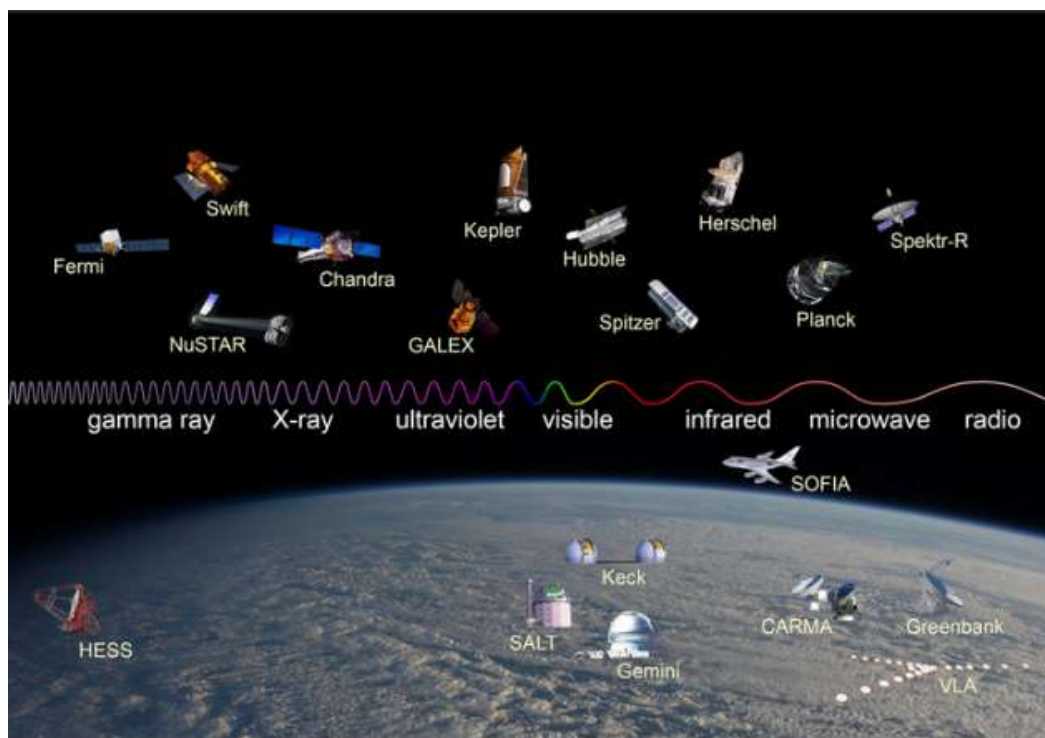


Рис.12.4. Аппараты для наземного и космического наблюдения в различных диапазонах.

Диапазон астрофизических наблюдений:

10^{-25} см - космические лучи (частицы) сверхвысокой энергии, 10^{21} эВ.

10^{15} см - гравитационные волны (двойные звезды).

Открытия за последние годы:

- CMB (cosmic microwave background) Fluctuations (COBE, BOOMERanG, MAXIMA, WMAP)
- Gamma-Ray Bursts (CGRO, HETE-2, SWIFT, GLAST, ...)
- Ubiquity of black holes (Chandra, ASCA, HST, ...)
- Extrasolar planets (Optical telescopes)
- Kuiper belt planets (Optical telescopes, HST, Spitzer)
- Accelerated expansion of the Universe (Optical telescopes)

История развития радиоастрономии

Карл Янский – инженер телефонной фирмы “Белл”, изучал атмосферные помехи, которые мешают радиосвязи. Обнаружил, что одна из помех ($\lambda=14$ м) возникает постоянно, с периодом 23 часа 56 минут. Сообразил, что источником является далекий объект - Млечный Путь.

Грот Рёбер - инженер-радиолобитель, заинтересовался открытием К. Янского, не получив поддержки от "Белл Лабс" и обсерваторий, сам построил во дворе своего дома в пригороде Чикаго первую параболическую антенну (9,5 м) и провел первый обзор Млечного Пути, открыв несколько источников: Cyg, Cas (1938/43). Рёбер спроектировал конструкцию, которая используется в современных телескопах.



Рис. 12.5. Первый радиотелескоп, построенный Рёбером (1937г.).

Во время Второй мировой войны развилась радиолокация. Англичане заметили, что утром на восходе возникают помехи не радарам, мешающие противовоздушной обороне замечать противника. Оказалось, что Солнце является мощным радиоисточником. Появилось финансирование, на решение этой проблемы и изучение

космических радиоисточников. После окончания войны радиоинженеры занялись радиоастрономией (аппаратура осталась после войны).

Военная аппаратура оказалась слабой для изучения астрономии, поскольку сигналы из космоса приходят достаточно слабые. Появилась необходимость строить большие антенны, коллекторы, чтобы улавливать слабый сигнал. Англичане показали, что чем больше площадь антенны, тем лучше.



Рис.12.6. Джодрелл Бэнк, Маклесфилд, Англия, 1957 (Диаметр 76м).

Далее с развитием космонавтики в СССР и США стали догонять англичан и делать большие радиоантенны для поддержания радиосвязи. Эти же аппараты радиоастрономы использовали и для изучения неба.

Конструкция осталась почти неизменной. Американцы попытались поставить телескоп на экваториальную монтировку, но она получилась очень громоздкой и дорогой. Все остальные радиотелескопы до сих пор делают на альт-азимутальных монтировках (вращение по высоте и по азимуту).

Радиотелескопы стараются ставить в радио-тихих долинах, чтобы избежать помех, вызванных атмосферными явлениями, и промышленных помех. Обычно это долины окруженные горами, они охраняемые, люди там не живут, чтобы не мешать работе своими телефонами и микроволновками.

Устройство радиотелескопов

Радиотелескопы устроены по схеме Кассегрена с двумя отражателями.



Рис.12.7. Схема радиотелескопа.

Однако с помощью радиотелескопа сложно получить картинку, они в состоянии измерить только общий поток радиоволн от источника.

Угловое разрешение параболоида: $\sigma \approx \frac{\lambda}{D}$, где длина волны $\lambda \approx 1\text{ м}$, диаметр телескопа $D \approx 50\text{ м}$. Таким образом, $\sigma \approx \frac{1}{50}\text{ рад.} \approx 1^\circ$. Угловой размер небесных объектов гораздо меньше, поэтому различить их нельзя.

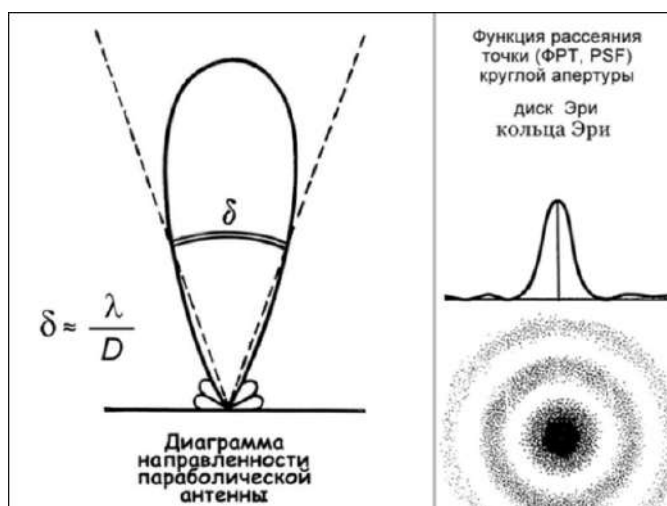


Рис.12.7. Зависимость разрешения от длины волны и диаметра апертуры.

Однако в последние годы детектируют волны с длиной волны ≈ 1 мм, и разрешение получить можно.



Рис.12.8. Матрица, используемая при детектировании радиоволн малой длины.

Одна из проблем связанная с размером антенн, это их подверженность влиянию ветра. Можно сказать, что антенна – это гигантский парус. Поэтому конструкции стали делать сетчатой, размер ячейки меньше длины волны и не препятствует отражению.

При увеличении диаметра антенн росла и масса конструкции, при повороте антенны она деформировалась под действием собственного веса. Эту проблему решил немецкий инженер и астроном Себастьян фон Хорнер, он придумал гомологичные структуры. При повороте антенна сохраняла форму параболоида, немного менялось фокусное расстояние, а второе зеркало меняло положение и настраивало фокус. Так немцы смогли построить 100 метровый телескоп.

Американцы решили побить немцев и построили телескоп размером 100×110 метров. Однако за основу был взят сегмент параболоида, а второй отражатель размещен сбоку в центре оптической оси. Телескоп находится в Green Bank.

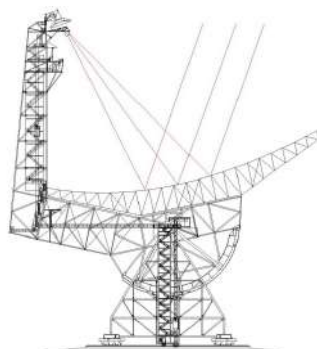


Рис. 12.9. Телескоп в Green Bank.

Создать еще более крупные подвижные радиотелескопы сложно, металл не выдерживает. Поэтому стали строить неподвижные.

Например, неподвижный телескоп с диаметром 305 метров находился в Аресибо (о. Пуэрто-Рико). В случае неподвижного телескопа параболическая форма антенны

неприменима, поскольку нельзя изменить направление оптической оси. Используется сферическая форма антенны и подвижная радиоаппаратура. Строение радиоприемной аппаратуры сложное, нужно избавляться от aberrаций сферического зеркала. 1 декабря 2020 года телескоп разрушился в результате природных катаклизмов.



Рис. 12.10. Неподвижный телескоп, Пуэрто-Рико.

Но еще более масштабный телескоп был построен в Китае – 500 метров в диаметре. FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope). Для его постройки отселили 30 соседних деревень.



Рис. 12.11. Телескоп FAST.

Самый крупный телескоп построили в России (см. рис. 12.12.). Состоит из 800 алюминиевых пластин, положение которых регулируется по наклону. Для приема сигнала в центре расположены несколько кабинок с приемной радиоаппаратурой.



Рис. 12.12. Самый крупный телескоп.



Рис. 12.13. Пластины телескопа РАТАН-600.

Существуют телескопы с простой конструкцией: поле, заполненное элементарными антеннами, и все их сигналы сводятся в одно место. С помощью такой примитивной конструкции были открыты радио пульсары – второе по важности открытие в радиоастрономии.



Рис. 12.14. Пушино БСА – большая сканирующая антенна.

Заполнить большое пространство сетью антенн непросто, поэтому пользуются схемой креста Миллса. Делается одна длинная антенна и вторая перпендикулярная ей. В длинной антенне хорошее разрешение, но узкое поле заполнения, в перпендикулярной антенне – наоборот. Складывая сигналы, на пересечении двух «ножевых» диаграмм направленности получаем карандашную диаграмму направленности, направление, из которого телескоп наиболее эффективно получает сигнал.

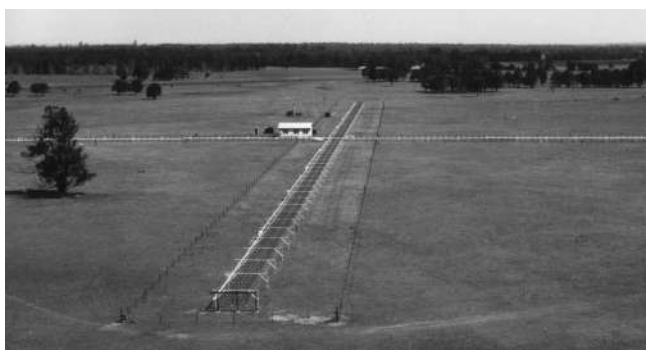


Рис. 12.15. Крест Миллса.



Рис. 12.16. Реализация Креста Миллса в Пушино.

Многоапертурные радиоинтерферометры

Чтобы не строить огромные телескопы, можно использовать два телескопа, разнесенные в пространстве, но соединить их сигналы в одном радиоприемнике. С помощью двух сигналов, сдвинутых по фазе, получим интерференционную картинку (см. рис. 12.17.).

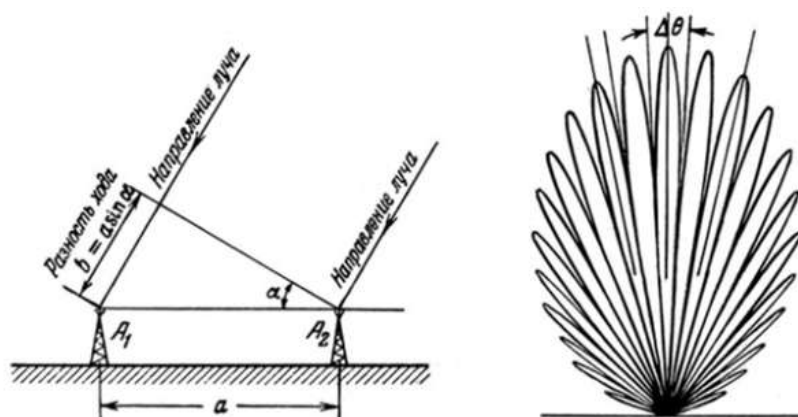


Рис. 12.17. Схема получения сигналов с двух телескопов.

В полярной системе координат не понятно, из какого направления пришел сигнал, интенсивность соседних «лепестков» малоразличима. Поэтому стоит включить в систему дополнительную антенну, получим похожую картину, с другим периодом, и возможно сможем исключить боковые «лепестки». Чем больше дополнительных антенн, тем лучше.



Рис. 12.18. Пример много апертурного радиоинтерферометра (АТСА).



VLA - 27 антенн диаметром 25 м, 3 плеча (Y) по 22,4 км

Рис. 12.19. Самый большой апертурный радиоинтерферометр (США).

Можно сделать межконтинентальную систему телескопов. Нужно договориться о синхронной записи сигналов на различных континентах, это возможно с изобретением атомных часов. Получается интерферометр размером с земной шар.

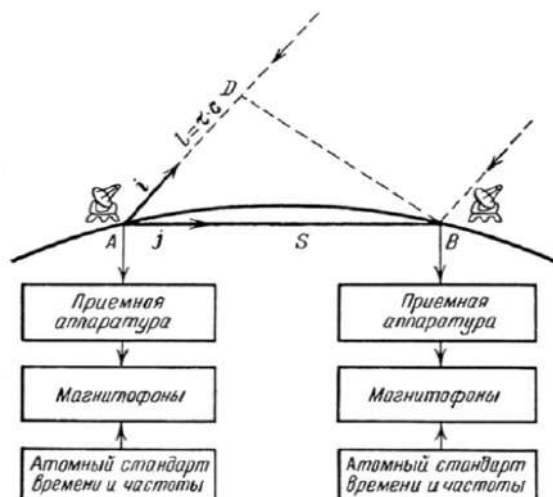


Рис. 12.20. Межконтинентальный радиоинтерферометр.

Также апертуру можно выпихнуть за пределы планеты, для увеличения масштаба. И это было сделано в России. Однако сложность состоит в том, что в каждый момент времени нужно знать расстояние от телескопа, а он летает в космосе.



Рис. 12.21. Космическая апертура.

Детектирование в миллиметровом диапазоне

В последнее время все чаще детектируются малые длины волн ≈ 1 мм, они плохо проходят через атмосферу, а зеркала для их поимки должны быть очень ровными. Телескопы нужно устанавливать на вершинах и укрывать от непогоды.



Рис. 12.22. Высота расположения современных телескопов.

Предельное угловое разрешение в миллиметровом диапазоне можно получить, раздвинув антенны в пределах земного шара.

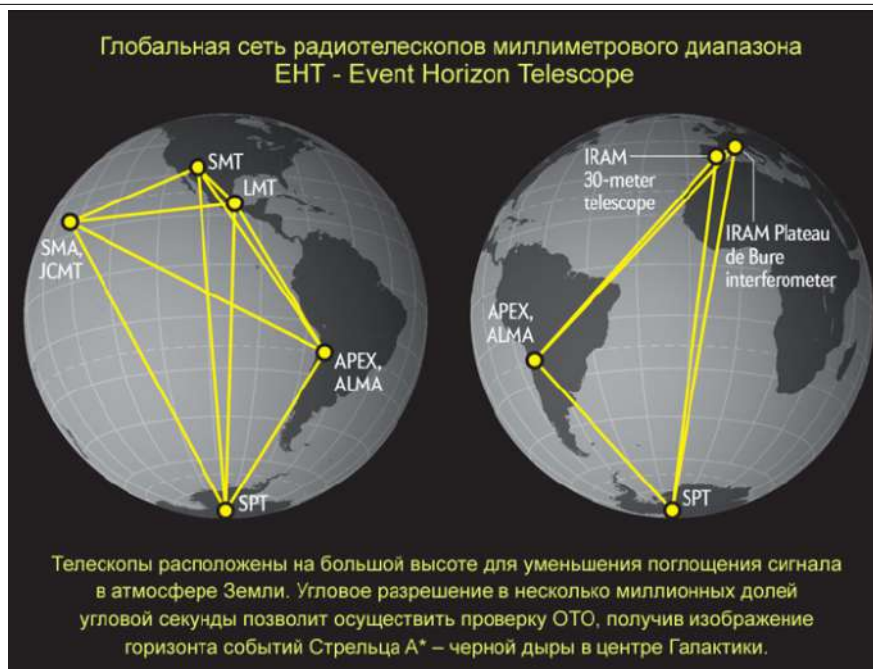


Рис. 12.23. Глобальная сеть радиотелескопов миллиметрового диапазона.

Проект запуска антенны миллиметрового диапазона в космос “Миллиметр” (Спектр – М, РАН).

Длинные волны не проходят ионосферу земли, поэтому нужно делать телескоп в космосе. Например, на Луне с обратной стороны от земли, чтобы помехи не долетали.

ЛЕКЦИЯ 15. КОРОТКОВОЛНОВАЯ АСТРОНОМИЯ

Часть излучения не способна пробиться к поверхности земли. Поэтому остается только подниматься выше от поверхности земли, чтобы детектировать необходимые типы излучения.

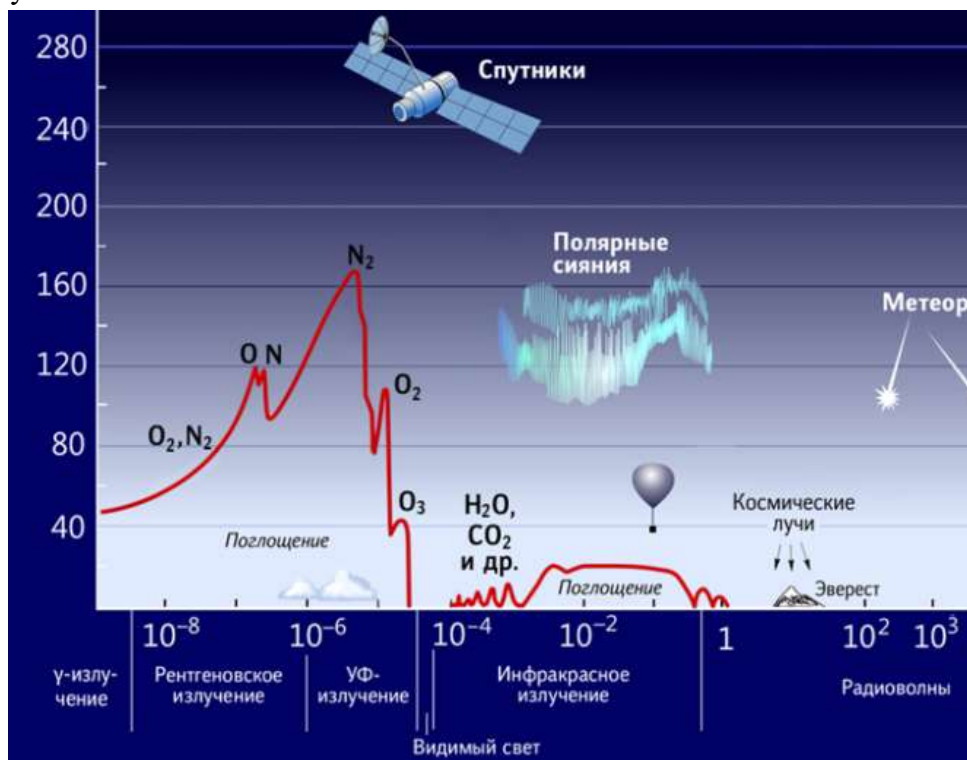


Рис.13.1. Поглощение излучения атмосферой Земли.

Решение – подвижная обсерватория на борту самолета. Поднимается на высоту 12 км.



Рис.13.2. Телескоп на борту самолета.

Выше – баллонные эксперименты над Антарктидой, где самый сухой воздух, аппаратуру не нужно охлаждать, и циркум-полярный ветер вокруг южного полюса приносит аппаратуру обратно.

Лучшие исследования – космические, нет влияния атмосферы. Поначалу пытались сделать пилотируемые обсерватории с большим комплексом телескопов ультрафиолетового и рентгеновского диапазона (см. Рис. 13.3). Главная цель - изучение солнца.



Рис. 13.3. Американская космическая станция «Скайлэб».

Выяснилось, что сбор данных может производиться и без экипажа. Человек скорее мешает: думает скорее о выживании, а также двигается и сбивает настройку фокуса. Однако были получены первые УФ изображения Солнца.

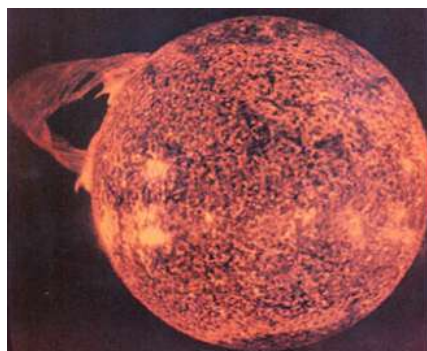


Рис. 13.4. Первый ультрафиолетовый портрет Солнца.

Беспилотный телескоп Хаббл работает уже больше 30 лет. Наводится на объект и может часами не сдвигаться ни на угловую секунду, собирая свет.

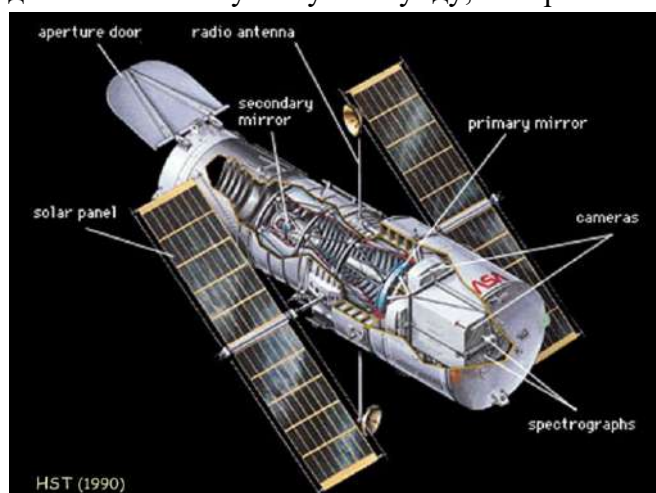


Рис. 13.5. Беспилотный телескоп Хаббл.

Также проводились измерения с поверхности луны, как в ручную космонавтами, так и автоматические. Межпланетная станция Чаньэ-3 (Китай) после прилунения была

сфотографирована луноходом Юйту в декабре 2013 г. На борту был установлен УФ-телескоп (150 мм Ричи-Кретьен, 245-340 нм), который передал десятки тысяч снимков.

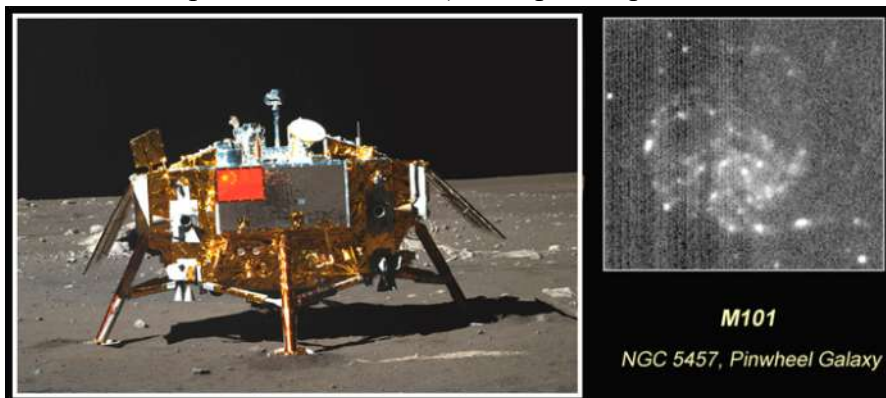


Рис. 13.6. Межпланетная станция Чанъэ-3.

Исследователи облюбовали точки Лагранжа. Аппарат в окрестности точки L1 синхронно с Землей обращается вокруг солнца, он всегда видит Землю с одной стороны, Солнце – с другой, однако сложно поддерживать с ним связь (из-за Солнца). Точка L2 удобна, поскольку аппараты всегда находятся с ночной стороны Земли, не доходят помехи от Солнца.

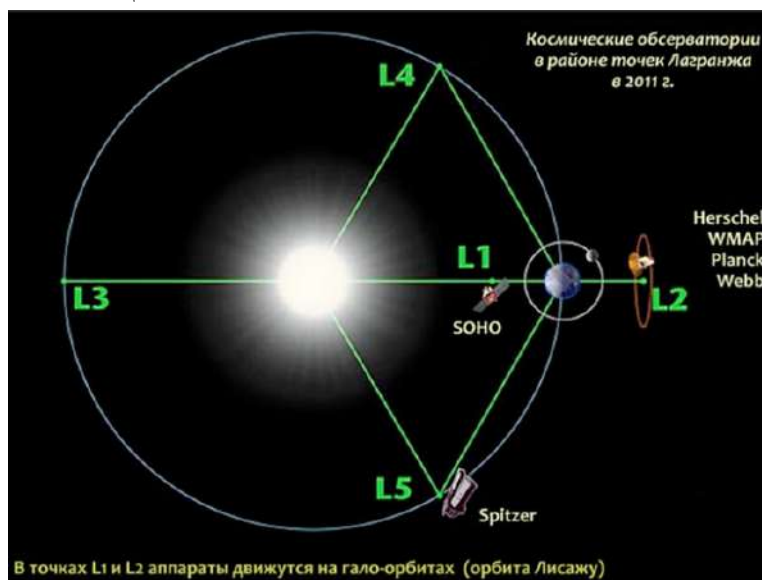


Рис. 13.7. Расположение обсерваторий.

Инфракрасная астрономия

Особая проблема в инфракрасной астрономии в том, что инфракрасные лучи излучают теплые тела. Значит, сам телескоп не должен быть теплым, иначе он сам будет источником инфракрасного излучения, и вы ничего не увидите, он сам себе будет освещать. Значит, его надо охладить, чтобы он увидел излучение других теплых тел. В телескопе установлены большие резервуары с гелием, пока он не испарится, телескоп охлаждается и работает.

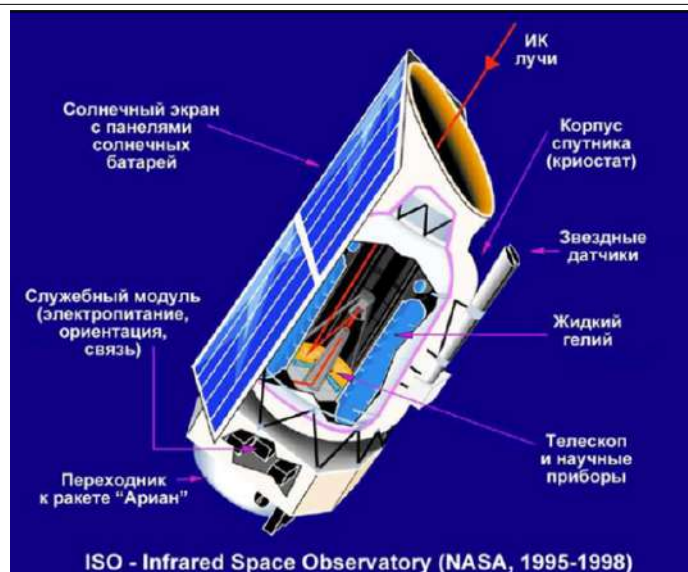


Рис.13.8. Инфракрасный телескоп.

Научились пары гелия собирать, сжимать и снова отправлять в резервуар, летал несколько лет такой инфракрасный телескоп, но долго это не продлилось.

WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer, NASA) был запущен 14 декабря 2009 года. До октября 2010 года наблюдал в диапазонах 3, 5, 12 и 22 мкм в холодном режиме (жидкий водород) и до 17 февраля 2011 г. - в тёплом режиме.

Телескоп диаметром 40 см и новые приемники обеспечили чувствительность до 1000 раз более высокую, чем у ранее созданных спутников (IRAS, COBE и др.) Провел полный обзор неба. Обнаружил более 33 500 новых астероидов и комет, а также звёзды нового типа - холодные коричневые карлики спектрального класса Y. В тёплом режиме открыл астероид 2010 SO16 на подковообразной траектории вдоль орбиты Земли (период колебаний 350 лет), а также первый троянский астероид Земли 2010 TK7.



Рис. 13.9. WISE телескоп.

Рентгеновская астрономия

Очень сложно сфокусировать рентгеновские лучи, нет линз и зеркал. Однако выяснили, что при малых углах падения рентгеновские лучи могут отразиться от металлической поверхности. Изобретены телескопы косого падения. В рентгеновском телескопе косого падения для увеличения эффективной апертуры используются вложенные параболические и гиперболические зеркала.



Рис. 13.10. Принцип отражения рентгеновских лучей.

Вложенные зеркала рентгеновского телескопа

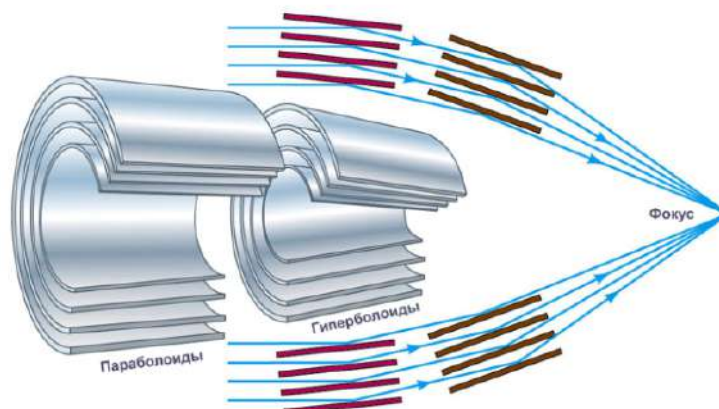


Рис. 13.11. Устройство рентгеновского телескопа косого падения.

Более 20 лет летает телескоп Чандра. Очень длинный, был доставлен на американском шаттле. Сейчас шаттла нет, а в ракету такой телескоп не влезет. Нужно искать новые пути.

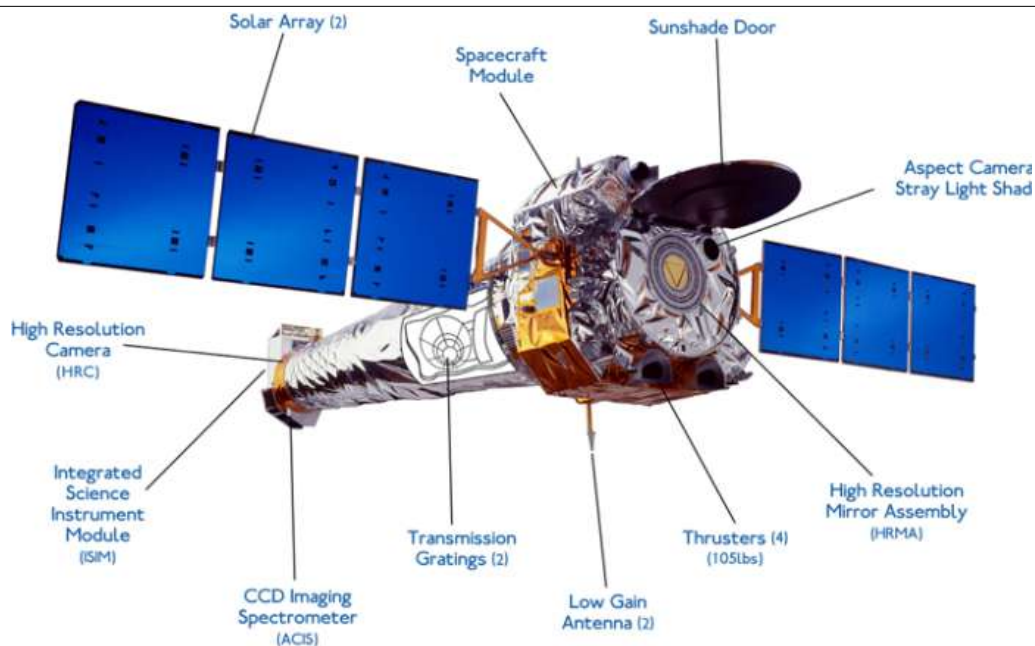


Рис.13.12. Рентгеновский телескоп Chandra.

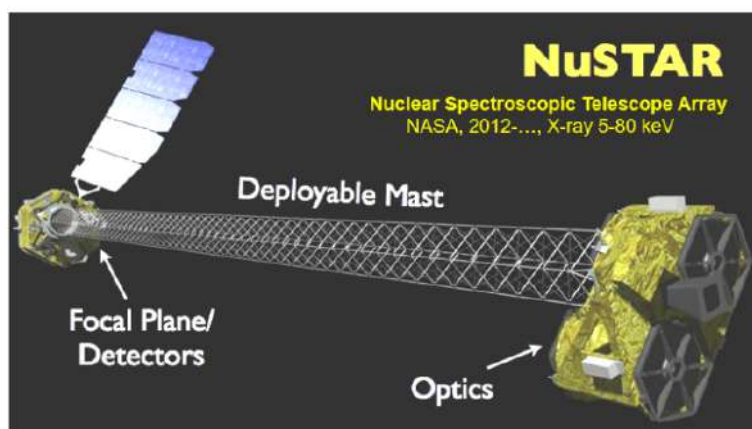


Рис.13.13. Компактный раскладной телескоп.



Рис. 13.14. Синтетическое изображение с телескопов разных диапазонов.

В еще более жестком диапазоне излучения невозможно сделать фокусирующую оптику. Под каким бы малым углом вы не поставили металлическую поверхность, от нее гамма квант не отразится. Он такой мощный, что он либо поглотится, либо пройдет насквозь эту поверхность.

Придумали гамма телескопы, которые позволяют, по крайней мере, узнать направление на источник излучения.

Перед детектором стоит маска - толстая металлическая плита, на которой дырочки сделаны в хаотическом порядке, но мы-то знаем рисунок этих дырочек. Когда гамма-излучение приходит, оно отбрасывает свою тень на детектор: там, где дырочки, кванты проходят, а там, где нет дырочек, они поглощаются.

Если один источник на небе, то мы видим одну тень на детекторе, и можем её расшифровать. Мы знаем, как выглядят дырочки на этой плите, поэтому маска называется кодированной. Если два источника в небе, то две тени расшифровываем и понимаем, в каком направлении один источник, в каком другой. Если 100 источников, расшифровать трудно. Но не так много ярких гамма источников на небе.



Рис. 13.15. Телескоп с кодирующей маской.

Сейчас самые продуктивные гамма телескопы – это обсерватории Ферми. Там гамма квант, внедряясь в систему из металлических пластинок, между которыми электрическое поле с большим потенциалом, прошивает одну за другой. Ионизует газ, который между пластинками заключен, и вызывает электрический разряд - искра проскакивает. По направлению этой искры мы понимаем, откуда прилетел гамма квант. Потом он поглощается в колориметре, по количеству тепла, которое там выделилась, мы понимаем, какой энергии был квант.

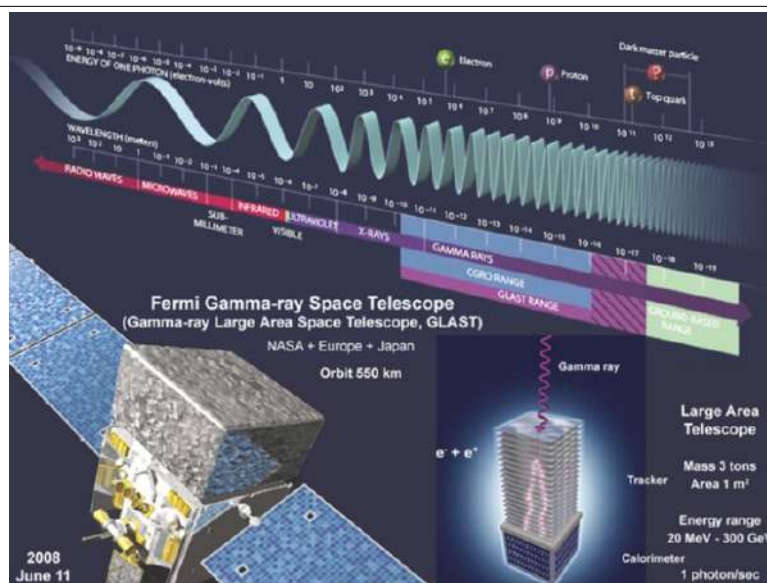


Рис.13.16. Телескоп Ферми.

С помощью телескопа Ферми были открыты пузыри Ферми – гигантские области над центром нашей галактики, которые светятся в гамма диапазоне, значит там очень горячий газ.

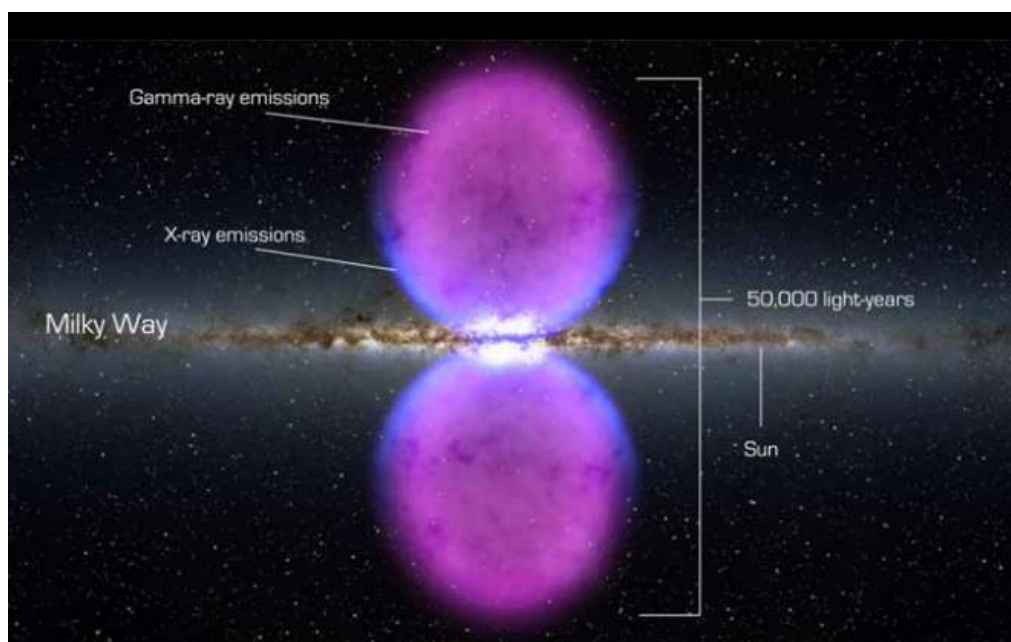


Рис. 13.17. Пузыри Ферми.

Еще одно направление в астрономии – изучение гамма-всплесков. Короткие гамма вспышки долгое время оставались загадкой. Свет на них пролил спутник SWIFT.

Чем он хорош? У него гамма детектор, у него рентгеновский телескоп (мягкого рентгеновского диапазона) и оптический. Когда гамма телескоп фиксирует гамма вспышку, он приблизительно определяет направление, рентгеновский телескоп уточняет до квадратного градуса, а ультрафиолетовый телескоп еще уточняет до трех секунд угловых.

Эта информация уже полезна, можно понять, откуда пришел гамма импульс, из какой галактики (как выяснилось, они приходят от далеких галактик). Информация моментально без обработки сбрасывается в интернет, и любой желающий может ее получать, она приходит на все автоматические телескопы. В ГАИШ есть система автоматических телескопов роботов, они без участия человека моментально за несколько секунд в нужную сторону поворачиваются и делают фотографию. Таким образом, удалось понять, в каких галактиках происходят эти всплески, иногда даже более детальную информацию.

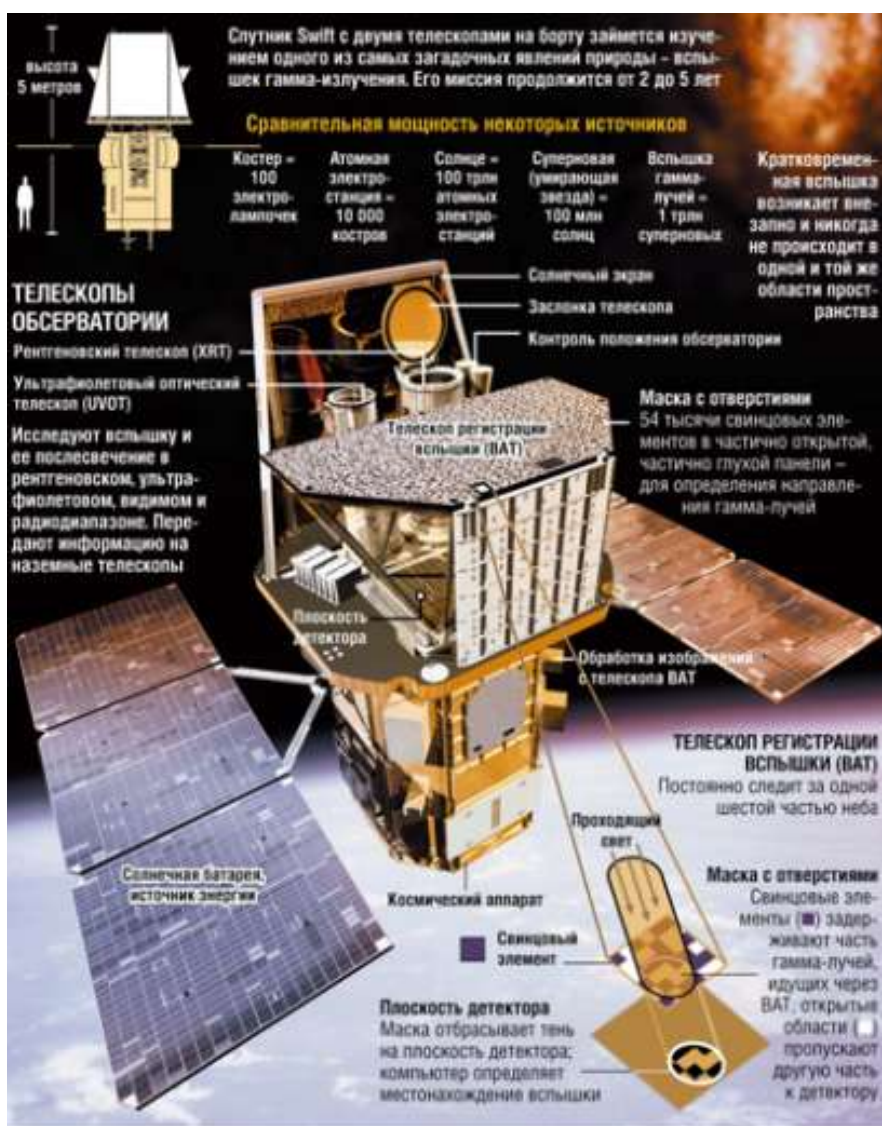


Рис. 13.18. Телескоп SWIFT.



Рис. 13.19. Робот – телескоп.

SWIFT зарегистрировал не одиночный гамма всплеск, а повторяющийся. С помощью Хаббла увидели, что это происходит в центре галактики. Теория, что мимо черной дыры пролетела звезда, и за несколько раз дыра ее поглотила.

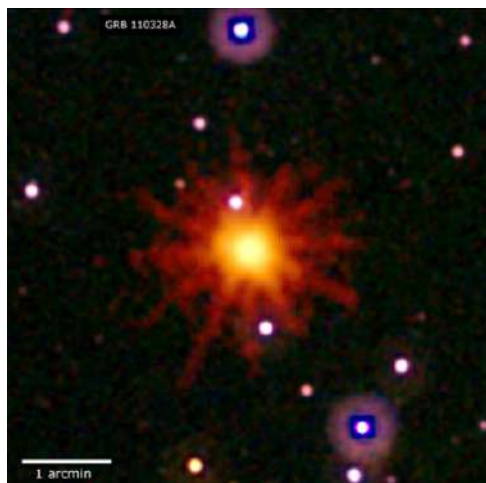


Рис. 13.20. GRB 110328A (SWIFT).

Космические лучи

На самом деле это космические частицы, которые открыл Виктор Хесс, изучая ионизацию воздуха.

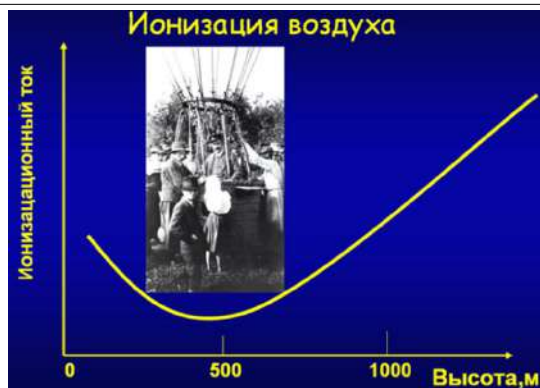


Рис. 13.21. Зависимость ионизационного тока от высоты.

Подумали, что это электромагнитные лучи, что-нибудь вроде рентгена, идут из космоса. Но это были частицы из космоса. Прилетают быстрые протоны, быстрые электроны, они ударяются об атомы нашего воздуха. Они прилетают с такой кинетической энергией, что при каждом соударении с атомом рождается сноп новых элементарных частиц, их называют вторичные космические лучи. Этот поток идет к поверхности земли.

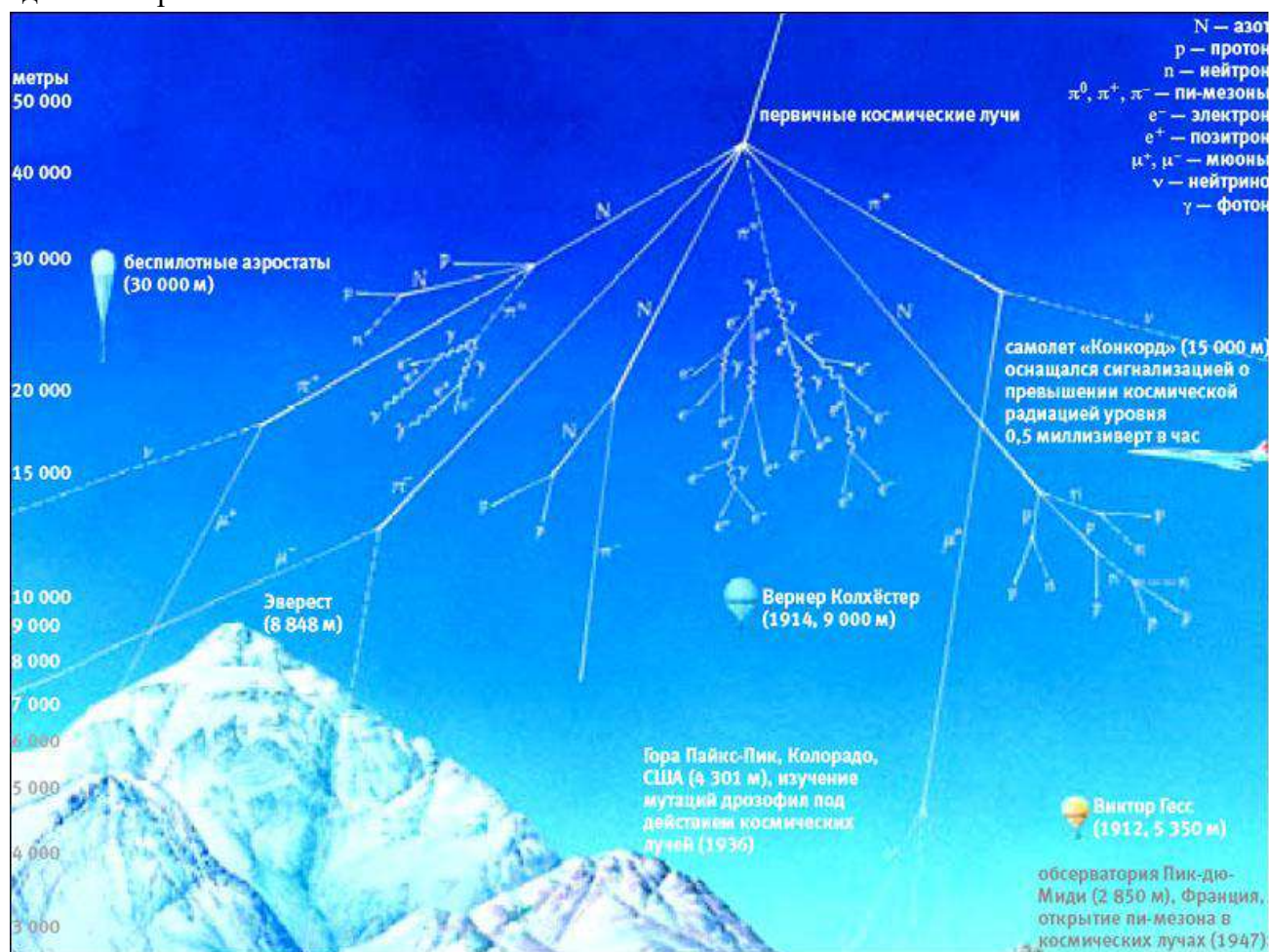


Рис. 13.22. Космические лучи.

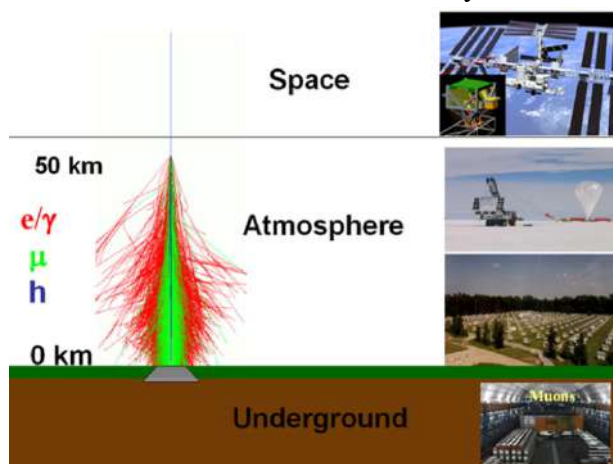


Рис. 13.23. Расположение детекторов космических лучей

Расположение детекторов на горе или под землей позволяет выделить или наоборот отсеять определенные типы частиц (в зависимости от энергий).

Детекторы на поверхности земли фиксируют широкий поток частиц, порождаемый в атмосфере ШАЛ (широкий атмосферный ливень).



Рис. 13.24. Детектирование ШАЛ.

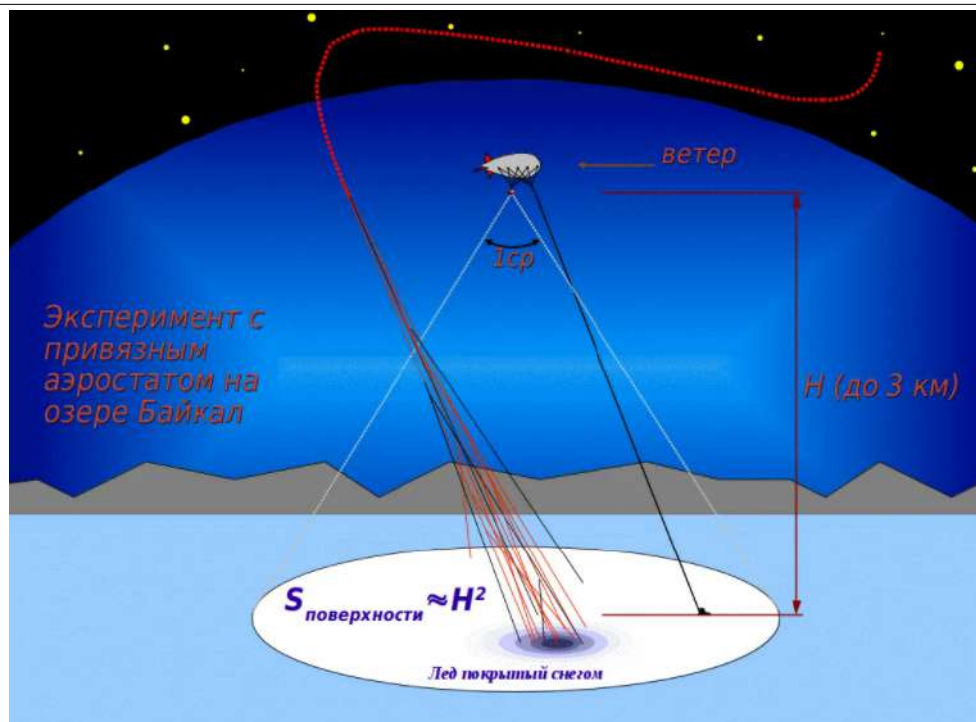


Рис. 13.25. Схема эксперимента по поимке ШАЛ по отражению (Байкал).

При попадании частицы с высокой энергией в Луну возникает черенковская вспышка, которая также может детектироваться.



Рис. 13.26. Детектирование космических частиц.

Детектирование нейтрино

Интересно заглянуть внутрь Солнца, для этого необходимо поймать нейтрино.

Дэвис собрал установку внутри пещеры, резервуар в котором хлор должен превращаться в радиоактивный аргон при взаимодействии с нейтрино. Получилось зафиксировать солнечные нейтрино, но лишь треть от теоритической величины.



Рис. 13.27. Первый детектор нейтрино.

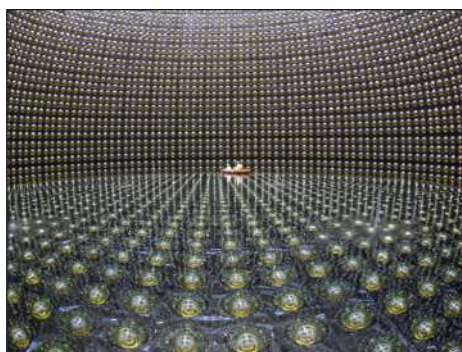


Рис. 13.28. Японский детектор нейтрино с водой и множеством ФЭУ.

Садберийская нейтринная обсерватория (г.Садбери, провинция Онтарио, Канада). Была построена следующая установка - 1000 тонн тяжелой воды (D_2O) в прозрачном акриловом (плексигласовом) шаре диаметром 12 м, окруженном 9600 ФЭУ на геодезической сфере, диаметром 18 м, погруженной в резервуар с чистой водой на глубине 2 км.



Рис. 13.29. Садберийская нейтринная обсерватория.

В 2002 г. здесь решена проблема солнечного нейтрино - зарегистрированы все три типа нейтрино в таком общем количестве, сколько должно рождаться на Солнце. Тем самым доказано, что:

- модель Солнца верна
- нейтрино имеет массу покоя
- происходят осцилляции нейтрино

Также в качестве резервуаров для поимки нейтрино используют водоемы.

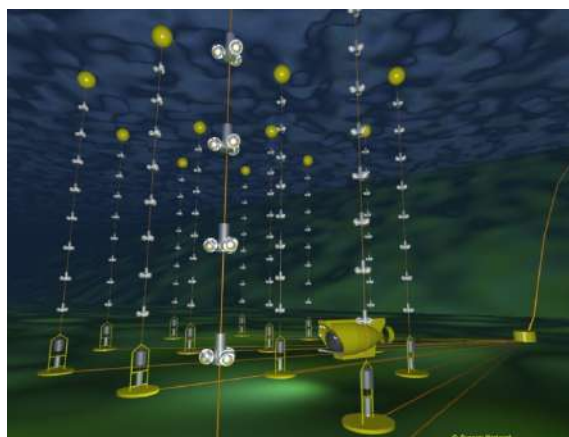


Рис. 13.30. Детекторы нейтрино в море.

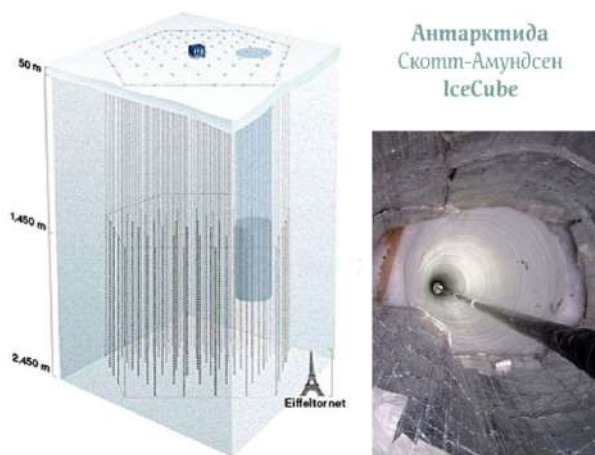


Рис. 13.31. Детекторы нейтрино во льду.

Детектирование гравитационных волн

При приходе гравитационной волны в любой точке пространства рядом с нами возникает поле приливных сил, которое колеблется с частотой прихода волны.

Идея детектировать дрожание твердого тела, Джозеф Вебер придумал фиксировать дрожание пьезокристалла. Однако он ошибся и фиксировал тепловые флуктуации молекул самого прибора.

Затем возникла идея подвесить свободные грузики и посмотреть флуктуации с помощью лазерного луча. И она оказалась рабочей. В качестве грузов – зеркала.

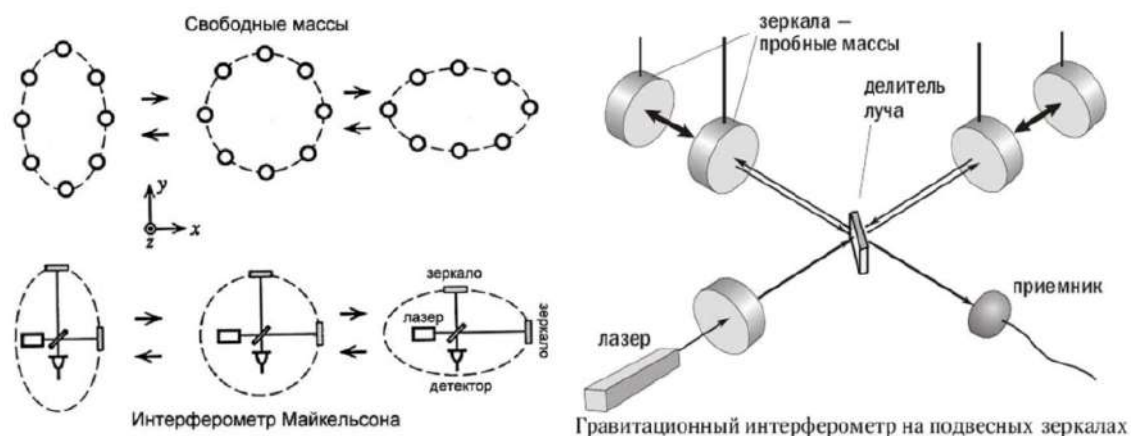


Рис. 13.32. Схема установки.



Рис. 13.33. Реализация установки в разных странах.

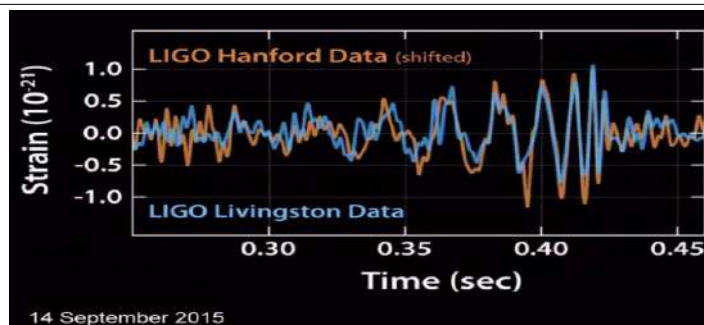


Рис. 13.34. Первая зафиксированная гравитационная волна из космоса.

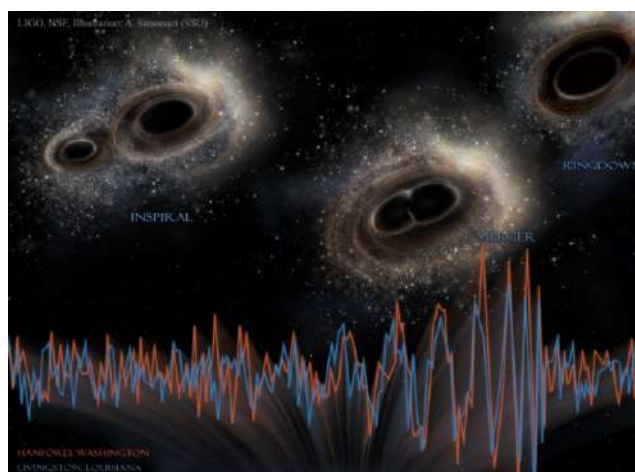


Рис. 13.34. Слияние черных дыр.

Детектор улавливает гравитационные волны перед самым слиянием дыр, когда амплитуда наибольшая.

Далее зарегистрировали слияние нейтронных звезд, а это интереснее, потому что когда они сливаются, происходит вспышка сверхновой.

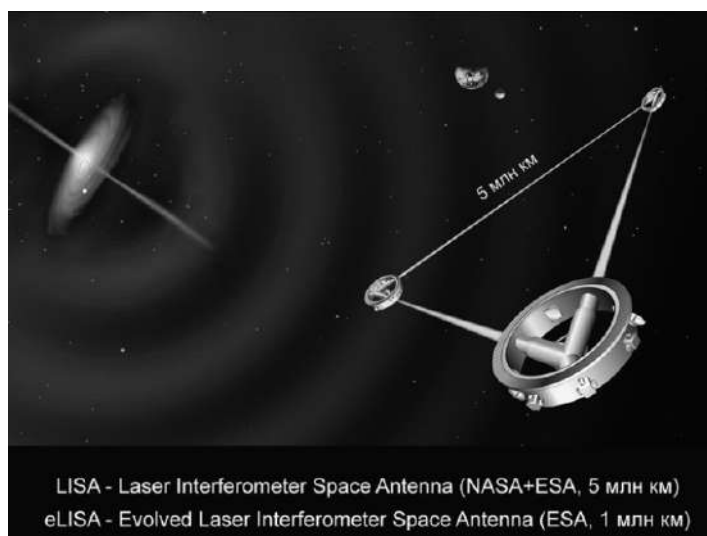


Рис. 13.35. Три спутника, контролирующие положение друг друга с помощью лазеров.
Проект для регистрации длинных гравитационных волн.

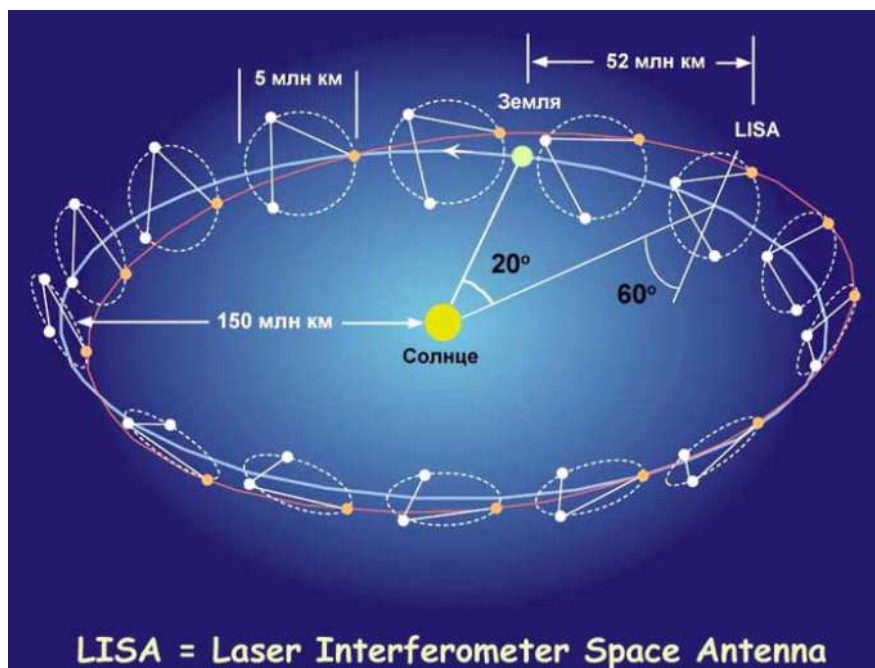


Рис. 13.36. Схема, по которой спутники LISA смогут сохранять постоянное расстояние.

ЛЕКЦИЯ 16. ДВИЖЕНИЕ ЛУНЫ. СОЛНЕЧНЫЕ И ЛУННЫЕ ЗАТМЕНИЯ

Движение Луны

Луна движется не в плоскости эклиптики, если бы она двигалась в плоскости эклиптики, лунные и солнечные затмения происходили намного чаще. Орбита Луны наклонена примерно на 5 градусов а, угловой диаметр Луны и Солнца составляет всего лишь пол градуса. Таким образом, в большинстве случаев Луна проходит либо выше, либо ниже Солнца, и лунная тень не попадает на Землю, и, наоборот, земная тень далеко не всегда попадает на Луну (рис. 16.1).

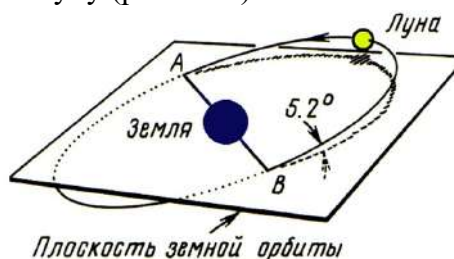


Рис. 16.1. Взаимное расположение плоскости лунной орбиты и плоскости орбиты Земли.

Движение Луны крайне сложно по той причине, что она примерно в равной степени подчиняется гравитации Земли и Солнца.

- Наклонение колеблется от $4^{\circ}58'$ до $5^{\circ}20'$ с периодом около полугода (среднее $5^{\circ}09'$).
- Узлы орбиты перемещаются по эклиптике к западу, совершая один оборот за 6793 суток (18 лет и 7 мес.).
- Перигей орбиты, двигаясь к востоку, совершает оборот за 9 лет.
- Экваториальная плоскость Луны с плоскостью лунной орбиты составляет угол $6^{\circ}41'$, а с плоскостью эклиптики – угол $1^{\circ}30'$.

Земля и Солнце действуют на Луну приблизительно в равной степени, но все-таки Солнце притягивает ее сильнее. Но главное, что и Земля и Луна вместе падают в сторону Солнца, и нам важно сравнивать не абсолютные значения притяжения Луны со стороны Земли и Солнца, а разность притяжения к Солнцу Земли и Луны по сравнению с притяжением Луны к Земле.

Когда мы одной и той же фотокамерой делаем снимки Луны, проходящей через перигей и апогей орбиты, и сравниваем их, то на этих фотографиях невооруженным глазом видно, что в перигей Луна заметно больше (рис. 16.2). Однако, глядя на Луну на небе, сложно сказать на глаз, в перигее она сейчас или в апогее.



Рис. 16.2. Фотографии Луны в перигее (слева) и апогее (справа).

Два интересных явления связаны с движением Луны по эллиптической орбите и с наклоном ее оси вращения к плоскости ее орбиты, оба явления носят название либраций. Либрации по долготе вызваны тем, что вокруг собственной оси Луна вращается практически равномерно, а вокруг Земли – неравномерно (второй закон Кеплера). Угловая скорость в перигее больше, чем в апогее. По этой причине, быстро проскакивая мимо Земли в перигее, Луна уходит от Земли, а довернуться еще не успевает, и мы заглядываем за ее восточный лимб. Когда же Луна медленно движется в районе апогея, нам удастся заглянуть за ее западный лимб. Таким образом, в целом мы видим примерно около 60% лунной поверхности, а оставшиеся 40% не видим никогда, даже с учетом либраций по долготе.

Либрации по широте наблюдаются из-за наклона оси вращения Луны к плоскости лунной орбиты. Луна в течение двух недель демонстрирует нам небольшую часть своего северного полюса, а затем – южного. Фактически, то же самое происходит с Землей по отношению к Солнцу и вызывает явление смены сезонов года. Наклон лунного экватора к орбите меняется от $6^{\circ}31'$ до $6^{\circ}51'$, средний угол составляет $6^{\circ}41'$.

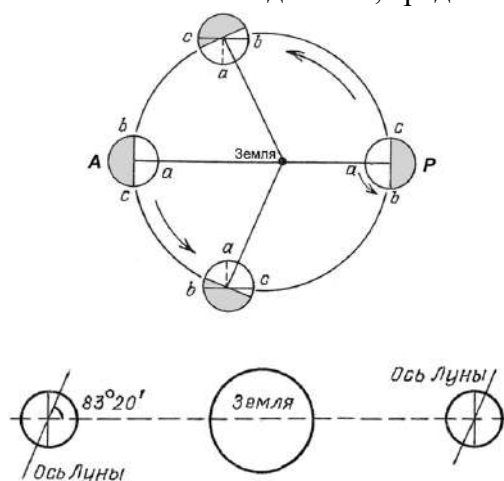


Рис. 16.3. Лунные либрации по долготе (сверху) и по широте (снизу).

Рассмотренные либрации имеют геометрический смысл, существуют также физические либрации Луны, в результате которых ее тело немного неравномерно вращается и покачивается, однако этот эффект очень маленький порядка угловых секунд, и мы не будем его обсуждать.

Затмения

Явление, при котором два небесных тела видны в одном направлении, астрономы обозначают тремя разными терминами (рис. 16.4). Затмением называется совмещение на небе двух объектов примерно равного углового размера, например, Луна с Солнцем. Если тело большего углового размера закрывает собой маленькое, то астрономы называют это покрытием, например, время от времени происходит покрытие звезд Луной. Если тело маленького углового размера тела проходит на фоне большого, например, Венера на фоне Меркурия или солнечного диска, то это называется прохождением.

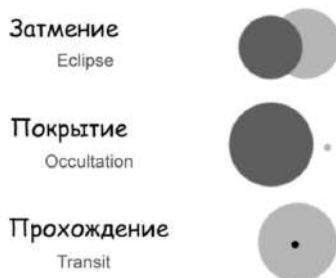


Рис. 16.4. Иллюстрация понятий.

Из-за наклона лунной орбиты Луна время от времени попадает в тень Земли (рис. 16.5), либо лунная тень время от времени попадает на поверхность Земли (16.6).

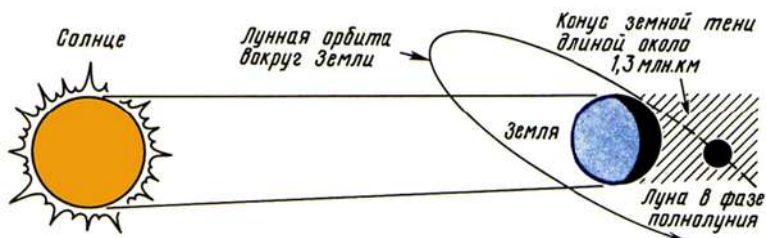


Рис. 16.5. Лунное затмение.

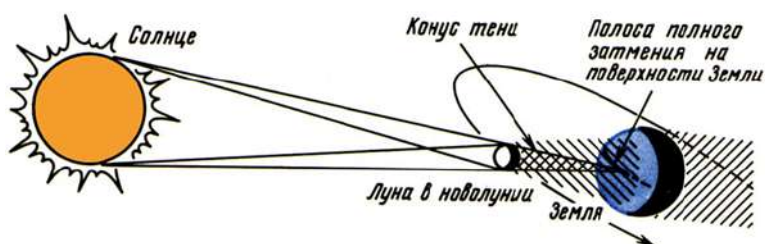


Рис. 16.6. Солнечное затмение.

Затмение присущи не только системе Луна-Земля, любая планета или спутник могут устраивать затмения. Самый эффектный вариант солнечного затмения возникает, когда Сатурн покрывает Солнце (рис. 16.7).

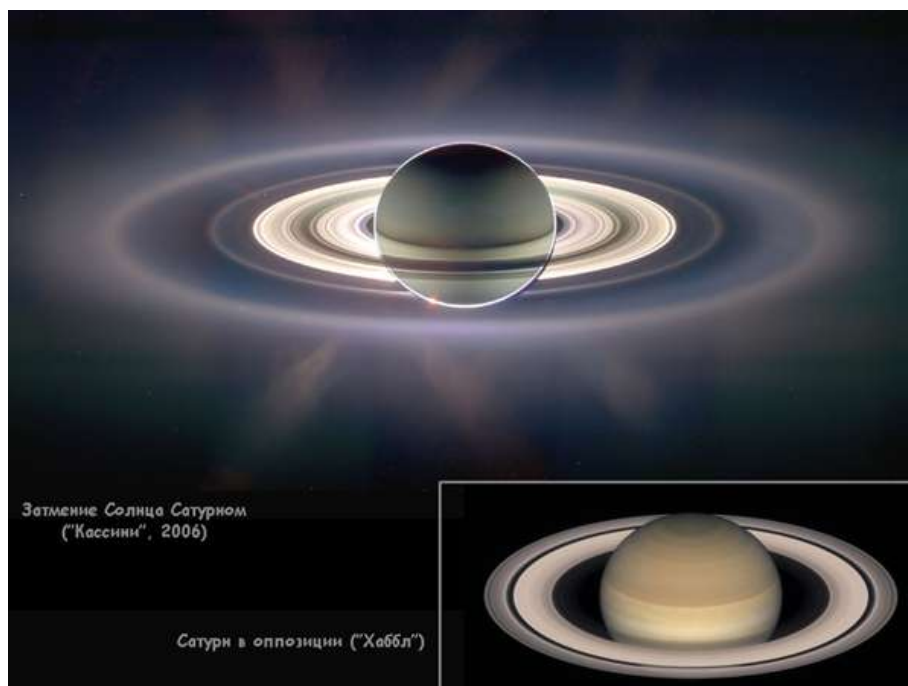


Рис. 16.7. Затмение Солнца Сатурном.

Солнечное затмение тоже является очень важным явлением, которое когда-то продемонстрировало астрономам, что у Солнца есть внешняя часть атмосферы – солнечная корона (рис. 16.8). До сих пор, даже несмотря на то, что у нас есть спутники за пределами Земли, изучать солнечную корону намного проще и интереснее с Земли в моменты солнечного затмения. Это возможно благодаря тому, что угловой размер Луны чрезвычайно близок к угловому размеру фотосферы Солнца.



Рис. 16.8. Фотография короны Солнца.

Астрономы разделяют два понятия: тень и полутень Земли. Тень – это та область, из которой мы вообще не видим источник света (в случае лунного затмения источником является Солнце). Полутень – это та область пространства, из которой мы

частично видим перекрытую Землей поверхность Солнца. В полутень прямой солнечный свет попадает, а в тень он не попадает совсем.

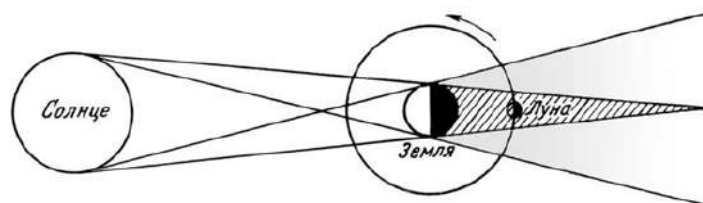


Рис. 16.9. Тень и полутень Земли.

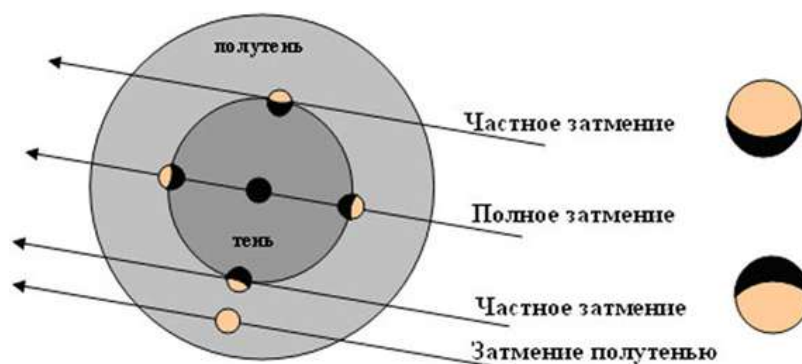


Рис. 16.10. Лунные затмения.

Лунные затмения раньше довольно сильно привлекали астрономов. Луна перестает освещаться Солнцем на продолжительное время больше часа, при этом поверхность Луны начинает охлаждаться. Измеряя инфракрасный поток от лунной поверхности, фактически, температуру лунной поверхности, астрономы еще до первых полетов автоматических станций к Луне, знали структуру лунного грунта. Если бы Луна была твердая, плотная, с хорошей теплопроводностью, то в момент полного затмения ее температура почти не менялась бы, потому что снизу тепло эффективно подходит к поверхности и поддерживает ее температуру. Но Луна, как выяснилось, очень быстро остывает в момент полного затмения, это значит, что ее поверхность имеет высокую пористость.

Поскольку угловой размер лунного диска почти равен угловому размеру солнечного, понятно, что лунная тень едва касается поверхности Земли, а иногда вообще не касается. Когда Луна расположена чуть дальше своего среднего положения, лунная тень не достигает поверхности Земли, но если Луна в перигее, лунная тень может достигать почти 300 км. Размер лунной тени также зависит от географической широты, поскольку экваториальная область Земли ближе к Луне, чем полярные области, на полюсах, как правило, лунная тень не достигает поверхности Земли, а на экваторе имеет максимальный размер. К тому же Земля вращается в том же направлении, куда движется Луна по орбите, но Луна движется со скоростью примерно километр в секунду, а Земля на экваторе вращается со скоростью пол километра в

секунду. Эффективно вращение Земли уменьшает скорость перемещения лунной тени по земной поверхности примерно в полтора раза, поэтому на экваторе лунные и солнечные затмения продолжаются дольше, чем в полярных областях.

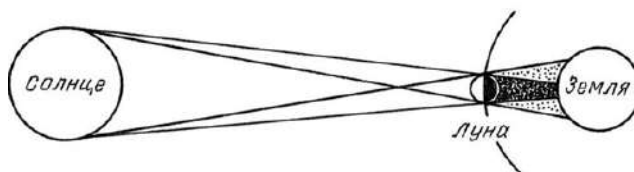


Рис. 16.11. Тень и полутень Луны.

Луна в апогее и в перигее имеет заметно разный угловой размер для земного наблюдателя: в апогее она не способна закрыть собой фотосферу Солнца, в перигее – без труда ее закрывает. Когда Луна находится в районе апогея, мы наблюдаем кольцеобразные солнечные затмения (рис. 16.12). К сожалению, при кольцеобразных солнечных затмениях яркие области фотосферы создают слишком сильный рассеянный свет в земной атмосфере, и корона на этом фоне становится не видна. Однако измерения моментов касания лунного и солнечного дисков с высокой точностью до сотых долей секунды позволяют уточнять теории движения Луны по орбите.



Рис. 16.12. Кольцеобразное солнечное затмение.

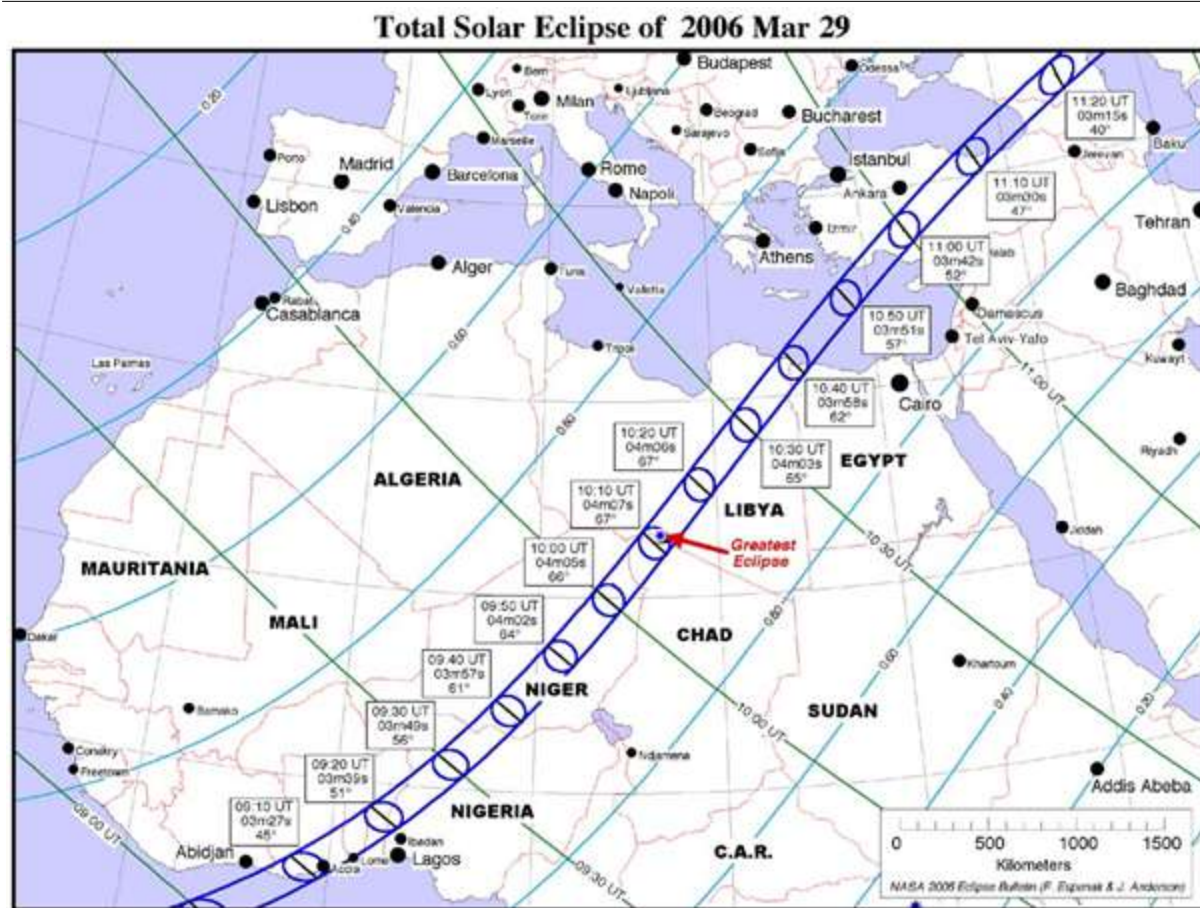


Рис. 16.13. Полное солнечное затмение 29 марта 2006 г.

Наклон лунной орбиты к эклиптике приводит к тому, что либо лунная тень промазывает мимо Земли, либо земная тень промазывает мимо Луны (рис. 16.14). Когда Луна близка к эклиптике, тогда могут произойти и солнечные, и лунные затмения. Условия их наступления можно довольно просто рассчитать (рис. 16.15 и 16.16). При расчете необходимо помнить, что, когда мы имеем в виду лунное затмение, положение наблюдателя на земной поверхности не имеет значения, откуда бы мы не наблюдали затмение Луны, она либо попала в тень Земли, либо не попала. Для расчета видимости солнечного затмения, наоборот, имеет большое значение, на какой географической широте вы находитесь.

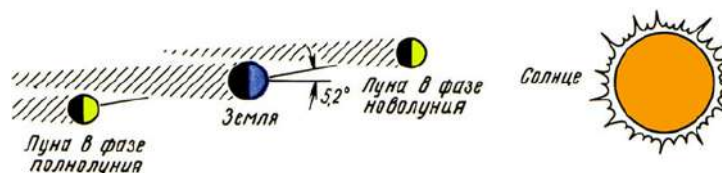


Рис. 16.14. Условия наступления затмений.

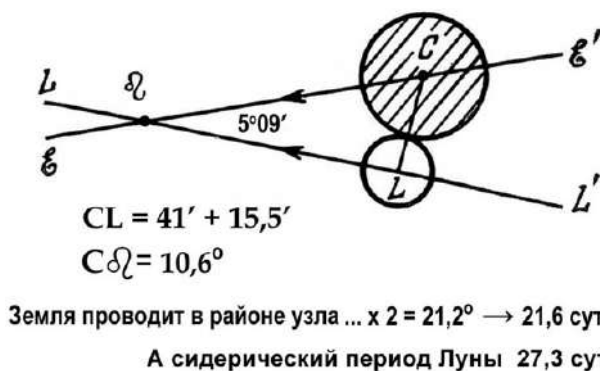


Рис. 16.15. Предельное расстояние центра земной тени от узла лунной орбиты при лунных затмениях.

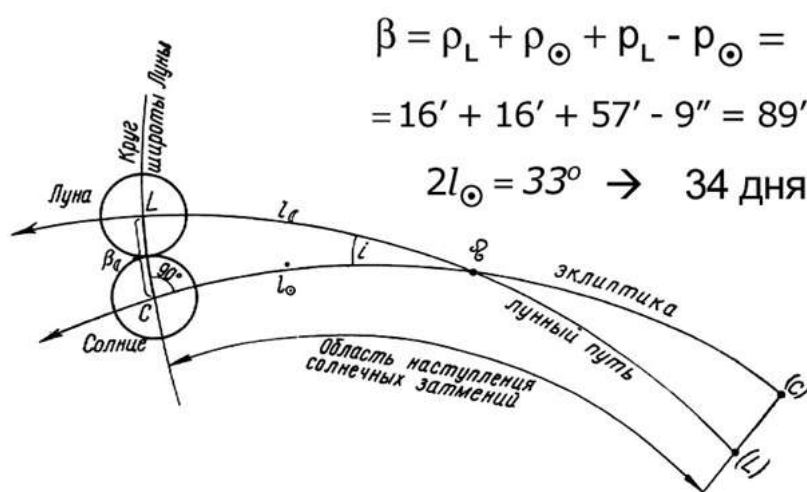


Рис. 16.16. Предельное расстояние центра земной тени от узла лунной орбиты при солнечных затмениях.

Солнечные (с) и лунные (л) затмения

	я	ф	м	а	м	и	и	а	с	о	н	д
2005				с л						с л		
2006			с л						с л			
2007		с л						с л				
2008		с л						с л				
2009	с						с					л
2010	с					л	с					л
2011	с				с л	с				с		л
2012												

Рис. 16.17. Таблица для прогнозов солнечных и лунных затмений.

Сарос – это период (18 лет 11,3 сут. или 18 лет 10,3 сут., если за это время было 5 високосных лет), по прошествии которого в той же последовательности повторяется цикл солнечных и лунных затмений. Причина данного явления заключается в повторении взаимного расположения Солнца, Луны и узлов лунной орбиты на небесной сфере. В течение сароса в среднем происходит 71 затмение (от 64 до 78);

обычно бывает 43 солнечных (от 39 до 48, из них около 10 полных) и 28 лунных (от 25 до 30). Поскольку сарос превышает целое число суток примерно на 8 часов, зона видимости соответствующего затмения в следующем саросе смещается по поверхности Земли на 120° к западу. По прошествии трех саросов затмения наблюдаются вновь примерно в тех же местах Земли.

Покрывтия звезд Луной

Когда Луна, как правило, темным (ночным) краем своего диска закрывает звезду, мы наблюдаем изменения яркости звезды, которые описываются фрейдовской дифракцией на плоском экране точечного или протяженного источника. Аппроксимируя реальные наблюдения теоретической кривой, можно определить угловой размер звезды (рис. 16.18).

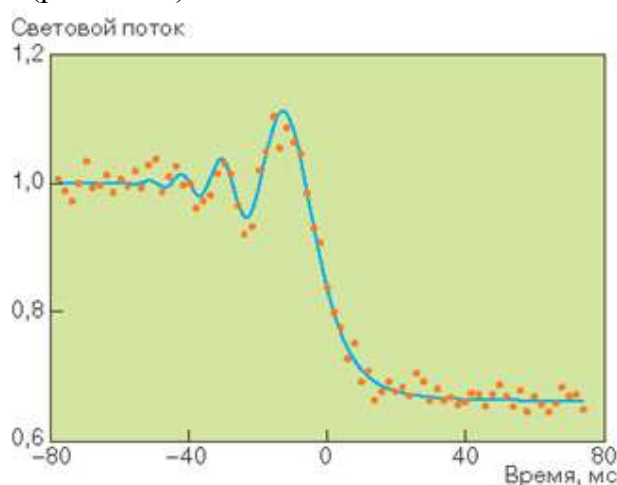


Рис. 2. Кривая покрытия звезды 61 Тельца темным краем Луны, полученная 2 марта 1982 года на 0,5-м телескопе в Тянь-Шаньской высокогорной экспедиции. Время отсчитывается от момента геометрического покрытия. Точки – результаты измерений продолжительностью 2 мс. Сплошная линия – теоретическая кривая изменения блеска при угловом диаметре звезды $0''003$. Световой поток в относительных единицах. Уровень сигнала после покрытия определяется рассеянным светом Луны

Рис. 16.18. Кривая покрытия звезды Луной.

Прохождения

Первое прохождение Венеры по диску Солнца рассчитал Кеплер, но сам не дожидаясь до этого момента 4 декабря 1639 года. На всей Земле только молодой англичанин Хоррокс в Мач-Хуле и его друг В. Крабтри в Манчестере в одинаковые маленькие телескопы наблюдали это явление.

Затем уже в XVIII и даже в XIX веке прохождение Венеры по солнечному диску рассматривали как метод определения расстояния до Венеры, а значит, и измерение

астрономической единицы. Наблюдая из разных точек Земли за траекторией прохождения Венеры по солнечному диску, определяли их длительность. Две хорды на фоне известного известной окружности дают нам угловое расстояние между ними, а это и есть суточный параллакс для разных наблюдателей на поверхности Земли при наблюдении Венеры. Зная размер Земли, географические широты, параллакс радиуса Земли при наблюдении с Венеры, можно вычислить расстояние до Венеры.

М.В. Ломоносов наблюдал прохождение Венеры по диску Солнца 16 мая 1761 года и совершил следующее открытие. Он заметил, что в момент касания Венерой края солнечного диска вдруг появляется выпуклость, в своей публикации Ломоносов назвал эту выпуклость – пупырь на Солнце, и интерпретировал это явление как преломление солнечного света в атмосфере Венеры. В международной практике данный эффект получил название эффекта Ломоносова.

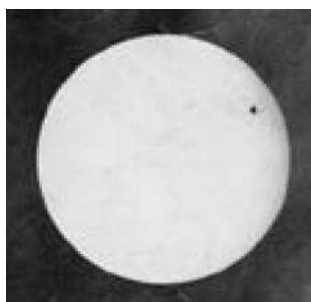


Рис. 16.19. Фотография прохождения Венеры по диску Солнца в 1882 году.



Рис. 16.20. Фотография прохождения Венеры по диску Солнца 8 июня 2004 года.

Прохождение Меркурия по диску Солнца гораздо менее эффектно, поскольку Меркурий имеет такой маленький угловой размер $11''$, что без хорошего телескопа его даже не видно на солнечном диске. Солнечные пятна намного крупнее, чем размер проекции Меркурия на солнечный диск.



ФИЗИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА

teach-in
Л Е К Ц И И У Ч Е Н Ы Х М Г У