

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Елецкий государственный университет им.И.А.Бунина

А. С. Лабузов

e-mail: FARAONAP@YANDEX.RU

**Поверхностные яркости
небесных объектов**

Монография

Елец
2006

Введение

Основными визуальными характеристиками небесных объектов являются: *видимая звёздная величина, угловые размеры, цвет, контраст* с окружающим фоном неба. Все эти характеристики измеряются определёнными единицами, часто не являющимися единицами системы СИ. Причины этого – исторические традиции, которые оказались весьма удобными и потому устойчивыми.

Так, *видимая звёздная величина* измеряется в видимых звёздных величинах, хотя определяется освещённостью, создаваемой в месте наблюдения, и могла бы измеряться в люксах.

Угловые размеры для крупных объектов измеряются в градусах, для меньших – в угловых минутах, для самых маленьких – в угловых секундах, хотя в системе СИ, и даже в компьютерах, для измерения углов принято применять радианы.

Цвет характеризуется часто просто словесно, хотя можно было бы указывать частоту видимого излучения в герцах.

Контраст обычно даётся в процентах и, возможно, только эти единицы соответствуют системе СИ, поскольку процент является вообще просто безразмерной величиной.

И весьма редко упоминается *поверхностная яркость* того или иного небесного объекта, в то время как поверхность яркость несёт немало информации о видимости объекта.

Небесные объекты можно условно разделить на точечные и протяжённые. К протяжённым объектам понятие яркости относится с полным правом и в системе СИ измеряется в кандалах, делённых на метр квадратный.

Однако оказалось, что у протяжённого небесного объекта неудобно измерять его видимую площадь в квадратных метрах. Поэтому поверхностная яркость обычно характеризуется словесно: яркая, слабая, довольно яркая, очень слабая и т.п. (см., например, [30]). А если и измеряется, то для исключительно небольшого числа протяжённых объектов, таких как: Солнце, Луна; иногда для Венеры, Марса, Юпитера, Сатурна. Для точечных объектов понятие яркости с такой точки зрения оказывается вообще неприменимым, поскольку у них нет никакой площади.

Большое количество небесных объектов являются точечными. Прежде всего, конечно, это звёзды. Разумеется, это будет справедливо лишь до известных пределов увеличения, развития технических средств. Из-за отсутствия конкретных числовых значений величин поверхностных яркостей звёзд остаются неизвестными некоторые чисто антропные представления, которые в истории астрономии неоднократно позволяли лучше понять, с чем имеет дело исследователь. Логично думать, что поверхностные яркости звёзд имеют высокие значения.

Планетарные туманности, шаровые скопления и далёкие галактики можно отнести к протяжённым объектам. Однако информация о поверхностной яркости этих объектов сводится, как правило, к вышеуказанному словесному описанию.

Фотографии больших планет Солнечной системы и их спутников, астероидов, туманностей и далёких галактик, сделанные космическими и крупнейшими наземными средствами, бесспорно, приоткрыли глаза на сущность этих далёких объектов. Однако никакая фотография и никакой современный компьютерный монитор не способны передать данный самой природой уровень поверхностной яркости

изображённых объектов.

Поэтому *актуальность* выбранной темы состоит в решении проблемы отсутствия конкретных числовых значений поверхностных яркостей небесных объектов.

В данном исследовании использована литература, которую можно распределить по следующим разделам:

1. Хорошо зарекомендовавшие себя учебники и учебные пособия по астрономии для астрономических отделений университетов. Необходимость использования этой литературы продиктована тем, что классические основные понятия, использованные в работе, должны иметь чёткие определения. Известные формулы приводятся в общепринятом виде.
2. Астрономические каталоги, содержащие необходимые исходные данные для расчётов поверхности яркости небесных объектов.
3. Астрономические календари, отражающие динамику видимости небесных объектов и научных представлений о них.
4. Монографии по астрономии отечественных и зарубежных авторов. Сюда входят книги, посвящённые наблюдениям и исследованиям больших планет Солнечной системы, астероидов, диффузных и планетарных туманностей, шаровых скоплений, галактик.
5. Справочники по физике, необходимые для уточнения графиков эмпирических функций.
6. Учебники по физике и оптике для пояснения принципа устройства и действия телескопа.
7. Учебники по математике для оптимизации и ускорения расчётов.

8. Учебники по математической статистике для обработки полученных результатов.

9. Монографии по физиологии зрения и зрительного восприятия.

10. Авторские публикации по теме исследования.

Личные наблюдения небесных светил, наблюдения членов астрономических кружков и студентов, изучающих астрономию, изучение публикаций по астрономии поставили ряд вопросов. Почему в телескоп, который по своей конструкции не может повышать яркость протяжённых объектов, становятся видимыми слабые протяжённые объекты, не видимые простым глазом? Почему Луна в телескопе ослепляет глаз, после чего этим глазом некоторое время в сумерках плохо видно? Доступна ли та или иная галактика данному телескопу?

Поставленные вопросы и привели к пониманию существования проблемы отсутствия конкретных числовых значений поверхностных яркостей небесных объектов. Возникла также необходимость в нахождении чётких числовых критериев видности самого объекта и его цвета.

Целью предпринимаемого исследования является вычисление поверхностных яркостей небесных объектов в удобных единицах измерения, анализ полученных результатов и нахождение закономерностей в них.

Для достижения поставленной цели предполагается решить следующие задачи:

- изучить влияние основных визуальных характеристик небесных объектов на видимость этих объектов;
- указать формулу для вычисления поверхностных яркостей небесных объектов и ввести новую единицу измерения поверхностных

- яркостей по этой формуле;
- рассчитать поверхностные яркости различных небесных объектов;
 - обнаружить закономерности в значениях поверхностных яркостей небесных объектов;
 - указать критические числовые значения визуальных характеристик небесных объектов, при переходе через которые происходят качественные изменения в видимости небесных объектов.

Объектом исследования являются визуальные наблюдения небесных тел как неотъемлемая часть получения важнейшей информации о природе небесных тел и процессах, происходящих с ними.

Предметом исследования является поверхностная яркость небесных тел, воспринимаемая глазом непосредственно, несущая немалую долю важнейшей информации о небесных телах.

Методами исследования в данной работе являются астрономические наблюдения, математические расчёты, статистические методы обработки экспериментальных данных, методы линейной алгебры.

Используя справочные данные о видимой звёздной величине, угловых размерах, расстояниях до объектов, линейных размерах объектов, принадлежности объектов к какому-либо типу, о светимостях, цвете, путём упорядочения всей этой информации в соответствующих таблицах по впервые предложенной формуле вычисляется поверхностная яркость небесных объектов и производится статистический анализ полученных новых результатов. Одновременно с этими расчётами производится их сравнение с результатами, полученными ранее, с целью подтверждения правильности новых выводов.

В ходе исследования обнаруживаются определённые критические значения видимой звёздной величины, угловых размеров, поверхностной яркости, при переходе через которые происходят заметные качественные изменения в видимости небесных объектов, численно не всегда отраженные в соответствующей литературе.

Монография состоит из введения, основной части, заключения и библиографического списка литературы. Основная часть изложена в двух главах. Первая глава посвящена изложению необходимых сведений о телескопе, описанию основных визуальных характеристик небесных объектов и их влиянию на видимость объектов. Вторая глава содержит вычисления поверхностной яркости небесных объектов, распределённых по традиционным группам. Проводится анализ и объяснение получающихся результатов.

Все результаты, излагаемые в монографии, докладывались автором на межвузовских научно-практических конференциях, проводимых в Липецком государственном педагогическом институте и в Елецком государственном университете имени И.А.Бунина, а также были опубликованы в [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35].

Глава 1. Основные визуальные характеристики небесных объектов

1.1. Необходимые сведения о телескопе

Оптические телескопы, предназначенные для различных, в том числе и визуальных, астрономических наблюдений, в большинстве случаев строятся по системе Кеплера.

Главной частью любого оптического телескопа является его объектив. Объективом может служить система линз или вогнутое зеркало. Предполагая качество объектива весьма высоким, можно в известной степени не проводить различия между линзовым и зеркальным объективом.

Рассмотрим принципиальную схему действия оптического телескопа системы Кеплера на примере телескопа с линзовым объективом, рис.1.

В системе Кеплера объектив собирает падающие на него параллельные лучи света от удалённого объекта и, превращая их в сходящиеся, строит из них в своей задней фокальной плоскости промежуточное изображение АС объекта.

На рис.1 показаны три пучка параллельных лучей, падающих на линзовый объектив: ($E_1E ; P_1P ; V_1V$) , ($E_2E ; V_2V$) и ($E_3E ; P_3P ; V_3V$). Преломляясь, они образуют в задней фокальной плоскости объектива соответственно три точки С, S и A.

Образовав промежуточное изображение, сходящиеся лучи, распространяясь далее за фокальную плоскость, становятся уже расходящимися. Чтобы нормальный глаз, помещённый на их пути,

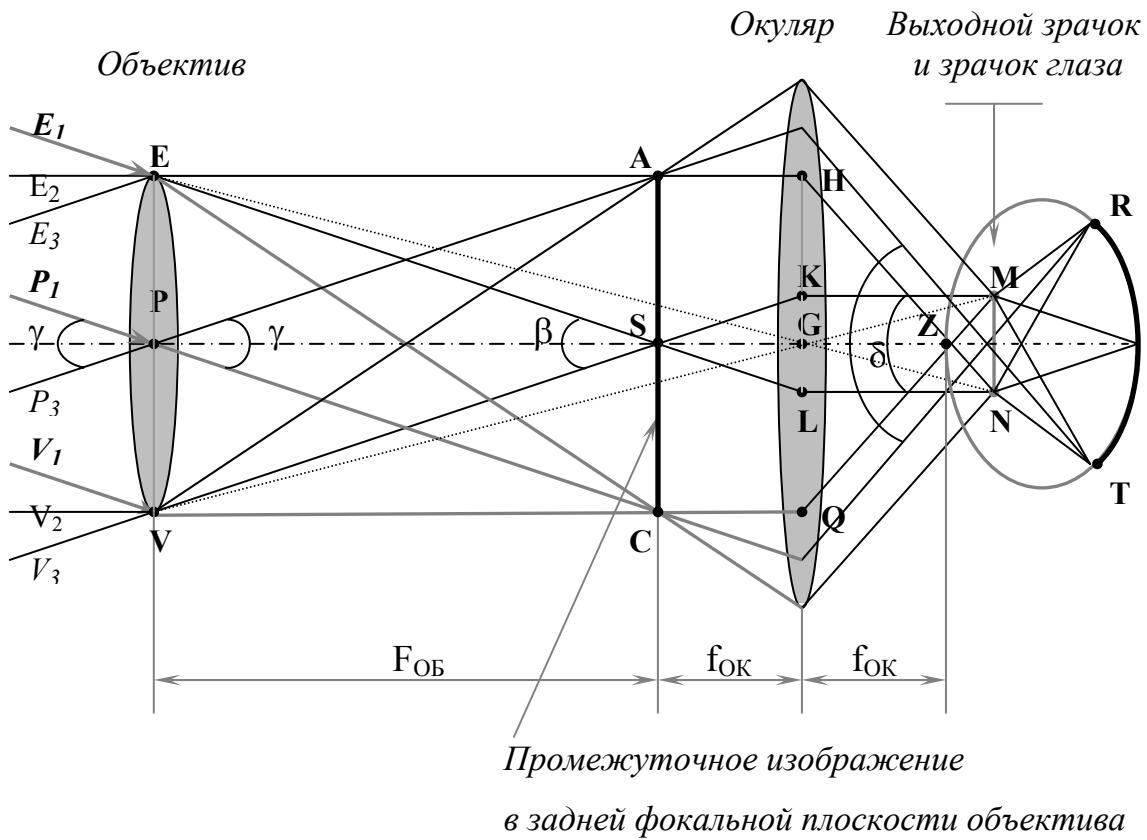


Рис. 1. Схема оптического телескопа системы Кеплера с линзовым объективом.

мог без напряжения рассматривать промежуточное изображение необходимо эти расходящиеся лучи снова превратить в параллельные.

Для этой цели используется окуляр, являющийся, как правило, системой линз. Передняя фокальная плоскость окуляра совмещается с задней фокальной плоскостью объектива, и, таким образом, расходящиеся лучи промежуточного изображения, преломившись в окуляре, выходят из последнего параллельными¹.

¹ Чтобы не происходила потеря света, конструкция окуляра рассчитывается таким образом, чтобы расходящийся пучок к тому же ещё и весь охватывался окуляром.

Теперь эти параллельные лучи, преломившись на роговице глаза наблюдателя, попав в зрачок и пройдя другие его оптические среды, образуют на сетчатке окончательное изображение RT. Отличительной особенностью системы Кеплера и является как раз наличие промежуточного изображения. Поэтому к телескопам первого типа, безусловно, относятся хорошо известные и так называемые классические рефракторы, рефлекторы и зеркально-линзовые телескопы.

Суть увеличения оптического телескопа состоит в том, что телескоп увеличивает угол γ и превращает его в угол δ . Т.е. если невооружённому глазу удалённый объект был виден под углом γ , то в телескопе удалённый объект представляется видимым под увеличенным углом δ .

Достаточно просто связать между собой не сами углы γ и δ , а тангенсы половин этих углов. Поэтому появляется величина M:

$$M = \frac{\operatorname{tg} \frac{\delta}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}},$$

которая называется *угловым увеличением телескопа* или, чаще, просто *увеличением телескопа*.

Нетрудно заметить, что

$$PS \cdot \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} = AS; \quad GZ \cdot \operatorname{tg} \frac{\delta}{2} = HG.$$

Так как HG=AS, то

$$PS \cdot \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} = GZ \cdot \operatorname{tg} \frac{\delta}{2}.$$

Так как PS = F_{OB}, а GZ = f_{OK}, где F_{OB} и f_{OK} – фокусные расстояния

объектива и окуляра соответственно, то

$$F_{OB} \cdot \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} = f_{OK} \cdot \operatorname{tg} \frac{\delta}{2}.$$

Откуда

$$\frac{\operatorname{tg} \frac{\delta}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}} = \frac{F_{OB}}{f_{OK}}.$$

А, значит,

$$M = \frac{F_{OB}}{f_{OK}}.$$

Угловое увеличение M можно так же вычислить по формуле:

$$M = \frac{D}{d},$$

где D – диаметр *входного зрачка* телескопа, а d – диаметр *выходного зрачка* телескопа, выраженные, естественно, оба в одних и тех же единицах измерения, например, в миллиметрах.

Входным зрачком телескопа принято считать объектив телескопа. А что же представляет собой выходной зрачок?

Настроим телескоп на «бесконечность» и наведём его на какую-либо достаточно светлую, удалённую и обширную поверхность, например, на дневное небо. Смотря обоими глазами с расстояния 30-50 см сквозь окуляр телескопа, за счёт стереоскопичности зрения можно увидеть перед окуляром маленький яркий кружок. Этот кружок и есть выходной зрачок телескопа. Если же этот кружок имеет относительно крупный размер – 3-5 мм, то через него легко увидеть, что кружок является ничем иным как уменьшенным действительным изображением объектива телескопа. Проследив весь ход лучей в

телескопе, станет ясно, что это изображение объектива телескопа даёт его окуляр.

Действительно, проводя от объектива лучи EH, EG, VG и VQ, видим, что они пройдут через окуляр по HN, GN, GM и QM соответственно. HN и GN, пересекаясь, дадут точку N, а GM и QM - точку M. Отсюда следует, что MN будет уменьшенным, перевёрнутым, действительным изображением объектива, даваемого окуляром.

Далее:

$$PS \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = PE; \quad VE = 2PE = 2PS \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}.$$

Так как диаметр объектива $D=VE$, $PS=F_{OB}$, то

$$D = 2F_{OB} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}.$$

Также:

$$SG \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = GK, \quad LK = 2GK = 2SG \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}.$$

И так как $SG=f_{OK}$, то

$$LK = 2f_{OK} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}.$$

Очевидно, что LK равен диаметру изображения объектива MN. Отсюда следует, что

$$MN = 2f_{OK} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}.$$

Разделим выражение для диаметра объектива D на выражение для MN, получим:

$$\frac{D}{MN} = \frac{2F_{OB} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}{2f_{OK} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} = \frac{F_{OB}}{f_{OK}} = M.$$

Значит, через отношение диаметра объектива D и диаметра изображения этого объектива MN также можно вычислить увеличение телескопа M . Обозначая MN за d и называя d выходным зрачком телескопа, окончательно получим, что увеличение M действительно может быть вычислено по формуле:

$$M = D/d.$$

На листе белой бумаги можно получить резко очерченное и яркое изображение выходного зрачка, изменяя расстояние между листом и окуляром. Следовательно, можно сделать вывод о том, что выходной зрачок телескопа есть наименьшее сечение светового пучка, выходящего из окуляра. Причём это сечение есть место, где наиболее сильно сконцентрирована световая энергия, собранная объективом.

При наблюдениях через телескоп зрачок глаза наблюдателя должен быть совмещён с выходным зрачком телескопа. При этом, во-первых, есть наибольшая вероятность, что зрачку глаза удастся охватить весь световой поток, прошедший через телескопическую систему, а, во-вторых, у наблюдателя появляется ощущение, что он наконец-то заглянул в окуляр: края поля зрения становятся резкими, обзору доступно всё поле зрения, возникает чувство удобства.

Как теперь легко понять, диаметр выходного зрачка телескопа не должен превосходить диаметра зрачка. В противном случае часть всего света, собранного объективом, не будет проходить в глаз, т.е. будет теряться, и, следовательно, светособирающее свойство объектива будет использоваться нерационально.

Ночью диаметр зрачка нормального глаза у людей молодого возраста составляет 6-8мм и может увеличиваться вплоть до 9мм. Обычно его принимают равным 6 мм в ночных условиях [23, С.41], [30, С.8], [33, С.15, 16].

Следовательно, в ночных условиях диаметр выходного зрачка телескопа должен быть не более 6 мм. Тем самым, приходим к выводу о существовании *наименьшего полезного увеличения* телескопа:

$$M_{\text{НАИМ.}} = \frac{D_{\text{ММ}}}{6},$$

где $D_{\text{ММ}}$ – диаметр объектива в миллиметрах. $M_{\text{НАИМ.}}$ в этом случае называют *ночным равнозрачковым увеличением*. Днём диаметр зрачка глаза составляет 1,5-3мм, и наименьшее полезное увеличение телескопа, естественно, может быть повышено, тогда оно называется *дневным равнозрачковым увеличением*. Диаметр зрачка глаза в миллиметрах обозначим через $d_{\text{ММ}}$.

Астрономические объекты, наблюдаемые глазом, распределим на два вида: *точечные и протяжённые*.

Точечными объектами будем считать те, у которых глаз не в состоянии различить пространственной протяжённости, не может разглядеть формы: объект представляется мелкой точкой, не имеющей ощутимой площади. Объект становится точечным для глаза, когда угловые размеры объекта становятся меньше разрешающей способности глаза. *Разрешающей способностью глаза* будем называть наименьшее угловое расстояние, которое ещё можно различить глазом между отдельными точками. Таким образом, точечными астрономическими объектами для невооружённого глаза являются, например, звёзды.

Протяжёнными объектами будем считать те, у которых глаз может подметить некоторую пространственную протяжённость, может судить о наличии некоторой формы ощутимых размеров. Угловые размеры протяжённого объекта превышают разрешающую способность глаза. Протяжёнными астрономическими объектами для невооружённого глаза будут, конечно, Солнце, Луна, а также некоторое количество галактик.

Предположим теперь, что мы рассматриваем через телескоп отдельные звёзды.

Линейные размеры изображения в фокальной плоскости объектива, например АС, будут тем больше, чем больше фокусное расстояние объектива, так как:

$$AS = PS \cdot \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}; \quad AC = 2AS = 2PS \cdot \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}; \quad PS = F_{OB};$$

откуда

$$AC = 2F_{OB} \cdot \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}.$$

Однако, из-за чрезвычайной удалённости звёзд $\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}$ настолько мал, что ни один из существующих ныне объективов не может построить изображений звёзд с заметными линейными размерами.

Изображением звезды в фокальной плоскости объектива будет мелкая дифракционная картина из центрального дифракционного диска и чередующихся концентрических чёрных и белых колец резко убывающей яркости. Размерами этой картины будем пренебрегать, следовательно, изображения звёзд в фокальной плоскости объектива будут точечными, как бы мы ни увеличивали F_{OB} до известных пределов. Впрочем, освещённость места, занимаемого дифракцион-

ным изображением звезды в фокальной плоскости объектива, будет практически прямо пропорционально зависеть только от количества света этой звезды, собранного сюда объективом, т.е. будет прямо пропорциональна только площади объектива, проще – D^2 .

Будем теперь рассматривать эти изображения с помощью различных окуляров, дающих увеличения не меньшие равнозрачкового. На сетчатке глаза получатся окончательные изображения звёзд. Однако опять, по всей той же причине удалённости, какие бы разумные увеличения мы не применяли с помощью окуляров: от наименьшего полезного до такого, когда становятся сильно заметными дифракционные явления, что приводит к размыванию изображения звезды по сетчатке и ведёт к очевидному снижению видимого блеска звезды, – большинство звёзд мы не сможем увидеть протяжёнными объектами ни в один из существующих ныне телескопов.

Звёзды в телескоп будут опять казаться точками, правда, как легко теперь разобраться, во столько раз более яркими, чем для невооружённого глаза, во сколько D_{MM}^2 больше $d_{MM}^2 = 6^2 = 36$. Потерями света в телескопе будем пренебрегать.

Отсюда следует, что через телескоп мы можем видеть более слабые звёзды, чем те, которые мы можем видеть невооружённым глазом.

Теперь предположим, что мы рассматриваем через телескоп какой-то протяжённый объект. В данном случае в фокальной плоскости объектива получится протяжённое изображение этого объекта. Освещённость в пределах этого изображения будет изменяться в точности как D^2 / F_{OB}^2 , линейные размеры этого

изображения будут изменяться как F_{OB} , площадь – как F_{OB}^2 .

Отношение D^2/F_{OB}^2 называется *светосилой* объектива, D/F_{OB} – *относительным отверстием*.

Будем сначала рассматривать это изображение в окуляр, дающий наименьшее полезное увеличение. На сетчатке при этом получится некоторое окончательное протяжённое изображение объекта.

Заменим теперь окуляр на другой, дающий немного большее увеличение – выходной зрачок немного уменьшится.

В результате этого изображение на сетчатке увеличит свою площадь, однако количество света, попадающего в глаз, останется прежним, а, распределяясь по большей площади изображения, создаст меньшую освещённость в пределах этой площади на сетчатке. От этого видимая поверхностная яркость протяжённого объекта будет сравнительно меньше, чем при наименьшем полезном увеличении.

Поэтому видимая в телескоп поверхностная яркость протяжённого объекта будет наибольшей при наименьшем полезном увеличении.

1.2. Видимая звёздная величина

Звёзды представляются невооружённому глазу светящимися мерцающими точками различной яркости. Ещё во II в. до н.э. древнегреческий астроном Гиппарх распределил все видимые невооружённым глазом звёзды по их яркости на шесть классов. Такое количество классов, возможно, было выбрано им потому, что оно относительно невелико, внутри одного класса различия в яркости

звёзд на первый взгляд не столь заметны, а различие в яркости звёзд между разными, даже близкими по яркости, классами, уже ощутимо.

Каждому классу Гиппарх поставил в соответствие натуральное число по следующему принципу: классу самых ярких звёзд – «единицу», следующему непосредственно за этим классом классу менее ярких звёзд – «двойку», следующему – «тройку» и так далее в порядке убывания яркости, классу же самых слабых звёзд, едва видимых на пределе возможностей невооружённого глаза, – «шестёрку». Соответственно и звёзды получили такие же числа классов, которым принадлежали. Этими числами Гиппарх впервые стал измерять яркость звёзд.

Единица измерения, вычисляемой таким образом яркости звёзд, называется *визуальной* или *видимой звёздной величиной* и приписывается после соответствующего числа в виде латинской буквы *m* (от латинского слова *magnitudo* – величина), стоящей как бы в показателе числа: 1^m ; 2^m ; ...; 6^m . Например, 3^m читается так: «третья видимая звёздная величина» или «третьей видимой звёздной величины» – в зависимости от контекста.

Прилагательное «видимая» означает, что такой величины будет яркость звезды при наблюдении глазом. Ведь, как известно, электромагнитное излучение разных звёзд весьма неодинаково по своему спектральному составу. Глаз, в свою очередь, в силу природной обусловленности имеет неодинаковую чувствительность во всём доступном ему для видимости диапазоне электромагнитных волн: примерно от 390 нм до 760 нм.

Как показали исследования разных наблюдателей, в среднем, чувствительность глаза имеет довольно резко выраженный максимум

при длине волны $\lambda = 555$ нм и достаточно быстро, почти симметрично, спадает к обоим концам видимого диапазона электромагнитных волн. Эти данные были получены в условиях дневного освещения, когда восприятие света происходит за счёт работы колбочек сетчатки.

В условиях же низкой,очной освещённости чувствительность глаза также имеет резко выраженный максимум, однако он приходится на длину волны $\lambda = 500 - 450$ нм [25, С.208]. Чувствительность также несимметрично и быстро спадает к концам видимого диапазона, который в таких условиях находится в пределах примерно от 390 нм до 640 нм, практически теряя свою красную часть.

Результаты этих исследований обычно представляются в виде усреднённой *кривой видности*, две из которых – для дневного и ночного освещения – изображены на рис.2 [21, С.166].

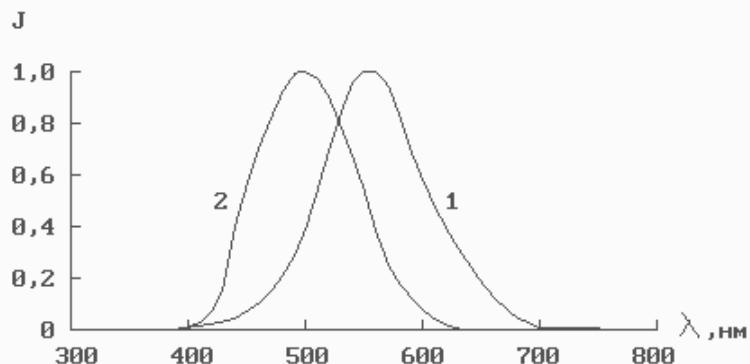


Рис.2. Чувствительность глаза J в зависимости от длины волны λ при освещении: 1 – дневном; 2 – ночном.

Таким образом, яркость звёзд, оцениваемая глазом, может оказаться иной, если её находить с помощью других приёмников излучения: фотопластинки, болометра. В таких случаях яркость звёзд измеряют соответственно в фотографических, болометрических и др. звёздных величинах.

Вообще говоря, термин «яркость» применяется к протяжённым объектам, у которых глаз способен подметить некоторую пространственную протяжённость, быть может, некоторую форму, пусть, едва ощутимых размеров. Звёзды, по крайней мере, для невооружённого глаза, да и для достаточно крупных телескопов являются не протяжёнными, а точечными объектами.

Поэтому термин «яркость» для звёзд был заменён на более удобный термин «блеск».

Блеск звезды – это освещённость, создаваемая звездой в месте наблюдения; измеряется в соответствующих звёздных величинах [24, С.108,109]. Поскольку и глаз, и другие приёмники излучения фактически реагируют на освещённость, созданную небесным объектом в месте попадания излучения на светочувствительную область, и так как освещённость могут создавать не только точечные, но и протяжённые объекты, то термин «блеск» оказался удобным. Его можно применять и к протяжённым объектам, измеряя их *общий блеск* также в соответствующих звёздных величинах.

Однако и термин «блеск» часто заменяют словами «видимая звёздная величина», «визуальная звёздная величина» или, если нет разного толкования, то и просто – «звёздная величина». Получается: видимая звёздная величина звезды измеряется в видимых звёздных величинах.

В середине XIX в. были сделаны измерения освещённостей E_1 и

E_6 , создаваемых звёздами 1^m и 6^m . Оказалось, что отношение E_1 / E_6 равно приблизительно 97,66. На основе этого в 1857 г. английский астроном Н.Р.Погсон предложил принять это отношение равным в точности 100. Если при этом считать, что при переходе от звёзд 1^m ко 2^m , от 2^m к 3^m , от 3^m к 4^m и т.д. освещённости убывают в одно и тоже число раз q , то, используя соотношение между членами геометрической прогрессии, можно найти q :

$$\frac{E_1}{E_6} = 100; \quad \frac{E_1}{E_6} = q^{6-1}; \quad q^5 = 100; \quad q = \sqrt[5]{100} \approx 2,512.$$

Число $q \approx 2,512$ назовём *числом Погсона*.

Дальнейшие измерения блеска звёзд привели к тому, что появились более точные значения блеска, например: α Большой Медведицы имеет блеск $1,95^m$; α Овна – $2,23^m$. Некоторые наиболее яркие звёзды, такие как Вега (α Лиры), Капелла (α Возничего), оказались даже ярче 1^m и имеют блеск соответственно $0,14^m$ и $0,21^m$. А две звезды – Канопус (α Киля) и Сириус (α Большого Пса) оказались ярчайшими звёздами всего неба; их блеск измеряется отрицательными числами $-0,9^m$ и $-1,58^m$ соответственно.

Звёзды слабее 6^m , доступные наблюдениям лишь в телескопы¹, продолжили значения блеска в сторону «плюс бесконечности». Так, многочисленные слабые звёзды рассеянного звёздного скопления

¹ В особых условиях: при очень чистом воздухе тёмной ночью высоко в горах, в местностях с хорошим астроклиматом, зоркому глазу могут быть доступны в зените звёзды до 8^m .

Плеяды, недоступные невооружённому глазу, но становящиеся видимыми в небольшой бинокль с диаметром объектива всего в 30мм, получились имеющими блеск 7^m , 8^m , 9^m и промежуточных между этими числами значений. Современным телескопам с использованием передовых методов регистрации излучения доступны звёзды до $\sim 26^m$.

Были измерены видимые звёздные величины Солнца, Луны, больших планет и многих других весьма разнообразных небесных объектов. Сведения о некоторых из них ([25, С.172, 206, 505], [30, С.47, 82, 95, 126], [24, С.337], [1-17]) приведены в табл.1.

Таблица 1

Примеры видимых звёздных величин некоторых объектов

Объект	Видимая звёздная величина	Примечание
Солнце	$-26,8^m$	—
Луна	$-12,7^m$	в полнолунии
Меркурий	$-1,4^m$	в среднем, при фазе 1,00
Венера	$-3,5^m$	в среднем, при фазе 1,00
Марс	$-2,5^m$	в великом противостоянии
Юпитер	$-2,0^m$	в противостоянии
Сатурн	$0,3^m$	в противостоянии, с кольцом
Уран	$5,7^m$	в противостоянии
Нептун	$7,7^m$	в противостоянии
Плутон	$15,0^m$	без Харона
Титан	$8,4^m$	спутник Сатурна
Веста	$6,5^m$	астероид
M 3	$6,4^m$	шаровое скопление
M 27	$7,6^m$	планетарная туманность
M 44	$3,7^m$	рассеянное скопление
M 74	$10,2^m$	галактика

Тщательными фотометрическими измерениями многих звёзд было получено, что звезда 0^m на границе земной атмосферы создаёт освещённость $E_0 = 2,48 \cdot 10^{-8} \text{ Вт / м}^2$ [25, С.171, 172].

Сравним E_0 с *солнечной постоянной* $Q=(1366\pm4) \text{ Вт / м}^2$, определяемой как полное количество лучистой солнечной энергии, проходящей за единицу времени через единицу площади, перпендикулярной направлению на Солнце и расположенную за пределами земной атмосферы, на расстоянии 1 а.е. [25, С.236].

$$\frac{Q}{E_0} = \frac{1366 \text{ Вт / м}^2}{2,48 \cdot 10^{-8} \text{ Вт / м}^2} \approx 5,51 \cdot 10^{10};$$

С другой стороны, число Q соответствует освещённости $E_{-26,8}$, создаваемой Солнцем, имеющим $-26,8^m$. Поэтому должно выполняться соотношение:

$$\frac{Q}{E_0} = \frac{E_{-26,8}}{E_0} = q^{0-(-26,8)} = q^{26,8},$$

где q – число Погсона.

Однако $q^{26,8} \approx 2,512^{26,8} \approx 5,25 \cdot 10^{10}$, что несколько меньше Q/E_0 . Получившееся небольшое расхождение может быть связано с тем, что солнечная постоянная Q определяется от всего солнечного спектра, а E_0 – только от видимой части непохожего на солнечный спектра средней звезды 0^m .

Как бы то ни было, звёздная величина является важнейшей характеристикой видимости небесного объекта, обоснованной научно и проверенной исторической практикой.

Большинство наблюдаемых невооружённым глазом звёзд имеют одинаковый голубовато-белый цвет. Однако у некоторых, как правило, достаточно ярких звёзд можно заметить, что они могут иметь другой свой собственный цвет. Чаще всего, это красный, оранжевый, жёлтый, белый и их разнообразные оттенки. Например, Арктур (α Волопаса) имеет оранжевый цвет, Антарес (α Скорпиона) – красный, Капелла (α Возничего) – жёлтый, Вега (α Лиры) – белый, Спика (α Девы) – голубовато-белый. Сириус (α Большого Пса) – вспыхивает, мерцает, переливается всеми цветами радуги: преобладает белый цвет, но проскаивают и красные, и сиреневые, и зелёные, и др. тона.

Продолжая всматриваться в цвет звёзд, можно заметить [32, С.138], что не только такие яркие звёзды обнаруживают цвета, отличные от единообразного голубовато-белого. Аламак (γ Андromеды) имеет $2,28^m$, Хамаль (α Овна) – $2,23^m$, Этамин (γ Дракона) – $2,42^m$ и позволяют едва-едва на пределе чувствительности глаза заметить, что все они имеют оранжевый цвет.

Известно, что Полярная звезда (α Малой Медведицы) уже в небольшой бинокль с диаметром объектива 30мм обнаруживает свой жёлтый цвет, в то время как невооружённым глазом жёлтый цвет Полярной звезды заметить не удается, и она выглядит голубовато-белой. Видимая звёздная величина Полярной звезды находится в пределах $2,5^m$ – $2,6^m$ – меняется, так как Полярная звезда является цефеидой.

Сравнивая возможность увидеть истинный цвет звёзд Аламак, Хамаль, Этамин и невозможность обнаружить таковой у Полярной

звезды, можно сделать вывод, что если некоторая звезда ярче $2,5^m$, то невооружённым глазом виден её истинный цвет, если же звезда слабее $2,5^m$, то её истинный цвет не может быть обнаружен невооружённым глазом. Значение $2,5^m$ в этом смысле является пограничным, а его точность – вполне достаточной, так как, безусловно, зависит от индивидуальных особенностей наблюдателя. Главное в том, что такое пограничное значение есть.

Рассмотрим знаменитую «гранатовую звезду» – μ Цефея. Её блеск изменяется довольно неправильным образом в пределах от $3,6^m$ до $5,1^m$.

Видимо, не случайно, а из-за того, что он никогда не бывает ярче $2,5^m$, про то, что μ Цефея – «гранатовая», мы узнали не от астрономов древности, а от Вильяма Гершеля (1738-1822), который только в телескоп разглядел, что μ Цефея оранжево-красная, и назвал её «гранатовой звездой» (garnet star). Теперь, вооружившись даже небольшим 30-миллиметровым биноклем, а лучше, например, 4-дюймовым рефлектором (так как рефлекторы не дают хроматическую aberrацию), можно также, как и Вильям Гершель, убедиться, что μ Цефея имеет действительно интенсивный оранжево-красноватый цвет.

Планеты по своему виду для невооружённого глаза ничем не отличаются от звёзд, кроме только того, что звёзды мерцают, а планеты не мерцают. Из девяти больших планет невооружённому глазу доступны только пять: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер, Сатурн. Уран хотя и может быть ярче 6^m , однако, никогда не бывает

ярче $5,5^m$ (см., например, [2]), а потому не был замечен среди прочих слабых звёзд до тех пор, пока не был случайно найден тем же В.Гершелем в 1781 году с помощью телескопа по видимому диску.

Для пяти доступных невооружённому глазу планет замечательно то, что все они всегда видимы невооружённым глазом в своём истинном цвете, который не изменяется и при наблюдениях в телескопы для диска планеты в целом.

Наиболее «капризен» в этом отношении Марс. В периоды своей наихудшей видимости его блеск падает до 2^m (см., например, [5, C.56], [7, C.56], [9, C.55]), однако и в это время Марс не теряет для простого глаза своего неизменного красно-оранжевого цвета [32, C.138]. Это ещё раз подтверждает правильность выбора пограничного числа $2,5^m$. Если случается Аресу¹ с блеском 1^m-2^m проходить на небе мимо Антареса ($1,22^m$), то Марс отличается от «Соперника Марса» отсутствием звёздного мерцания. По цвету они очень схожи, что было замечено астрономами древности.

Невозможность рассмотреть невооружённым глазом истинный цвет слабых звёзд, очевидно, объясняется тем, что освещённость в месте изображения слабой звезды на сетчатке недостаточна для того, чтобы на неё реагировали колбочки сетчатки. Ведь, как известно, цветное зрение обеспечивается именно колбочками, но для их «включения» необходим определённый высокий уровень освещённости [23, C.41], [38, C.263–265], [40, C.44, 171–176].

Одно из основных назначений телескопа – это собирание

¹ Арес – в греческой мифологии бог войны, ему соответствует римский Марс.

большего, чем у зрачка глаза, потока света от небесного объекта. Для того, чтобы весь собранный объективом телескопа поток света попал в зрачок глаза, необходимо, чтобы на телескопе было установлено увеличение не меньшее, чем равнозрачковое увеличение M_{P3} [30, С.7], являющееся одновременно и минимальным полезным увеличением:

$$M_{P3} = \frac{D_{MM}}{d_{MM}}, \quad (1)$$

где D_{MM} – диаметр объектива телескопа в миллиметрах; d_{MM} – диаметр зрачка глаза в миллиметрах. При таких наблюдениях в телескоп с диаметром объектива D_{MM} в зрачок глаза попадёт примерно¹ в $(M_{P3})^2$ раз больше света, чем в зрачок диаметром d_{MM} невооружённого глаза. Поскольку и в крупные телескопы звёзды видны как точки, то в телескоп они будут ярче, чем простым глазом, примерно в $(M_{P3})^2$ раз.

Для вычисления самой слабой звёздной величины m_{PP} , видимой на пределе глазом в телескоп с диаметром объектива D_{MM} , воспользуемся формулой [24, С.157]:

$$m_{PP} \approx 2,0^m + 5 \lg D_{MM}. \quad (2)$$

Применим формулу (2) для 30-миллиметрового рефрактора:

$$m_{PP} \approx 2,0^m + 5 \lg 30 \approx 9,39^m.$$

Это значит, что звёзды $9,39^m$ будут видны в такой телескоп как 6^m для невооружённого глаза. Тогда μ Цефея, находясь даже в состоянии

¹ Какое-то количество света теряется при отражении от поверхностей (~4%) и в стекле (~10%), но будем считать, что оно несущественно.

$5,1^m$, будет видна как звезда: $5,1^m - (9,39^m - 6^m) = 1,71^m$, что ярче $2,5^m$, а, значит, мы увидим её в такой телескоп не голубовато-белой, а именно в своём истинном «гранатовом» цвете. С 4-дюймовым¹ рефлектором этот цвет будет и чище, и ярче заметен, так как звёздная величина μ Цефея в этом случае станет равной $\approx -1,07^m$.

Вычислим по формуле (2) m_{PP} для 10-метрового рефлектора:

$$m_{PP} \approx 2,0^m + 5 \lg 10000 = 22^m.$$

Самая яркая звезда – Сириус ($-1,58^m$) в этом телескопе будет иметь $-17,58^m$, что для звезды даже трудно представить. Быть может, в 10-метровый рефлектор можно будет увидеть уже диск Сириуса?

1.3. Видимость угловых размеров

Для того, чтобы увидеть, что светлый объект на тёмном фоне представляет собой диск, а не точку, необходимо, чтобы угловой размер ϕ этого объекта был не менее $5'$ [33, С.18]. По поводу последнего числа встречаются также значения $4'$, $150''$, $2'$, $116''$, $114''$, $1'$, $30''$ и даже $10''$ (см., например, [38, С.355]). Существенное различие приводимых значений объясняется, безусловно, индивидуальными особенностями наблюдателя, условиями наблюдения: яркое освещение, нормальное освещение; смотря что

¹ Диаметры объективов телескопов иногда измеряли дюймами, по традиции, парижскими. 1 парижский дюйм $\approx 27\text{мм}$.

рассматривается: светлый объект на тёмном фоне, тёмный объект на светлом фоне, тёмный промежуток между двумя светящимися точками и др.. В частности, тёмный объект на светлом фоне легче обнаруживается нами, чем светлый – на тёмном. Возможно, поэтому так сложилось, что мы пишем «чёрным по белому» , а не наоборот.

Анализ литературы показывает, что для вышепоставленной задачи статистически разумно взять $\phi = 4'$.

Расстояние от Земли до Сириуса составляет $r = 2,66\text{пк}$ [25, С.512]. Учитывая то, что Сириус принадлежит главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга-Рессела (Сириус А, [25, С.382]) и имеет светимость $L=22,4$ солнечной светимости [24, С.352], по формуле [24, С.351]:

$$L \approx R^{5,2},$$

где R – радиус звезды главной последовательности в солнечных радиусах, определим радиус Сириуса в солнечных радиусах.

$$R \approx \sqrt[5,2]{22,4} \approx 1,82.$$

Учитывая, что радиус Солнца в километрах составляет 696 000 км, радиус Сириуса в километрах равен:

$$1,82 \cdot 696\,000\text{км} = 1\,266\,720\text{км}.$$

Расстояние $r = 2,66\text{пк}$ в километрах равно:

$$r = 2,66 \cdot 3,086 \cdot 10^{13}\text{км} \approx 8,21 \cdot 10^{13}\text{км}.$$

По этим данным, исходя из рис.3, можно найти угловой размер γ у Сириуса на небе для невооружённого глаза:

$$\tg \frac{\gamma}{2} = \frac{AB}{AD}; \quad \gamma = 2 \arctg \frac{AB}{AD}.$$

Принимая, что $AB \approx OB = 1266720\text{км}$ и $AD \approx r = 8,21 \cdot 10^{13}\text{км}$,

получим:

$$\gamma = 2 \operatorname{arctg} \frac{AB}{AD} \approx 2 \operatorname{arctg} \frac{1266720 \text{ км}}{8,21 \cdot 10^{13} \text{ км}} \approx 0,0064''.$$

Телескоп должен «дотянуть» $\gamma \approx 0,0064''$ минимум до $4'$.

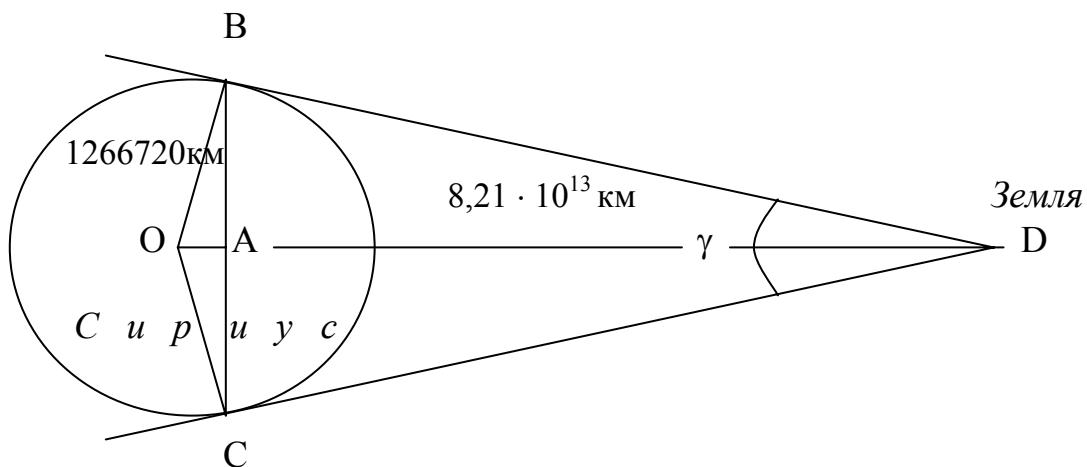


Рис.3. Определение углового размера Сириуса.

Второе основное назначение телескопа – это увеличение угловых размеров небесного объекта.

Угловым размером объекта назовём угол между двумя лучами, выходящими из двух видимых крайних, наиболее удалённых друг от друга точек объекта и пересекающимися в оптическом центре глаза.

Если объект на небе имеет форму круга, то угловым размером его будет угловой размер его диаметра. В этом случае для характеристики угловых размеров достаточно указать одно число. Если объект имеет приблизительно форму эллипса, то указывают два числа: угловой размер большой и угловой размер малой осей эллипса. Если объект имеет неправильную, клочковатую форму, то, руководствуясь субъективными приближениями, его заменяют неким эллипсом

равной площади и указывают также два числа.

Сравним угловые размеры объекта видимые невооруженным глазом и в телескоп. Принципиальная схема изображена на рис.4.

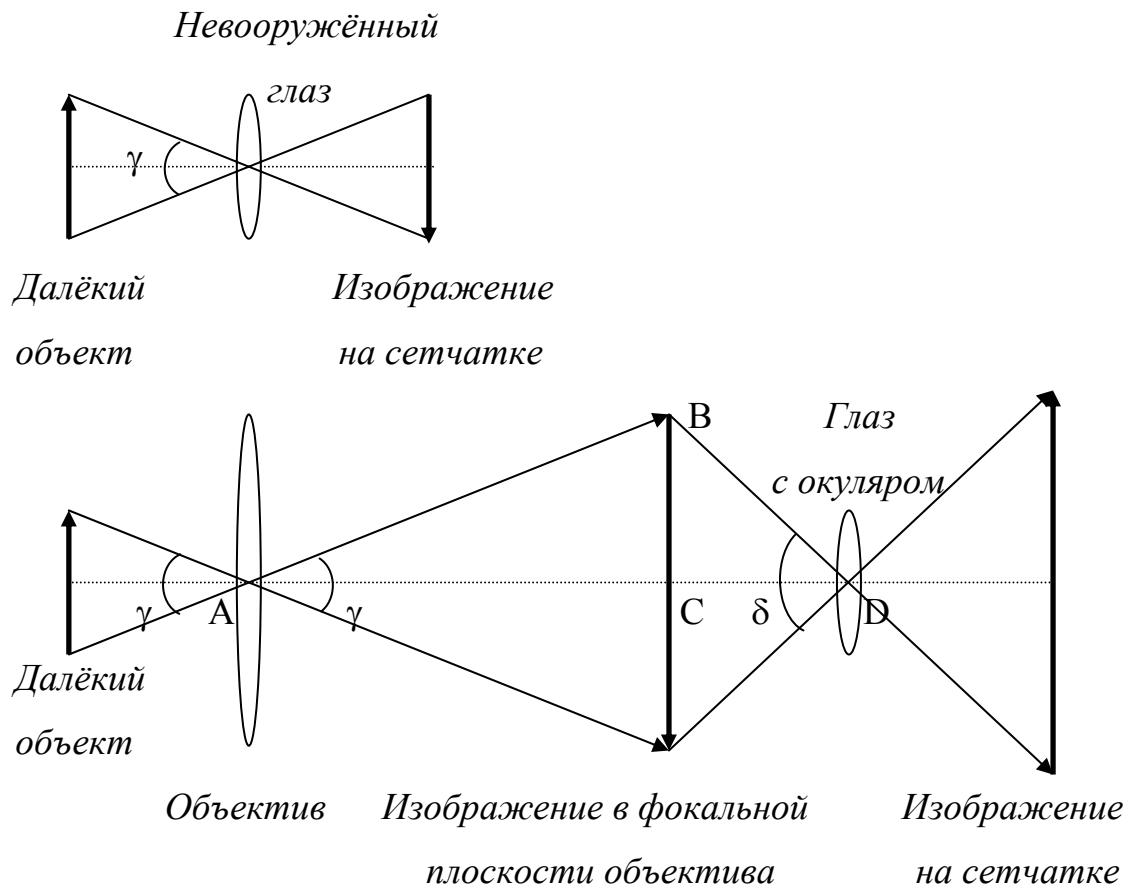


Рис.4. Увеличение углового размера телескопом.

Как для невооружённого глаза, так и для объектива телескопа (будь то система линз или же параболическое зеркало) угловой размер небесного объекта один и тот же: пусть будет равен γ . Так как телескопы применяются для наблюдения весьма удалённых объектов, то объектив телескопа построит изображение объекта практически в своей фокальной плоскости. Это изображение затем рассматривается

глазом в окуляр, которые можно считать единой оптической системой. То есть в телескопе глаз рассматривает не сам объект, а его изображение с помощью окуляра. Следовательно, угловой размер небесного объекта в телескоп будет угловым размером изображения объекта в фокальной плоскости объектива.

Из рис.4 видно, для того, чтобы телескоп увеличивал угловые размеры далёкого объекта, необходимо, чтобы угол δ был бы больше угла γ и желательно во много раз.

Чтобы разглядеть в телескоп диск Сириуса необходимо, чтобы телескоп «дотянул» угловой размер $\gamma \approx 0,0064''$ Сириуса на небе до углового размера $\delta=4'$ изображения Сириуса в фокальной плоскости объектива. Для этого телескоп должен увеличить γ , примерно, в $4': 0,0064'' = 37500$ раз.

Для каждого телескопа существует свой верхний предел увеличений, обусловленный дифракцией света на краях объектива. Изображение в фокальной плоскости объектива получается в результате дифракции света объекта на краях объектива и возникает просто на определённом (фокусном) расстоянии из-за того, что объектив является собирающей (преломляющей или отражающей) системой с определённым конечным фокусным расстоянием.

Чёткость этого изображения относительна. Если на телескопе поставлено его минимальное полезное увеличение, то чёткость этого изображения, как правило, идеальна и имеет даже некоторый запас.

Если изображение в фокальной плоскости рассматривать со всё более близких расстояний с помощью разных окуляров, то можно заметить, что с какого-то расстояния оно начнёт размываться в своих деталях. Таким образом будет видна его дифракционная природа.

Однако ещё раньше можно заметить, что в процессе уменьшения расстояния CD (см. рис.4) наступает такой момент, после которого новых деталей в изображении не появляется. В этот момент на телескопе стоит так называемое *разрешающее увеличение*, которое вычисляется по формуле [30, С.8]:

$$M_{PAZP} = 1,4 \cdot D_{MM}. \quad (3)$$

Дифракционное размывание изображения наступает при *наибольшем полезном увеличении*, вычисляемом по формуле [33, С.14]:

$$M_{NAIB} = 2,8 \cdot D_{MM}. \quad (4)$$

По формуле (3) получается, что 10-метровый рефлектор может предоставить 14000-кратное разрешающее увеличение, максимум – 28000^{\times} . Последнее, конечно, деталей не прибавляет, но видно удобнее: покрупнее.

К сожалению, даже максимальное 28000-кратное увеличение 10-метрового рефлектора намного меньше увеличения в 37500^{\times} , необходимого для видения диска Сириуса. Из-за мешающего влияния земной атмосферы, с наземными телескопами вряд ли удаётся применять увеличения более 2000^{\times} .

Значит, в 10-метровый рефлектор увидеть диск Сириуса невозможно. В 10-метровый рефлектор Сириус будет виден как необыкновенно яркая звезда $-17,58^m$.

Сириус относится к нормальным звёздам, а потому диаметр его сравним с солнечным, невелик. Хотя Сириус принадлежит к близким звёздам, его угловой размер из-за малого диаметра получился очень маленьким.

Найдём звёзды, чтобы их диаметр был бы как можно больше, а

расстояние до них – относительно небольшим. В качестве таких звёзд могут подойти, например: Антарес и Бетельгейзе (α Ориона). Расстояние от Земли до Антареса 52,5пк [24, С.352], радиус Антареса 328 солнечных радиусов [21, С.214]. Расстояние от Земли до Бетельгейзе 200пк [24, С.352], радиус Бетельгейзе 850 солнечных радиусов [21, С.214]. К сожалению, в литературе данные о расстояниях до далёких звёзд и радиусах этих звёзд имеют большой числовой разброс. По некоторым источникам Антарес и Бетельгейзе меняют свои радиусы от 300 до 500 и от 700 до 900 солнечных радиусов соответственно.

С приведёнными данными вычисления углового размера Антареса дают значение $0,058''$. Угловой размер Бетельгейзе получается $0,04''$. Несколько сотых долей угловой секунды – примерно таковыми будут и угловые размеры μ Цефея и некоторых других красных сверхгигантов. Поскольку угловой размер Антареса по нашим расчётам оказался наибольшим, продолжим вычисления для него. Разделив $4'$ на $0,058''$, получим: $4' : 0,058'' \approx 4138^{\times}$. Такое увеличение могут предоставить даже 3-метровые рефлекторы. Если принять во внимание, что число $4'$, необходимых для видения светлого диска на тёмном фоне, выбрано статистически, то, возможно, для зоркого глаза хватит и $2'$, а применить 2000^{\times} великодушно позволит атмосфера.

Методом спектр-интерферометрии в 1974 году было получено изображение диска Бетельгейзе.

Какова же будет яркость поверхности звезды, когда будет виден диск звезды?

Глава 2. Расчёт и анализ поверхностных яркостей небесных объектов

2.1. Формула для вычисления поверхностных яркостей небесных объектов

Звезда станет протяжённым объектом, в случае, если будет виден её диск. Для описания видимых характеристик протяжённых объектов указывают их общий блеск и угловые размеры. Общий блеск, как обычно, даётся в видимых звёздных величинах. Угловые размеры, по традиции, – в градусах, угловых минутах, угловых секундах.

Обозначим через m – общий блеск нашего протяжённого объекта, а через A, B – угловые размеры соответственно большой и малой осей эллипса, эквивалентного объекту по занимаемой на небе площади. Очевидно, что чем больше числа m, A, B , тем меньше будет видимая яркость поверхности объекта.

Назовём усреднённой видимой поверхностной яркостью или, просто, *поверхностной яркостью* протяжённого объекта число K , вычисляемое по формуле [34, С.144]:

$$K = \frac{\pi^2}{129600} \cdot \frac{1}{2,512^m \cdot \operatorname{tg} \frac{A}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{B}{2}} . \quad (5)$$

Единицу измерения определяемой таким образом поверхностной яркости назовём *Кэм*.

В формуле (5) числа m, A, B стоят в знаменателе таким образом, что с их возрастанием величина K будет соответственно убывать. Число m стоит в показателе числа Погсона, отражая то, что если m

изменится на некоторую величину Δm , то К изменится в $2,512^{\Delta m}$ раз.

Тангенсы при половинах угловых размеров А, В отражают то, что оптический телескоп своим увеличением увеличивает угловой размер γ небесного объекта не путём простого умножения γ на количество крат. Например, угловой размер γ Луны равен примерно $0,5^\circ$. Тогда, при наблюдении Луны в телескоп с увеличением, например, 400^\times (обычное сильное увеличение) её угловой размер, т.е. угол δ на рис.4, стал бы равен:

$$\delta = 0,5^\circ \cdot 400^\times = 200^\circ > 180^\circ,$$

что для δ просто абсурдно.

Телескоп своим увеличением пропорционально увеличивает тангенс половины углового размера γ , видимого невооруженным глазом, и вместе с этим небесный объект становится видим в телескоп тоже под увеличенным углом δ , тангенс половины которого связан с тангенсом $\frac{\gamma}{2}$ известным соотношением:

$$\tg \frac{\delta}{2} = M \cdot \tg \frac{\gamma}{2},$$

где М есть угловое увеличение телескопа. Поэтому в формуле (5) числа $A/2$ и $B/2$ стоят под тангенсами, с их увеличением величина К также будет пропорционально уменьшаться.

Некоторые астрономические объекты имеют малые угловые размеры, которые даже после 500-кратных увеличений не превышают $10^\circ \approx 0,1745$ рад. Известно, что для малых углов x , измеряемых в радианах, $\tg x \approx x$. Поэтому угловое увеличение телескопа часто для

краткости и называют просто увеличением телескопа.

Коэффициент $\pi^2/129600$ добавлен в формулу (5) исключительно из антропных и универсальных математических соображений для того, чтобы значения К получались удобными для весьма широкого диапазона поверхностных яркостей разнообразных небесных объектов [29, С.96].

Предположим, что Антарес наблюдается глазом в 3-метровый рефлектор, находящийся на околоземной орбите, с увеличением 4200^\times . Влияние атмосферы в таком случае исключено, а 4200-кратное увеличение является разрешающим для 3-метрового рефлектора и достаточным для видения диска у Антареса. Самая слабая звёздная величина m_{PP} в соответствии с формулой (2) для этого телескопа равна:

$$m_{PP} \approx 2,0^m + 5 \lg 3000 \approx 19,39^m.$$

Блеск Антареса m в этом телескопе будет:

$$m = 1,22^m - (19,39^m - 6^m) = -12,17^m.$$

Угловой размер А диска Антареса:

$$A = 2 \cdot \arctg(4200 \cdot \tg \frac{0,058''}{2}) \approx 4,06'.$$

Подставим полученные для Антареса значения m , A , B ($B=A$) в формулу (5) и вычислим поверхностную яркость К диска Антареса в таких наблюдениях:

$$K = \frac{\pi^2}{129600} \cdot \frac{1}{2,512^{-12,17} \cdot \tg \frac{4,06'}{2} \cdot \tg \frac{4,06'}{2}} \approx 1,612 \cdot 10^7 K\text{эм}.$$

Возникает естественный вопрос: 16 миллионов Кэм - много это или

мало? Антарес – всё-таки звезда, пусть красная, холодная. А не потребуется ли в этих наблюдениях защитный светофильтр?

Вычислим поверхностную яркость K для Солнца: $m = -26,8^m$; $A = B = 32'$:

$$K = \frac{\pi^2}{129600} \cdot \frac{1}{2,512^{-26,8} \cdot \operatorname{tg} 16' \cdot \operatorname{tg} 16'} \approx 1,847 \cdot 10^{11} K\text{эт}.$$

Числа, отличающиеся в 10000 раз, трудно сравнить. Ослепительная яркость поверхности Солнца для невооружённого глаза общеизвестна. Значит, $1,847 \cdot 10^{11}$ Кэт – это много, это очень и очень ярко. Однако, как можно заметить, поверхностная яркость Антареса получена в предположении, что он наблюдается в некий телескоп при некотором увеличении. В то время как поверхностная яркость Солнца вычислена при наблюдении невооружённым глазом. Необходимо сравнять условия наблюдения Антареса с солнечными.

Применим формулу (5) для «естественного» Антареса, наблюдаемого невооружённым глазом: $m = 1,22^m$; $A = B = 0,058''$:

$$K = \frac{\pi^2}{129600} \cdot \frac{1}{2,512^{1,22} \cdot \operatorname{tg} \frac{0,058''}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{0,058''}{2}} \approx 1,252 \cdot 10^9 K\text{эт}. \quad (6)$$

Числа $1,847 \cdot 10^{11}$ Кэт и $1,252 \cdot 10^9$ Кэт, отличающиеся примерно в 150 раз, сравнить можно. Блик Солнца, отражённый от обычного стекла несёт нам всего лишь около 4% исходного солнечного света. Отразив этот блик ещё раз от другого такого же стекла, мы получим блик, несущий всего 0,0016% исходного солнечного света. В этом эксперименте первоначальная яркость Солнца снизилась примерно в 625 раз, однако и второй блик всё ещё остаётся достаточно

ослепительным. Значит, $1,252 \cdot 10^9$ Кэт – это ослепительная яркость.

Последняя величина получена, когда Антарес наблюдается невооружённым глазом, и, вообще-то, никакого диска и никакой поверхности у Антареса при этом не видно. С математической точки зрения в формулу (5) всё равно какие угловые размеры подставлять, лишь бы не было деления на ноль, и тангенсы не обращались в бесконечность¹. То есть формально значения $m = 1,22^m$; $A = B = 0,058''$ для Антареса в формулу (5) подставить можно.

Какова же всё-таки на самом деле поверхностная яркость Антареса?

Приблизиться к Антаресу сейчас не представляется возможным, да и, наверно, небезопасно. Приближение к Антаресу должен заменить телескоп. Однако телескоп не должен изменять поверхностную яркость Антареса.

Известно, что телескоп не может повышать поверхностную яркость протяжённых небесных объектов [18, С.137]. При наблюдении в телескоп максимальная поверхностная яркость у протяжённого объекта будет при равнозрачковом увеличении. При этом из-за дополнительных потерь света в телескопе она почти равна, однако не превосходит, той естественной поверхностной яркости, которая воспринимается непосредственно невооружённым глазом. С увеличениями, превышающими равнозрачковое, поверхностная яркость всегда меньше естественной и уменьшается вплоть до своего

¹ С физической точки зрения очевидно, что $0^\circ < A < 180^\circ$, $0^\circ < B < 180^\circ$, поэтому деление на ноль в формуле (5) невозможно, и тангенсы не обратятся в бесконечность.

минимального значения при наибольшем полезном увеличении $M_{\text{НАИБ}}$ [30, С.11-17], [33, С.17].

Следовательно, для того, чтобы увидеть почти естественную поверхностную яркость Антареса, необходимо наблюдать его при равнозрачковом увеличении. Те 4200^{\times} будут равнозрачковым увеличением в соответствии с формулой (1) на телескопе с диаметром объектива $D_{\text{ММ}} = 4200^{\times} \cdot d_{\text{ММ}}$. Телескоп с таким $D_{\text{ММ}}$ соберёт в $(D_{\text{ММ}}/d_{\text{ММ}})^2$ больше света, чем зрачок невооружённого глаза с $d_{\text{ММ}}$, то есть в:

$$\left(\frac{D_{\text{ММ}}}{d_{\text{ММ}}} \right)^2 = \left(\frac{4200^{\times} \cdot d_{\text{ММ}}}{d_{\text{ММ}}} \right)^2 = 17640000 \text{ раз.}$$

Найдём звёздную величину m Антареса, видимую в этот телескоп:

$$\frac{E_m}{E_{1,22}} = 17640000; \quad \frac{E_m}{E_{1,22}} = q^{1,22-m}; \quad q^{1,22-m} = 17640000;$$

$$m = 1,22 - \frac{\lg 17640000}{\lg q} = 1,22 - \frac{\lg 1764 + 4}{\lg 2,512} \approx -16,895^m.$$

Значит, в телескоп с некоторым диаметром объектива $D_{\text{ММ}}$ при равнозрачковом увеличении 4200^{\times} Антарес будет виден как диск с угловым размером $4,06'$ и общим блеском $\approx -16,895^m$. Подставим эти данные Антареса в формулу (5) и получим:

$$K = \frac{\pi^2}{129600} \cdot \frac{1}{2,512^{-16,895} \cdot \operatorname{tg} \frac{4,06'}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{4,06'}{2}} \approx 1,252 \cdot 10^9 K\text{эм.}$$

Что прекрасно совпадает со значением поверхностной яркости (6),

полученной выше. Расхождение объясняется лишь округлениями. Так как с математической точки зрения при равнозрачковых увеличениях величина К не меняется в общем случае. Действительно, пусть первоначально величина К при исходных m , A , B вычислялась в соответствии с формулой (5):

$$K = \frac{\pi^2}{129600} \cdot \frac{1}{2,512^m \cdot \operatorname{tg} \frac{A}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{B}{2}}.$$

Затем телескоп увеличил тангенсы $A/2$ и $B/2$ в одно и тоже число раз D_{MM}/d_{MM} , но при этом число m , как видно из примера с Антаресом, заменится на комбинацию:

$$m - \frac{\lg \left(\frac{D_{MM}}{d_{MM}} \right)^2}{\lg 2,512} = m - \log_{2,512} \left(\frac{D_{MM}}{d_{MM}} \right)^2,$$

а выражение $2,512^m$ - на выражение:

$$\begin{aligned} 2,512^{m - \log_{2,512} \left(\frac{D_{MM}}{d_{MM}} \right)^2} &= 2,512^m / 2,512^{\log_{2,512} \left(\frac{D_{MM}}{d_{MM}} \right)^2} = \\ &= 2,512^m \cdot \left(\frac{d_{MM}}{D_{MM}} \right)^2. \end{aligned}$$

Тогда новое значение величины $K - K'$, в соответствии с формулой (5), будет равно:

$$K' = \frac{\pi^2}{129600} \cdot \frac{1}{2,512^m \cdot \left(\frac{d_{MM}}{D_{MM}} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{MM}}{d_{MM}} \right) \cdot \operatorname{tg} \frac{A}{2} \cdot \left(\frac{D_{MM}}{d_{MM}} \right) \cdot \operatorname{tg} \frac{B}{2}} =$$

$$= \frac{\pi^2}{129600} \cdot \frac{1}{2,512^m \cdot \operatorname{tg} \frac{A}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{B}{2}} = K,$$

т. е., действительно, величина K не меняется при равнозрачковых увеличениях на любом телескопе в общем случае.

Значит, $1,252 \cdot 10^9$ Кэт можно принять за истинное значение поверхностной яркости Антареса.

Вычислим диаметр D_{MM} объектива телескопа, обеспечивающего 4200^\times равнозрачкового увеличения.

Найдём самую слабую звёздную величину m_{PP} , видимую в этот телескоп:

$$\frac{E_6}{E_{m_{PP}}} = 17640000 ; \quad \frac{E_6}{E_{m_{PP}}} = q^{m_{PP}-6}; \quad q^{m_{PP}-6} = 17640000 ;$$

$$m_{PP} = \frac{\lg 17640000}{\lg q} + 6 = \frac{\lg 1764 + 4}{\lg 2,512} + 6 \approx 24,115357 \approx 24,115^m.$$

Тогда по формуле (2) D_{MM} равен:

$$D_{MM} \approx 10^{\frac{m_{PP}-2}{5}} \approx 10^{\frac{24,115-2}{5}} \approx 26485 \text{ мм} \approx 26,5 \text{ м.}$$

Вычислим диаметр d_{MM} зрачка глаза, на который рассчитано равнозрачковое увеличение 4200^\times . По формуле (1) получим:

$$d_{MM} = \frac{D_{MM}}{4200^\times} = \frac{26485 \text{ мм}}{4200^\times} \approx 6,3 \text{ мм},$$

что вполне соответствует принятому в ночных условиях диаметру зрачка глаза в 6мм.

Конечно, когда в таких условиях будет виден диск Антареса, прищуриться придётся, а то и применять защитный светофильтр. Но

важно то, что телескоп выполнил свою задачу – «приблизил» нас к Антаресу и показал его естественную поверхностную яркость. С технической точки зрения интересно и то, что при такой поверхностной яркости, достаточно отправить на орбиту 3-метровый, а не 26,5-метровый, рефлектор. И это событие не за горами.

В итоге: для вычисления поверхностных яркостей звёзд в формулу (5) можно подставлять их данные, рассчитанные непосредственно с Земли.

2.2. Поверхностные яркости звёзд

Вычислим поверхностные яркости некоторых известных звёзд, принадлежащих различным спектральным классам. Сведения о видимых звёздных величинах, радиусах и расстояниях этих звёзд почерпнуты из [25], [21], [24], [23], [41]. Все данные и результаты вычислений сведём в табл.2.

Таблица 2
Поверхностные яркости некоторых звёзд

Название звезды	Звёздная величина m	Радиус ⊕	Расстояние от Земли пк	Угловой размер с Земли "	Поверхностная яркость Кэт
α Ю.Креста	1,58	6	125	0,000447	$1,513 \cdot 10^{13}$
Ригель	0,34	35	330	0,000987	$9,727 \cdot 10^{12}$
Беллатрикс	1,7	6	70,5	0,000792	$4,316 \cdot 10^{12}$
β Центавра	0,86	8	62,5	0,00119	$4,145 \cdot 10^{12}$
ζ Кормы	2,27	20	248	0,000750	$2,847 \cdot 10^{12}$
Ахернар	0,6	4	22,1	0,00168	$2,642 \cdot 10^{12}$
Денеб	1,33	40	290	0,00128	$2,324 \cdot 10^{12}$

Продолжение таблицы 2

Название звезды	Звёздная величина m	Радиус \odot	Расстояние от Земли пк	Угловой размер с Земли "	Поверхностная яркость Kэт
Спика	1,21	7	47,7	0,00137	$2,265 \cdot 10^{12}$
Регул	1,34	4	25,6	0,00145	$1,794 \cdot 10^{12}$
Вега	0,14	2,5	8,1	0,00287	$1,383 \cdot 10^{12}$
Сириус А	-1,58	1,82	2,66	0,0064	$1,356 \cdot 10^{12}$
Канопус	-0,9	30	55,5	0,00503	$1,174 \cdot 10^{12}$
Фомальгаут	1,29	1,5	7	0,00199	$9,974 \cdot 10^{11}$
Альтаир	0,89	1,5	5	0,00279	$7,335 \cdot 10^{11}$
Процион А	0,48	2	3,5	0,00532	$2,943 \cdot 10^{11}$
Процион В	10,6	0,02	3,5	$5,32 \cdot 10^{-5}$	$2,634 \cdot 10^{11}$
Полярная	2,5	40	144	0,00258	$1,947 \cdot 10^{11}$
Солнце	-26,8	1	$4,85 \cdot 10^{-6}$	1920	$1,847 \cdot 10^{11}$
Капелла	0,21	12	13,7	0,00815	$1,608 \cdot 10^{11}$
Толиман	0,3	1,1	1,3	0,00787	$1,587 \cdot 10^{11}$
Сириус В	8,67	0,05	2,66	0,000175	$1,44 \cdot 10^{11}$
Поллукс	1,21	9	10,7	0,00783	$6,935 \cdot 10^{10}$
ϵ Эридана	3,81	1	3,28	0,00284	$4,807 \cdot 10^{10}$
Арктур	0,24	27	11,1	0,0226	$2,034 \cdot 10^{10}$
Хамаль	2,23	23	22,7	0,00943	$1,869 \cdot 10^{10}$
Альдебаран	1,06	38	20,8	0,0170	$1,689 \cdot 10^{10}$
Бетельгейзе	0,92	850	200	0,04	$3,471 \cdot 10^9$
μ Цефея	4,2	420	337	0,0116	$2,012 \cdot 10^9$
Антарес	1,22	328	52,5	0,058	$1,252 \cdot 10^9$
Крюгер 60A	9,85	0,5	3,95	0,00118	$1,068 \cdot 10^9$
α Геркулеса	3,5	400	166	0,0224	$1,028 \cdot 10^9$

Несмотря на то, что данные и результаты вычислений являются статистическими, явно прослеживается закономерность.

Горячие голубоватые, голубовато-белые, белые звёзды, белые сверхгиганты имеют самые высокие поверхностные яркости в триллионы Кэт. Немного нарушает картину Канопус, также вошедший в число “триллионеров”, которого пропустили вперёд Фомальгаут (α Южной Рыбы) и Альтаир (α Орла), однако и у последних поверхностная яркость составляет почти триллион Кэт. Лидером во всей таблице неожиданно оказалась α Южного Креста.

Желтоватые, жёлтые звёзды имеют уже меньшую поверхностную яркость. Для них она составляет от одной до трёх сотен миллиардов Кэт. Сюда же попадает и наше Солнце.

Поверхностная яркость оранжевых звёзд ещё ниже – десятки миллиардов Кэт.

И самая низкая поверхностная яркость у красных звёзд – от одного до нескольких миллиардов Кэт. Однако уже ясно, что хотя миллиард Кэт – это “потускневшее” Солнце, для глаза – ослепительная яркость.

Сравним полученные значения поверхностных яркостей звёзд с температурами их поверхностей – фотосфер [35, С.142]. Поскольку обе величины имеют изменения на порядки, найдем десятичные логарифмы от поверхностных яркостей и температур. Все данные и результаты вычислений запишем в табл.3.

Таблица 3
Сравнение поверхностных яркостей и температур звёзд

Название звезды	Поверхностная яркость Кэт	lg поверхности яркости	Температура фотосфера °C	lg температуры фотосфера
α Ю.Креста	$1,513 \cdot 10^{13}$	13,1798	20500	4,3118
Ригель	$9,727 \cdot 10^{12}$	12,988	13000	4,1139
Беллатрикс	$4,316 \cdot 10^{12}$	12,6351	19500	4,29

Продолжение таблицы 3

Название звезды	Поверхностная яркость Кэт	\lg поверхности яркости	Температура фотосферы °C	\lg температуры фотосферы
β Центавра	$4,145 \cdot 10^{12}$	12,6175	20500	4,3118
ζ Кормы	$2,847 \cdot 10^{12}$	12,4544	30000	4,4771
Ахернар	$2,642 \cdot 10^{12}$	12,4219	16500	4,2175
Денеб	$2,324 \cdot 10^{12}$	12,3662	10000	4
Спика	$2,265 \cdot 10^{12}$	12,3551	19000	4,2788
Регул	$1,794 \cdot 10^{12}$	12,2538	13000	4,1139
Вега	$1,383 \cdot 10^{12}$	12,1408	11000	4,0414
Сириус А	$1,356 \cdot 10^{12}$	12,1323	11000	4,0414
Канопус	$1,174 \cdot 10^{12}$	12,0697	7500	3,8751
Фомальгаут	$9,974 \cdot 10^{11}$	11,9989	9500	3,9777
Альтаир	$7,335 \cdot 10^{11}$	11,8654	8500	3,9294
Процион А	$2,943 \cdot 10^{11}$	11,4688	6500	3,8129
Процион В	$2,634 \cdot 10^{11}$	11,4206	6500	3,8129
Полярная	$1,947 \cdot 10^{11}$	11,2894	5900	3,7709
Солнце	$1,847 \cdot 10^{11}$	11,2665	5800	3,7634
Капелла	$1,608 \cdot 10^{11}$	11,2063	6000	3,7782
Толиман	$1,587 \cdot 10^{11}$	11,2006	6000	3,7782
Сириус В	$1,44 \cdot 10^{11}$	11,1584	7500	3,8751
Поллукс	$6,935 \cdot 10^{10}$	10,841	4800	3,6812
ε Эридана	$4,807 \cdot 10^{10}$	10,6819	4800	3,6812
Арктур	$2,034 \cdot 10^{10}$	10,3084	4200	3,6232
Хамаль	$1,869 \cdot 10^{10}$	10,2716	4000	3,6021
Альдебаран	$1,689 \cdot 10^{10}$	10,2276	3600	3,5563
Бетельгейзе	$3,471 \cdot 10^9$	9,5405	3200	3,5051
μ Цефея	$2,012 \cdot 10^9$	9,3036	3200	3,5051
Антарес	$1,252 \cdot 10^9$	9,0976	3300	3,5185
Крюгер 60A	$1,068 \cdot 10^9$	9,0286	3700	3,5682
α Геркулеса	$1,028 \cdot 10^9$	9,012	2800	3,4472

Будем считать значениями переменной X – значения десятичного логарифма поверхностной яркости, а значениями переменной Y – значения десятичного логарифма температуры.

В системе координат XOY по оси X отложим значения десятичного логарифма поверхностной яркости – $\lg K$, а по оси Y – значения десятичного логарифма температуры – $\lg T$. Построим точки с соответствующими координатами (X;Y). Получим рис.5:

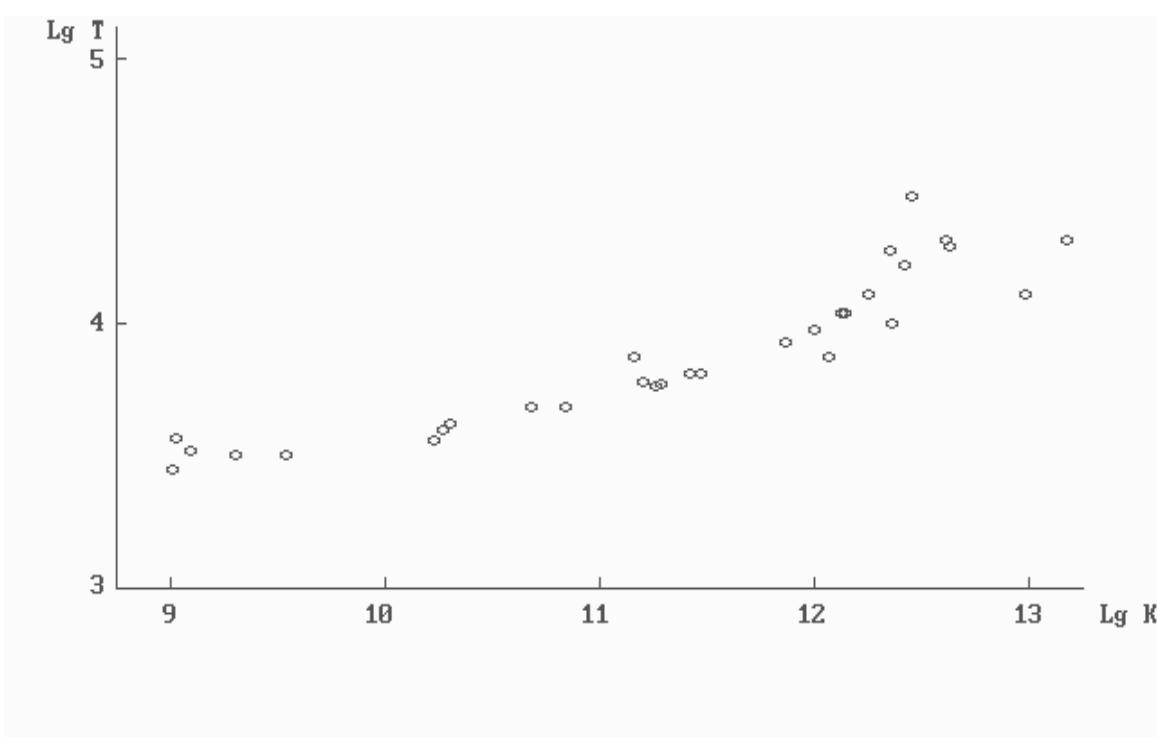


Рис.5. Диаграмма для десятичных логарифмов поверхностных яркостей К и десятичных логарифмов температур Т звёзд.

Из рис.5 можно заметить, что между величинами $X=\lg K$ и $Y=\lg T$, возможно, существует линейная корреляционная зависимость [35, С.141-143]. Найдём уравнения прямых линий регрессии Y на X и X на Y соответственно в виде: $y_x=a_1x+b_1$ и $x_y=a_2y+b_2$, методом наименьших квадратов. Параметры a_1 , b_1 , a_2 , b_2 найдём из систем

уравнений [19, С.256]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot a_1 + \sum_{i=1}^n x_i \cdot b_1 = \sum_{i=1}^n x_i y_i; \\ \sum_{i=1}^n x_i \cdot a_1 + n \cdot b_1 = \sum_{i=1}^n y_i; \end{array} \right. \quad (7)$$

и

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n y_i^2 \cdot a_2 + \sum_{i=1}^n y_i \cdot b_2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i; \\ \sum_{i=1}^n y_i \cdot a_2 + n \cdot b_2 = \sum_{i=1}^n x_i; \end{array} \right. \quad (8)$$

где n в нашем случае равно 31. Промежуточные вычисления удобно производить в табл.4.

Таблица 4

Вычисление коэффициентов систем линейных уравнений (7) и (8)

X_i	Y_i	X_i^2	Y_i^2	$X_i \cdot Y_i$
13,1798	4,3118	173,7071	18,59162	56,82866
12,988	4,1139	168,6881	16,92418	53,43134
12,6351	4,29	159,6458	18,4041	54,20458
12,6175	4,3118	159,2013	18,59162	54,40414
12,4544	4,4771	155,1121	20,04442	55,75959
12,4219	4,2175	154,3036	17,78731	52,38937
12,3662	4	152,9229	16	49,4648
12,3551	4,2788	152,6485	18,30813	52,865
12,2538	4,1139	150,1556	16,92418	50,41091
12,1408	4,0414	147,399	16,33291	49,06583
12,1323	4,0414	147,1927	16,33291	49,03148
12,0697	3,8751	145,6777	15,0164	46,77129
11,9989	3,9777	143,9736	15,8221	47,72803
11,8654	3,9294	140,7877	15,44018	46,62391
11,4688	3,8129	131,5334	14,53821	43,72939
11,4206	3,8129	130,4301	14,53821	43,5456

Продолжение таблицы 4

X_i	Y_i	X_i^2	Y_i^2	$X_i \cdot Y_i$
11,2894	3,7709	127,4506	14,21969	42,5712
11,2665	3,7634	126,934	14,16318	42,40035
11,2063	3,7782	125,5812	14,27479	42,33964
11,2006	3,7782	125,4534	14,27479	42,3181
11,1584	3,8751	124,5099	15,0164	43,23991
10,841	3,6812	117,5273	13,55123	39,90789
10,6819	3,6812	114,103	13,55123	39,32221
10,3084	3,6232	106,2631	13,12758	37,3494
10,2716	3,6021	105,5058	12,97512	36,99933
10,2276	3,5563	104,6038	12,64727	36,37241
9,5405	3,5051	91,02113	12,28573	33,44041
9,3036	3,5051	86,55698	12,28573	32,61005
9,0976	3,5185	82,76633	12,37984	32,00991
9,0286	3,5682	81,51562	12,73205	32,21585
9,012	3,4472	81,21615	11,88319	31,06617
$\sum_{i=1}^{31} x_i =$ $= 350,8023$	$\sum_{i=1}^{31} y_i =$ $= 120,2595$	$\sum_{i=1}^{31} x_i^2 \approx$ $\approx 4014,387$	$\sum_{i=1}^{31} y_i^2 \approx$ $\approx 468,9643$	$\sum_{i=1}^{31} x_i y_i \approx$ $\approx 1370,417$

Найдя необходимые коэффициенты систем уравнений, решим сами системы по формулам Крамера [26, С.241].

Определитель первой системы:

$$\Delta_1 = \sum_{i=1}^{31} x_i^2 \cdot 31 - \sum_{i=1}^{31} x_i \cdot \sum_{i=1}^{31} x_i \approx 1383,7433 \neq 0.$$

Дополнительные определители первой системы:

$$\Delta_{11} = \sum_{i=1}^{31} x_i y_i \cdot 31 - \sum_{i=1}^{31} y_i \cdot \sum_{i=1}^{31} x_i \approx 295,6178.$$

$$\Delta_{12} = \sum_{i=1}^{31} x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{31} y_i - \sum_{i=1}^{31} x_i \cdot \sum_{i=1}^{31} x_i y_i \approx 2022,7379.$$

Тогда, по формулам Крамера для первой системы получим:

$$a_1 = \frac{\Delta_{11}}{\Delta_1} \approx \frac{295,6178}{1383,7433} \approx 0,214; \quad b_1 = \frac{\Delta_{12}}{\Delta_1} \approx \frac{2022,7379}{1383,7433} \approx 1,462.$$

Значит, уравнение прямой линии регрессии Y на X имеет вид:

$$y_X = a_1 x + b_1 = 0,214x + 1,462 .$$

Аналогично для второй системы методом Крамера получим:

$$\Delta_2 = \sum_{i=1}^{31} y_i^2 \cdot 31 - \sum_{i=1}^{31} y_i \cdot \sum_{i=1}^{31} y_i \approx 75,546 \neq 0.$$

$$\Delta_{21} = \sum_{i=1}^{31} x_i y_i \cdot 31 - \sum_{i=1}^{31} x_i \cdot \sum_{i=1}^{31} y_i \approx 295,6178.$$

$$\Delta_{22} = \sum_{i=1}^{31} y_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{31} x_i - \sum_{i=1}^{31} y_i \cdot \sum_{i=1}^{31} x_i y_i \approx -291,9082.$$

$$a_2 = \frac{\Delta_{21}}{\Delta_2} \approx \frac{295,6178}{75,546} \approx 3,913; \quad b_2 = \frac{\Delta_{22}}{\Delta_2} \approx \frac{-291,9082}{75,546} \approx -3,864.$$

Уравнение прямой линии регрессии X на Y имеет вид:

$$x_Y = a_2 y + b_2 = 3,913y - 3,864 .$$

Изобразим прямые линий регрессий Y на X и X на Y на одном чертеже вместе с точками (X;Y). Получим рис.6.

Обе прямые Y_X и X_Y пересекаются в точке Z – в так называемом центре совместного распределения величин X и Y. Найдём её координаты. Для этого решим систему уравнений:

$$\begin{cases} y = 0,214x + 1,462; \\ x = 3,913y - 3,864. \end{cases} \quad \text{Отсюда: } x = 3,913 \cdot (0,214x + 1,462) - 3,864; \\ x \approx 11,4182; \quad \text{тогда } y \approx 3,9055.$$

Значит, $Z(11,4182; 3,9055)$. Координаты точки Z соответствуют

поверхностной яркости $K \approx 2,619 \cdot 10^{11}$ Кэл и температуре $T \approx 8040^{\circ}\text{C}$.

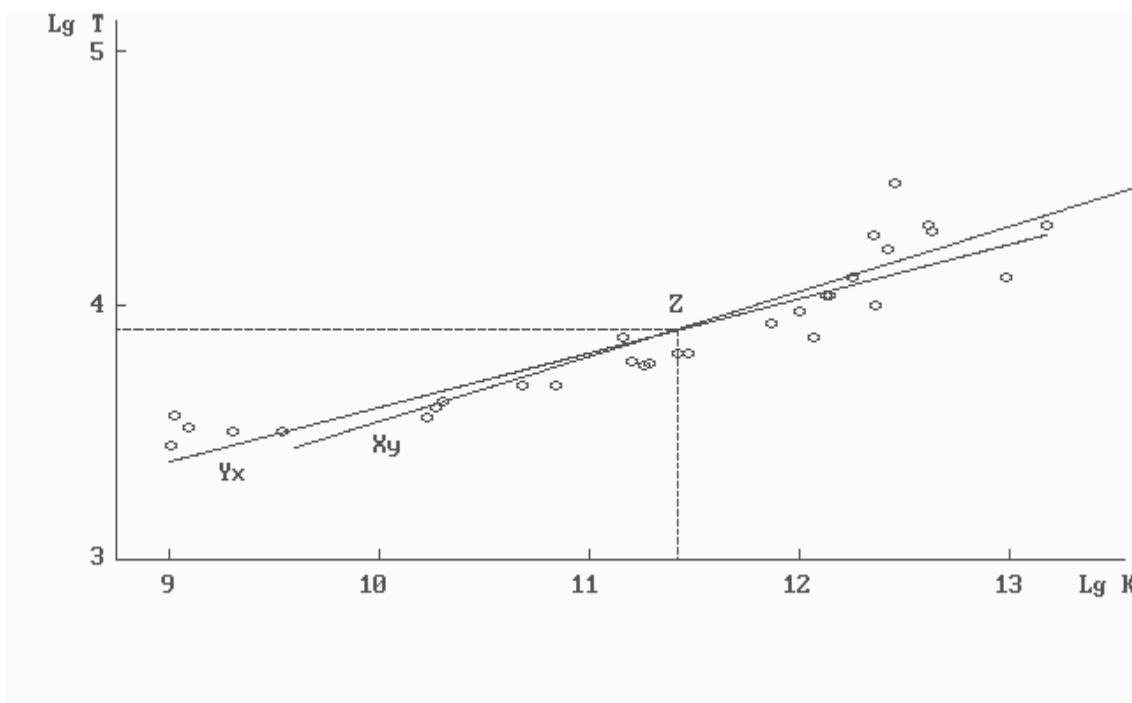


Рис.6. Зависимость поверхностья яркость – температура
для звёзд.

Вычислим коэффициент корреляции r_{xy} величин X и Y [19, С.178]. Поскольку известны коэффициенты регрессий a_1 и a_2 , то коэффициент корреляции r_{xy} можно найти по формуле:

$$r_{xy} = \sqrt{a_1 \cdot a_2} \approx \sqrt{0,214 \cdot 3,913} \approx 0,92 .$$

Коэффициент корреляции r_{xy} отличен от нуля, положителен и весьма близок к единице. Это означает, что между величинами $X=\lg K$ и $Y=\lg T$ существует прямая (чем больше X , тем больше Y) тесная корреляционная связь. Отсюда следует, что величины X и Y зависимы.

Из уравнения прямой линии регрессии Y на X можно получить:

$$y_x = 0,214x + 1,462 ; \Rightarrow \lg T = 0,214 \cdot \lg K + 1,462 ; \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T = 10^{0,214 \cdot \lg K + 1,462} = K^{0,214} \cdot 10^{1,462};$$

то есть

$$T \approx 28,973 \cdot K^{0,214}.$$

Аналогично, из уравнения прямой линии регрессии X на Y получается, что

$$K \approx 0,00013677 \cdot T^{3,913}.$$

Значит, между поверхностными яркостями K звёзд и температурами их фотосфер T существует прямая тесная корреляционная связь.

Теперь сравним полученные значения поверхностных яркостей звёзд со светимостями этих звёзд. Поскольку и здесь обе величины имеют изменения на порядки, используем десятичные логарифмы от поверхностных яркостей и вычислим десятичные логарифмы от светимостей. Все данные и результаты вычислений запишем в табл.5.

Таблица 5

Сравнение поверхностных яркостей и светимостей звёзд

Название звезды	Поверхностная яркость K _{эт}	lg поверхности яркости	Светимость ☉	lg светимости
α Ю.Креста	$1,513 \cdot 10^{13}$	13,1798	6200	3,7924
Ригель	$9,727 \cdot 10^{12}$	12,988	81000	4,9085
Беллатрикс	$4,316 \cdot 10^{12}$	12,6351	820	2,9138
β Центавра	$4,145 \cdot 10^{12}$	12,6175	1860	3,2695
ζ Кормы	$2,847 \cdot 10^{12}$	12,4544	15200	4,1818
Ахернар	$2,642 \cdot 10^{12}$	12,4219	510	2,7076
Денеб	$2,324 \cdot 10^{12}$	12,3662	24600	4,3909
Спика	$2,265 \cdot 10^{12}$	12,3551	740	2,8692

Продолжение таблицы 5

Название звезды	Поверхностная яркость Кэт	\lg поверхности яркости	Светимость \odot	\lg светимости
Регул	$1,794 \cdot 10^{12}$	12,2538	155	2,1903
Вега	$1,383 \cdot 10^{12}$	12,1408	51	1,7076
Сириус А	$1,356 \cdot 10^{12}$	12,1323	22,4	1,3502
Канопус	$1,174 \cdot 10^{12}$	12,0697	4700	3,6721
Фомальгаут	$9,974 \cdot 10^{11}$	11,9989	13	1,1139
Альтаир	$7,335 \cdot 10^{11}$	11,8654	9,8	0,9912
Процион А	$2,943 \cdot 10^{11}$	11,4688	7,4	0,8692
Процион В	$2,634 \cdot 10^{11}$	11,4206	0,0006	-3,2218
Полярная	$1,947 \cdot 10^{11}$	11,2894	1600	3,2041
Солнце	$1,847 \cdot 10^{11}$	11,2665	1	0
Капелла	$1,608 \cdot 10^{11}$	11,2063	141	2,1492
Толиман	$1,587 \cdot 10^{11}$	11,2006	1,3	0,1139
Сириус В	$1,44 \cdot 10^{11}$	11,1584	0,005	-2,301
Поллукс	$6,935 \cdot 10^{10}$	10,841	32	1,5051
ε Эридана	$4,807 \cdot 10^{10}$	10,6819	0,26	-0,585
Арктур	$2,034 \cdot 10^{10}$	10,3084	107	2,0294
Хамаль	$1,869 \cdot 10^{10}$	10,2716	52	1,716
Альдебаран	$1,689 \cdot 10^{10}$	10,2276	155	2,1903
Бетельгейзе	$3,471 \cdot 10^9$	9,5405	22400	4,3502
μ Цефея	$2,012 \cdot 10^9$	9,3036	3100	3,4914
Антарес	$1,252 \cdot 10^9$	9,0976	980	2,9912
Крюгер 60A	$1,068 \cdot 10^9$	9,0286	0,0014	-2,8539
α Геркулеса	$1,028 \cdot 10^9$	9,012	500	2,699

Значениями переменной X будем считать, по-прежнему, значения десятичного логарифма поверхностной яркости, а значениями переменной Y – значения десятичного логарифма светимости.

Аналогично построим точки с координатами (X;Y) в системе координат XOY. Получим рис.7:

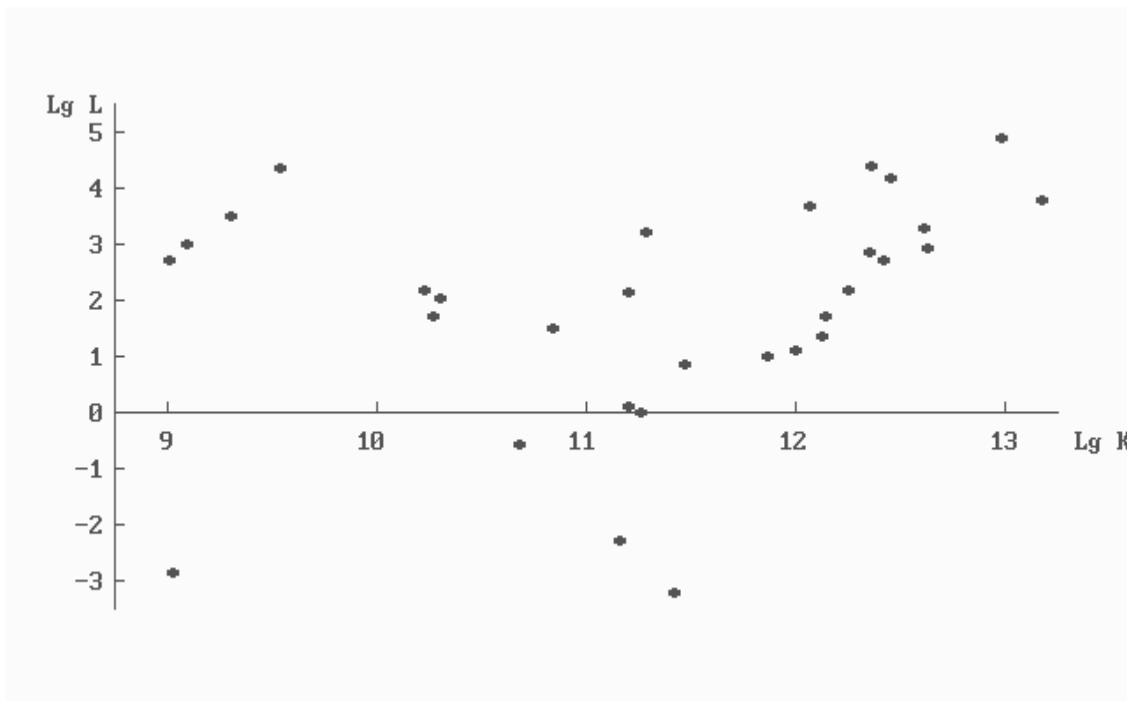


Рис.7. Диаграмма для десятичных логарифмов поверхностных яркостей К и десятичных логарифмов светимостей L звёзд.

Судя по расположению точек (X;Y) на рис.7, можно сказать, что с равномерным возрастанием $X=\lg K$ от своего минимального до максимального значения величина $Y=\lg L$ изменяется непредсказуемо скачкообразно. Звёзды с малой поверхностной яркостью могут оказаться как высокой, так и неожиданно малой светимости. Лишь звёзды с исключительно высокой поверхностной яркостью обладают и высокой светимостью. Однако и здесь резкие колебания светимости продолжаются. Возможно, что картина, отражённая на рис.7, ещё более хаотична, если выполнить расчёты для большего количества звёзд.

Похожая бессвязная ситуация получается, если поменять оси координат для $\lg K$ и $\lg L$ местами. Получим рис.8:

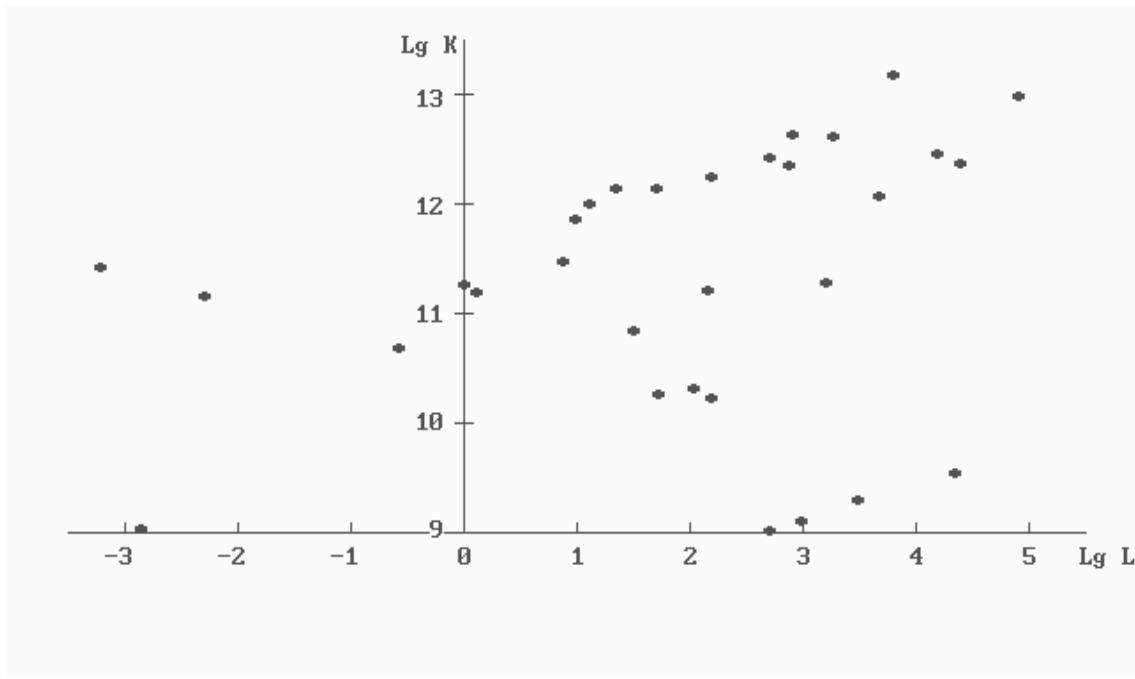


Рис.8. Диаграмма для десятичных логарифмов светимостей L и десятичных логарифмов поверхностных яркостей K звёзд.

Если нет никакой корреляции между $\lg K$ и $\lg L$, то это значит, её нет и между самими величинами K и L. Т.е. никакой прямой или обратной корреляционной зависимости между такими понятиями как «поверхностная яркость» и «светимость» нет.

Светимость представляет собой поток энергии, излучаемой звездой по всем направлениям [25, С.375]. Светимости, как и звёздные величины, бывают визуальными, фотографическими, болометрическими и т.д.. Светимость L звезды, выраженную в светимостях Солнца (т.е. светимость Солнца принимается за 1), можно вычислить по преобразованной формуле [24, С.111]:

$$L = 2,512^{M_\odot - M}, \quad (9)$$

где M_\odot и M – абсолютные звёздные величины Солнца и данной звезды соответственно, измеренные визуально, фотографически или болометрически.

Светимость представляет собой энергетическую характеристику звезды, которую, безусловно, важно знать для понимания физической природы звезды. Однако для чисто зрительного впечатления светимость мало о чём говорит.

С вычислением поверхностных яркостей K по формуле (5) можно действительно определённо и точно сказать, какая звезда яркая, а какая не очень.

Что для глаза от того, что светимость Арктура 107 солнечных, а у Бетельгейзе и того больше – 22400 солнечных? Поверхностная яркость K этих звёзд ясно говорит о том, что они, конечно, будут ярки для простого глаза, но всё-таки на порядки тусклее, чем Солнце. Светимости звёзд-карликов – Сириуса В, Проциона В – наоборот, ничтожны по сравнению с солнечной, однако эти звёзды нельзя причислить к неярким потому, что их поверхностная яркость одного порядка с солнечной.

Известно, что поверхностная яркость протяжённого объекта не изменяется – с близкого ли расстояния рассматриваем мы его простым глазом или с большого, т.е. не изменяется при изменении угловых размеров для простого глаза, в которых объект продолжает оставаться протяжённым [38, С.358]. Так, равномерно и хорошо освещённый круг диаметром 1м будет иметь одинаковую поверхностную яркость при рассматривании его простым глазом как с расстояния в 30 метров, так и с расстояния в 4м. В первом случае угловой размер будет равен $\approx 1,91^\circ$, а во втором – $\approx 14,25^\circ$. Оба значения намного больше $4'$ и, значит, в обоих случаях круг будет виден как протяжённый объект.

Однако необходимость иметь угловые размеры не менее $4'$ для видения протяжённости продиктована исключительно антропными

ограничениями. Для математической формулы никаких таких ограничений быть не может, если подставляемые в формулу величины принадлежат области определения формулы. С математической точки зрения любой небесконечно удалённый, а находящийся пусть на большом, но конечном, расстоянии, физический объект есть протяжённый с вполне математически ощутимыми угловыми размерами. Поэтому величина K , вычисляемая по формуле (5), должна сохранять своё значение при любых изменениях угловых размеров любого физического объекта, рассматриваемого «математическим» невооружённым глазом. При этом формальные математические преобразования приводят к физическим результатам.

Вычислим абсолютную видимую звёздную величину M_\odot Солнца. Абсолютная звёздная величина - это звёздная величина с расстояния 10пк. С расстояния 10пк угловой размер A Солнца будет равен:

$$A = 2 \cdot \arctg \frac{R_\Theta}{10n\kappa} = 2 \cdot \arctg \frac{696000 \text{ км}}{10 \cdot 3,086 \cdot 10^{13} \text{ км}} \approx 0,00093''.$$

$B=A$. Ввиду того, что поверхностная яркость Солнца при таких преобразованиях останется прежней, а, значит, как было вычислено выше, $\approx 1,847 \cdot 10^{11}$ Кэлт, с помощью формулы (5) получим соотношение:

$$1,847 \cdot 10^{11} K_{\text{эм}} \approx \frac{\pi^2}{129600} \cdot \frac{1}{2,512^{M_\Theta} \cdot \tg \frac{0,00093''}{2} \cdot \tg \frac{0,00093''}{2}}.$$

Отсюда:

$$2,512^{M_\Theta} \approx \frac{\pi^2}{129600} \cdot \frac{1}{1,847 \cdot 10^{11} \cdot 2,254384 \cdot 10^{-9} \cdot 2,254384 \cdot 10^{-9}} \approx \\ \approx 81,128.$$

$$M_{\odot} \approx \frac{\lg 81,128}{\lg 2,512} \approx 4,773^m.$$

Что совпадает с точностью до 0,001 со значением M_{\odot} , находимым по известной формуле [25, С.374]:

$$M = m + 5 - 5 \cdot \lg r,$$

где M – абсолютная звёздная величина, m – видимая звёздная величина с расстояния r , которое выражено в парсеках. Тогда для Солнца:

$$M_{\odot} = -26,8^m + 5^m - 5 \cdot \lg \frac{1}{206265} \text{ пк} \approx 4,772^m.$$

2.3. Поверхностные яркости Луны

Чтобы осознанно ориентироваться в получаемых результатах, начнём с вычисления по формуле (5) хорошо представимой поверхностной яркости Луны, табл.6.

Таблица 6
Поверхностная яркость Луны

Звёздная величина m	Фаза	Угловой размер с Земли "	Поверхностная яркость Кэт
- 7,9	0,15	270×1800	38559
- 9,5	0,50	900×1800	50498
- 11,2	0,75	1350×1800	161144
- 12,7	1,00	1800	481176

Луна, как известно, всегда повёрнута к Земле одной стороной (незначительные либрации не будем учитывать). На видимой стороне Луны давно известны обширные тёмные и светлые участки: лунные

моря и горы. Поэтому вычисленная поверхностная яркость для полной Луны 481176 Кэт является, естественно, усреднённой, как если бы полная Луна была бы по всему диску равномерной яркости.

Можно заметить, что на «старой» Луне тёмные участки (обширное Море Дождей, Океан Бурь, Море Облаков и Море Влажности) по площади превалируют над светлыми, а на «молодой» Луне – наоборот. Поэтому в последней четверти поверхностная яркость Луны должна быть меньше, чем в первой четверти, что и наблюдается в действительности. Однако и этим обстоятельством будем пренебрегать.

Также не будем учитывать высоту Луны над горизонтом и тот факт, что перед самым началом и сразу после конца полного теневого лунного затмения поверхностная яркость полной Луны ещё больше, чем в обычное полнолуние.

Заметим лишь то, что в полнолуние поверхностная яркость максимальна, а при меньших фазах, она уменьшается, хотя, казалось бы, последнего не должно было происходить. Ведь с уменьшением фазы уменьшается освещённость от Луны, значит, возрастает число m , но ведь с уменьшением фазы уменьшается и один из угловых размеров Луны, т.е. поверхностная яркость не должна вроде бы меняться, а она уменьшается. Происходит это из-за того, что Луна не является ламбертовским источником света. При различных положениях Луны относительно Солнца лунные горы отбрасывают тени на лунную поверхность. Если эти тени значительны на некотором участке лунной поверхности, то поверхностная яркость такого участка будет низкой.

Последнее явление легко подтверждается непосредственным наблюдением тонкого серпа Луны. Тонкий серп Луны неярок. Разве

только давно не видевшие Луну скажут, что серп яркий. Однако, если сравнить (по памяти) яркость серпа хотя бы с яркостью первой четверти – сомнения исчезнут. Телескопические наблюдения лунного серпа ясно показывают обилие на нём чёрных теней от лунных гор. В полнолуние эти тени практически исчезают.

В северных умеренных широтах Луну удобнее всего наблюдать в апреле-мае по вечерам, когда Луна находится в фазе около первой четверти. Это связано с некоторыми субъективными соображениями. В апреле-мае в этих широтах наконец-то становится более-менее тепло. Вечер чаще удобен тем, что трудовая деятельность завершена. В апреле-мае темнеет не очень поздно, не надо ожидать, например, до полуночи. Эклиптика почти вертикально опускается к западной части горизонта, и Луна в первой четверти находится высоко над ним. В первой четверти у Луны видно как достаточно много самой видимой лунной поверхности, так и хорошо видны кратеры, поскольку имеется множество очерчивающих их теней, ведь Солнце освещает Луну сбоку.

Да, к тому же, необязательно дожидаться полной ночной темноты: Луну можно наблюдать и на слегка потемневшем голубом небе во время гражданских сумерек, когда глаз ещё не потерял способность различать цвета на окружающей местности.

Чтобы поверхность Луны было хорошо видно, изображение Луны меньше «струилось», на телескопе ставят не наименьшее увеличение, но и не наибольшее, а приблизительно разрешающее увеличение. При таком увеличении поверхностная яркость Луны снижена по сравнению с естественной, которую видит невооружённый глаз.

В таких условиях многими наблюдателями было замечено, что Луна в телескоп кажется такой яркой, что буквально «давит» на глаз и после отстранения от окуляра и перевода взгляда на окружающую, относительно тёмную, местность возникает чувство притупления зрения: раскрытый глаз, кажется, будто чем-то заслонён [27, С.113].

Описанное явление хорошо известно, из-за чего при рассматривании Луны в телескоп обычно используют серый светофильтр, не искажающий цвета, но ослабляющий яркость, чтобы не происходило быстрого ослепления глаза необычайно ярким светом Луны. В тоже самое время при наблюдении Луны простым глазом серого светофильтра не надо, и после взгляда на Луну простым глазом глаз уверенно ориентируется в сумерках.

Обратимся к устройству сетчатки глаза.

Известно, что световоспринимающими элементами сетчатки являются *колбочки и палочки*. Колбочки и палочки распределены по сетчатке неравномерно. Так, колбочки сравнительно редко встречаются на периферических частях сетчатки и начинают всё сильнее концентрироваться в её средней области, расположенной напротив зрачка, образуя там так называемое *жёлтое пятно* с *центральной ямкой*, в которой колбочки упакованы довольно плотно, и присутствуют здесь только они одни. Линейные размеры жёлтого пятна, учитывая, что «...на него попадают изображения предметов, видимых под углом всего около 6° - 7° ...» [38, С.355], и заднее фокусное расстояние полной системы глаза равно 22,78мм [21, С.166], на сетчатке составляют примерно 2,4мм - 2,8мм. Линейный диаметр центральной ямки - примерно 0,5мм [40, С.44].

Палочки же, наоборот, меньше встречаются в средней области

сетчатки и увеличивают свою концентрацию к периферическим частям сетчатки, объединяясь постепенно в целые скопления по 100-200, 400 [22, С.78] и даже по нескольку тысяч [40, С.53] штук на дальней периферии сетчатки, образуя таким образом обширные *рецептивные поля*.

«Термин рецептивное поле в узком смысле означает просто совокупность рецепторов, посылающих данному нейрону сигналы через один или большее число синапсов» [40, С.50]. Понятие рецептивного поля является достаточно сложным [40, С.50]. Для простоты под рецептивным полем будем понимать группу рецепторов (палочек или колбочек), объединённых между собой промежуточными нервными клетками (*не палочками и не колбочками*) и имеющую таким образом одно общее для всех рецепторов этой группы нервное волокно, по которому ото всех рецепторов этой группы передаются нервные импульсы в мозг.

Количество палочек во всей сетчатке глаза составляет около 130 млн. штук, колбочек – всего 7 млн. штук [21, С.166] или, по другим источникам, около 125 млн. палочек и колбочек [40, С.45].

Колбочки начинают реагировать только при достаточно сильном освещении их и способны различать цвета. Палочки же могут воспринимать чрезвычайно малые потоки света, однако не способны различать цвета и при сильных, например, дневных освещённостях, будучи насыщены, перестают реагировать на свет, правильнее, на изменения освещённости при ярком свете, так как рецептивные поля вообще-то реагируют не на величину их освещённости, а на её изменения.

Поэтому днём мы используем преимущественно зрение прямым взглядом, когда изображение объектов попадает на среднюю область

сетчатки, где колбочки расположены наиболее часто, обеспечивая себе тем самым цветное, и, что важнее, наиболее острое зрение, когда изображение объекта попадает на жёлтое пятно, а особенно – в центральную ямку.

Рецептивные поля колбочек центральной ямки предельно малы, а чтобы объекты воспринимались раздельно или, например, в деталях, то для последнего необходимо, чтобы отдельные детали объекта проецировались на отдельные рецептивные поля. Если же отдельные детали объекта будут проецироваться на одно рецептивное поле, то эти детали будут восприниматься слившимися, как одна деталь.

Ночью колбочки перестают реагировать на слабые потоки света, и мы почти не в состоянии видеть слабосветящийся в темноте объект, если его изображение попадает на жёлтое пятно (то есть если мы смотрим на этот объект довольно пристально), и совершенно ничего не видим, если изображение попадает в центральную ямку (то есть когда смотрим вообще в упор). Поэтому, ночью, чтобы увидеть слабосветящийся объект (если, конечно, это вообще возможно), мы вынуждены смотреть на него не прямым зрением, а использовать боковое, периферийное зрение, чтобы изображение объекта попадало на области сетчатки, где сосредоточены скопления палочек, которые способны обеспечить нам восприятие слабых потоков света.

Пусть теперь некоторый объект виден невооружённому глазу под углом γ , тогда линейный размер l_{MM} в миллиметрах изображения этого объекта на сетчатке глаза приблизительно равен:

$$l_{MM} \approx 2 \cdot 22,78_{MM} \cdot \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2},$$

где, очевидно, 22,78мм – заднее фокусное расстояние полной системы глаза.

Простому глазу Луна видна под углом, самое большое, в $0,56^\circ$.

Следовательно, линейный размер l_{MM} , можно сказать, диаметр изображения Луны на сетчатке, в этом случае равен:

$$l_{MM} \approx 2 \cdot 22,78_{MM} \cdot \operatorname{tg} \frac{0,56^\circ}{2} \approx 0,22 \text{мм.}$$

Отсюда следует, что при прямом взгляде на Луну простым глазом (как мы обычно и поступаем при рассматривании Луны), изображение Луны на сетчатке целиком умещается в центральной ямке жёлтого пятна, которое более-менее терпимо переносит естественный яркий свет Луны в этих условиях, ведь всё-таки не следует забывать об уже произошедшей темновой адаптации глаза к моменту наблюдения. Причём, чтобы получше, в деталях, рассмотреть Луну, глазу нет необходимости выводить её из зоны центральной ямки, так как он уже и так видит сразу всю Луну целиком максимально подробно и резко.

После перевода взгляда на сумеречную местность, хотя колбочки центральной ямки оказались теперь в какой-то степени засвеченными, да пусть даже они и совсем не были облучены, – они и все остальные колбочки сетчатки всё равно не участвуют в зрительном восприятии в глубоких сумерках. Глаз же сохраняет данную ему способность видеть в темноте потому, что он сохраняет незасвеченными области палочек вокруг центральной ямки, только благодаря которым он и может ориентироваться при слабом освещении, воспринимать слабый свет и, используя боковое зрение, практически не передаёт в этом случае ощущения какого-либо ослепления. Если же вечер ещё не совсем перешёл в ночь, то глаз сохраняет ещё способность различать цвета, благодаря работе колбочек.

Вычислим теперь линейные размеры изображения Луны в первой

четверти на сетчатке при наблюдении Луны в телескоп. Вблизи терминатора кратеры можно заметить уже при $2\text{-}4^{\times}$, но для уверенного рассмотрения деталей всей видимой лунной поверхности увеличение применяют не менее 30^{\times} . При 30-кратном увеличении линейные размеры $l_{MM} \times r_{MM}$ изображения Луны ($0,56^{\circ} \times 0,28^{\circ}$) на сетчатке соответственно равны:

$$l_{MM} \approx 2 \cdot 22,78_{MM} \cdot 30^{\times} \cdot \operatorname{tg} \frac{0,56^{\circ}}{2} \approx 6,68 \text{мм},$$

$$r_{MM} \approx 2 \cdot 22,78_{MM} \cdot 30^{\times} \cdot \operatorname{tg} \frac{0,28^{\circ}}{2} \approx 3,34 \text{мм}.$$

Отсюда следует, что при 30^{\times} изображение Луны на сетчатке не только не умещается в центральной ямке жёлтого пятна, но и намного превосходит линейные размеры последнего, а при больших увеличениях и подавно. При этом происходит засветка областей палочек в непосредственной близости вокруг жёлтого пятна, а так как палочки уже были адаптированы к темноте, то глаз при этом испытывает слепящее, давящее действие от яркого света Луны.

Так как изображение Луны теперь не умещается в центральной ямке, то глаз не может видеть поверхность Луны везде одновременно одинаково резкой, поэтому глаз начинает вращаться, осматривая Луну, подставляя при этом под её яркий свет всё новые области палочек. От этого площадь области засвеченных палочек ещё больше увеличивается. В результате, когда после этого глаз отстраняется от окуляра телескопа, и взгляд устремляется в земные сумерки, глаз теряет на время способность видеть в сумерках.

Важно отметить, что полная Луна, находящаяся ночью на высоте $>40^\circ$ над горизонтом, представляется очень яркой и блестящей для адаптировавшегося к темноте невооружённого глаза.

Днём, когда Луна видна на голубом небе, никакого подобного явления не происходит из-за соответствующей световой адаптации глаза.

Когда же доводится увидеть почти полную Луну (в фазе 0,7 – 0,8) днём высоко в голубом небе рядом с довольно яркими белыми облаками, то поверхностная яркость Луны иногда настолько совпадает с яркостью белых облаков, что поначалу и Луну можно принять тоже за небольшое облачко. Конечно, яркость белых облаков бывает выше.

Поэтому можно сказать: поверхностная яркость, выраженная сотнями тысяч Кэт, считается очень яркой, десятками тысяч Кэт – комфортной для наблюдения.

2.4. Поверхностные яркости больших планет Солнечной системы

Вычислим по формуле (5) поверхностные яркости больших планет. При движении планет их звёздные величины, фазы и угловые размеры, наблюдаемые с Земли, могут значительно изменяться. Поэтому расчёт поверхностных яркостей проведём отдельно для каждой планеты в разных её положениях. Сведения о звёздной величине, фазе и угловых размерах взяты из [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17] и являются среднестатистическими.

Рассчитаем поверхностную яркость Меркурия, табл.7.

Таблица 7

Поверхностная яркость Меркурия

Звёздная величина m	Фаза	Угловой размер с Земли "	Поверхностная яркость Кэт
3,2	0,01	0,12×11,8	480263
2,9	0,02	0,24×12,0	311283
2,1	0,05	0,49×9,7	394090
1,2	0,16	1,5×9,4	304342
1,2	0,25	2,4×9,5	188212
0,7	0,30	2,5×8,3	327773
0,6	0,43	3,3×7,7	293487
0,1	0,56	3,8×6,8	457415
0,1	0,62	4,2×6,7	420029
- 0,6	0,68	4,3×6,3	831396
- 0,5	0,76	4,6×6,0	744228
- 0,1	0,82	4,5×5,5	574158
- 1,3	0,93	4,9×5,3	1652565
- 0,9	0,98	4,8×4,9	1262366
- 0,7	1,00	4,6	1167087
- 1,6	1,00	5,0	2263062

Поверхностная яркость Меркурия непостоянна. При фазах, близких к 1,00, она достигает наибольших значений в 1-2 миллиона Кэт. С уменьшением фазы до нуля поверхностная яркость в среднем уменьшается, однако выдаёт значительные колебания от двух до восьми сотен Кэт. Такие колебания можно объяснить разными расстояниями Меркурия от Солнца в силу большой эллиптичности орбиты.

До полётов межпланетных станций наземными телескопами не удалось установить характер поверхности Меркурия. Она оказалась подобна лунной. Поэтому увеличивающиеся при уменьшении фазы,

невидимые явно, различные тени от меркурианских гор приводят к уменьшению поверхностной яркости Меркурия и, возможно, тоже вносят свой вклад в её неожиданные колебания.

На практике Меркурий легче всего удаётся наблюдать при фазе 0,5 – 0,75. Поверхностная яркость при этом часто заметно превышает лунную и достигает значений почти в миллион Кэт. Меркурий выглядит ярким, чуть ли не зеркальным, слегка выпуклым полудиском.

Вычислим поверхностные яркости Венеры, табл.8.

Таблица 8

Поверхностная яркость Венеры

Звёздная величина m	Фаза	Угловой размер с Земли "	Поверхностная яркость Кэт
– 3,1	0,01	0,6×60	6256960
– 3,7	0,06	3,2×53,3	2295094
– 4,0	0,13	6,2×47,7	1744912
– 4,2	0,28	10,3×36,9	1632390
– 4,2	0,34	11,1×32,7	1709294
– 4,1	0,40	11,7×29,2	1656215
– 4,0	0,50	12×24	1791806
– 3,8	0,62	11,8×19	1914450
– 3,6	0,72	11,5×16	1940251
– 3,5	0,81	10,9×13,4	2229166
– 3,4	0,90	10,4×11,5	2482793
– 3,3	0,96	10×10,4	2603973
– 3,4	1,00	9,8	3091858
– 3,5	1,00	9,7	3460431

Поверхностная яркость Венеры велика. В периоды верхних и, особенно, нижних соединений она составляет несколько миллионов Кэт. К сожалению, последнее трудно проверить на практике, так как

тогда Венера теряется в лучах Солнца. Однако, в более благоприятные периоды видимости 1,6-2 миллиона Кэт заметить несложно. Минимум поверхностной яркости приходится примерно на наибольший блеск. Ярость Венеры настолько велика, что для её наблюдений в телескоп рекомендуют использовать серый светофильтр, не искажающий цвета, но задерживающий много лучей.

Планеты по возможности лучше наблюдать при сильных увеличениях: сотни и более крат. Конечно, если теперь наблюдать Венеру в телескоп с увеличением, скажем, в 1000^{\times} , то можно предположить, что применение серого светофильтра объясняется, видимо, тем же, что и в случае с Луной. Однако, уже при равнозрачковых увеличениях всего в 30^{\times} - 100^{\times} (30^{\times} показывает Венеру вполне протяжённым объектом даже тогда, когда она максимально удалена от Земли) поверхность Венеры¹ представляется очень яркой и быстро притупляет зрение, делая одновременно с этим постепенно плохо различимым контраст заметных в первые мгновенья наблюдения деталей поверхности.

Нетрудно вычислить, что даже при 100^{\times} изображение Венеры часто лишь немного не умещается в центральной ямке жёлтого пятна сетчатки. Отсюда следует, что Венера ослепляет даже колбочки [27, С.113]. Причём из-за большой площади ослеплённых колбочек

¹ Речь идёт, конечно, не о твёрдой каменистой поверхности Венеры, скрытой под плотной облачной атмосферой, окутывающей всю Венеру, а о внешней поверхности этой самой атмосферы, являющейся для внешнего наблюдателя по сути *видимой* поверхностью Венеры.

усиливается и болевое ощущение.

Невооружённому глазу Венера ослепляет малое количество колбочек, поэтому невооружённому глазу серого светофильтра не надо. Но кто видел ярчайшую золотую Венеру в чёрном бархате ночного неба, тот наверняка помнит, как сильно «бьёт» её свет.

Днём же опять из-за световой адаптации глаза Венеру можно наблюдать в телескоп без серого светофильтра, но контраст деталей на её поверхности всё равно потихоньку уменьшается и лучше всё-таки использовать светофильтр.

Вычислим поверхностную яркость Марса, табл.9.

Таблица 9

Поверхностная яркость Марса

Звёздная величина m	Фаза	Угловой размер с Земли "	Поверхностная яркость Кэт
2,0	1,00	3,5	167660
1,8	0,95	4,2×4,4	133619
1,4	0,92	4,7×5,1	148905
1,2	0,90	5,2×5,8	142282
0,8	0,88	6,1×6,9	147370
0,6	0,87	6,7×7,7	144553
0,3	0,86	7,4×8,6	154479
-0,2	0,85	9,2×10,8	156819
-0,8	0,86	12,1×14,1	158714
-1,2	0,88	14,3×16,2	168958
-1,6	0,91	17×18,7	177970
-2,0	0,95	20,2×21,3	190070
-2,4	0,98	22,9×23,4	220598
-2,5	1,00	23,7	230758

Поверхностная яркость Марса составляет 130–230 тысяч Кэт.

Достигает максимального значения в эпоху великого противостояния.

Если фаза Марса отлична от 1,00, то поверхностная яркость снижена и испытывает незначительные колебания, что можно объяснить эллиптичностью орбиты Марса и возникновением на поверхности Марса теней от марсианских гор. Меньшие, чем у Меркурия, колебания поверхностной яркости Марса, возможно, связаны с тем, что поверхность Марса не имеет многочисленных высоких и крутых горных гряд, как на Меркурии, и тени занимают, в среднем, мало меняющуюся небольшую площадь. Поверхность Марса, видимо, из-за наличия небольшой атмосферы получилась более сглаженной, чем поверхность Меркурия.

Поверхностная яркость Марса даже в эпоху великого противостояния получилась в два раза ниже, чем у полной Луны. Однако, это не мешает рассматривать Марс через довольно плотные цветные светофильтры при средних, разрешающих увеличениях телескопа.

Без светофильтра для адаптировавшегося к темноте глаза Марс выглядит ярким сияющим отполированным медным шариком, а его полярная шапка напоминает налепившуюся яркую серебряную скорлупку. Через несколько секунд цвет переходит: глаз адаптируется к яркости, и Марс начинает казаться бело-розовым, покрытым коричневатой светлой пылью. Моря Марса имеют зеленовато-коричневый, но часто серо-коричневый цвет. Вообще, конечно, цвет поверхности Марса неоднороден.

Вычислим поверхностную яркость Юпитера, табл.10.

Поверхностная яркость Юпитера находится на уровне поверхностной яркости Луны в фазе 0,50. Держится в довольно узких пределах: от 46000 до 56000 Кэт. То, что поверхностная яркость Юпитера довольно стабильна, можно объяснить тем, что расстояние

Таблица 10

Поверхностная яркость Юпитера

Звёздная величина m	Угловой размер с Земли "	Поверхностная яркость Кэт
– 1,3	29,3×31,4	46648
– 1,4	29,6×31,7	50151
– 1,5	31,9×34,1	47434
– 1,6	33,3×35,6	47725
– 1,7	34,8×37,2	47920
– 1,8	36,6×39,2	47410
– 1,9	38,5×41,2	47020
– 2,0	40,4×43,2	46858
– 2,1	42,1×45,0	47332
– 2,2	42,4×45,4	51077
– 2,3	43,1×46,2	54142
– 2,4	44,5×47,7	55690
– 2,5	46,4×49,7	56206

Юпитера от Солнца меняется в нешироких пределах: эксцентриситет орбиты Юпитера заметно меньше, чем у орбит Марса и Меркурия. Фаза Юпитера практически всегда равна 1,00. В удобных противостояниях, случающихся вблизи перигелия своей орбиты, Юпитер набирает и наибольший блеск: $-2,5^m$, и максимальные угловые размеры: $46,4'' \times 49,7''$, а раз и вблизи перигелия, то и наибольшую поверхностьную яркость: 56206 Кэт.

При равнозрачковых увеличениях Юпитер выглядит ярким бело-золотым овальным кружочком. При увеличениях от разрешающего до наибольшего – яркость диска Юпитера довольно бледная.

Вычислим поверхностьную яркость Сатурна, табл.11.

Таблица 11

Поверхностная яркость Сатурна

Звёздная величина m	Раскрытие колец	Угловой размер с Земли "	Поверхностная яркость Кэт
0,7	0,428	13,8×34,8	14162
0,6	0,433	15,4×39,1	12385
0,5	0,433	15,8×40,1	12906
0,4	0,431	16,1×40,9	13616
0,3	0,430	16,4×41,5	14445
0,2	0,428	16,5×41,8	15629
1,1	0,030	16,6×18,6	15239
0,8	0,000	17,7×19,8	17699
1,4	0,000	14,8×16,5	14616
0,9	0,168	16,3×18,2	19069
0,9	0,238	13,9×35,0	11628
0,8	0,343	14,2×35,7	12236
0,8	0,000	16,9×18,9	19420
0,7	0,020	17,2×19,2	20595

Поверхностная яркость Сатурна ниже, чем у Юпитера. Это доказывают и прямые наблюдения в телескоп. Фаза Сатурна практически всегда равна 1,00. Вычисления поверхности яркости Сатурна осложняются наличием у Сатурна известных широких колец.

Когда раскрытие колец максимально ($\sim 0,4$), то угловые размеры А×В Сатурна берутся так: А – угловой размер полярного диаметра диска, В – угловой размер большой оси кольца. Поверхностная яркость кольца на глаз ненамного отличается от поверхностной яркости диска, а форма Сатурна хорошо напоминает эллипс. При этом значения поверхности яркости всей фигуры получаются примерно одними и теми же: от 13000 до 15000 Кэт. Расхождения обусловлены, видимо, лишь аппроксимациями.

Когда раскрытие колец минимально (<0,03) или кольца исчезают вовсе, то: А – угловой размер полярного диаметра диска, В – угловой размер экваториального диаметра диска. При этом поверхностная яркость собственно самого Сатурна, без кольца, немножко выше и достигает 18000-20000 Кэт.

Особенно разнятся значения поверхностной яркости при промежуточных раскрытиях кольца. Трудно учитывать вклад кольца в усреднённое значение общей поверхностной яркости. Безусловно, изменения вносят: расстояние Сатурна от Солнца, тень от Сатурна на кольце, тёмный промежуток между Сатурном и кольцом, разные ракурсы структуры кольца, общая форма всей фигуры. Но это детали.

Главное в том, что поверхностная яркость получила своё значение, подтверждаемое наблюдениями в телескоп. Лишь при больших равнозрачковых увеличениях ($> 150^{\times}$) Сатурн может показаться ярким для адаптировавшегося к темноте глаза. При разрешающих увеличениях Сатурн выглядит тусклым, намного более тусклым, чем тот же Юпитер.

Вычислим поверхностную яркость Урана, табл.12.

Таблица 12

Поверхностная яркость Урана

Звёздная величина m	Угловой размер с Земли "	Поверхностная яркость Кэт
6,1	3,4	4069,4
6,0	3,5	4210,7
5,9	3,6	4364
5,8	3,7	4529,9
5,8	3,8	4294,6
5,7	3,9	4470,6

Поверхностная яркость Урана практически постоянна: 4000-4500 Кэл. Фаза с Земли всегда равна 1,00. На снимках, полученных межпланетными станциями, Уран выглядит совершенно однородным шаром интенсивно голубого цвета. Динамику яркости по ним проследить, скорее всего, невозможно. Нет у Урана широкого кольца, как у Сатурна. Поэтому колебания поверхностной яркости могут быть вызваны эксцентриситетом орбиты, изменениями отражательных свойств атмосферы, неточностью исходных данных. Поверхностная яркость Урана более чем в три раза ниже поверхностной яркости Сатурна.

Вычислим поверхностную яркость Нептуна, табл.13.

Таблица 13

Поверхностная яркость Нептуна

Звёздная величина m	Угловой размер с Земли "	Поверхностная яркость Кэл
7,8	2,2	2030,5
7,7	2,3	2037

Поверхностная яркость Нептуна ещё ниже, чем у Урана: ≈ 2000 Кэл. Фаза планеты с Земли всегда равна 1,00. На снимках, полученных межпланетными станциями, Нептун выглядит тёмно-синим шаром с ещё более тёмными полосами его умеренных широт и небольшим овальным тёмным пятном на экваторе. Кое-где имеются светлые пятнышки, полоски и даже небольшие яркие бело-бирюзовые и розовые штрихи.

И, наконец, Плутон.

Данные о Плутоне разноречивы. Его видимая звёздная величина приводится в пределах от 14^m до $15,2^m$, значение углового размера

0,23["] считается довольно точным [37, С.87, 56], [11, С.49]. Однако, если принять во внимание также приводимые значения его радиуса: 1145км [25, С.337], 1178±28км [25, С.503], то при расстоянии в конце XX в. Плутона от Земли приблизительно в 29 а.е. угловой размер Плутона составит всего 0,11["]. К этому значению приводится звёздная величина 15,1^m Плутона без Харона [25, С.503].

Кроме того, имеются сведения, что: «Даже во время противостояния видимый угловой диаметр Плутона не превосходит 0,23["], а блеск слабее 14^m, ...» [11, С.49] и: «Но даже в противостоянии видимый диаметр Плутона не превышает 0,14["], а его блеск не ярче 14^m, ...» [14, С.61].

Поэтому, расчёт поверхностных яркостей Плутона проведём для сочетаний (15^m; 0,23["]) и (15,1^m; 0,11["]), а также для взятых приблизительно сочетаний (14,1^m; 0,23["]) и (14^m; 0,14["]), табл.14.

Таблица 14

Поверхностная яркость Плутона

Звёздная величина m	Угловой размер с Земли "	Поверхностная яркость Кэт
15	0,23	244,82
15,1	0,11	976,16
14,1	0,23	560,88
14	0,14	1659,9

Колебания звёздной величины объясняются различным расстоянием Плутона от Солнца и изменением отражательной способности Плутона. Изменения отражательной способности могут происходить как из-за осевого вращения Плутона и наличия на

Плутоне неоднородных по яркости пятен, так и, быть может, в результате замерзания и падения атмосферы Плутона на его поверхность в виде инея, а потом обратной возгонки атмосферы.

Значения углового размера Плутона оказались отличающимися в два раза: $0,11''$ – $0,23''$. Это может быть связано с тем, что расстояние между Землёй и Плутоном хотя и огромно, но с 1930 года – года открытия Плутона – и по ныне сильно менялось из-за большого эксцентриситета орбиты Плутона. Плутон, в свою очередь, весьма мал. Всё это вызывает большие трудности в определении углового размера Плутона.

Как бы то ни было, а даже при наихудшем сочетании звёздной величины $15,2^m$ и углового размера $0,23''$ поверхностная яркость Плутона составляет 203,63 Кэт.

В книге А.Уайта «Планета Плутон» (М., Мир, 1983) написано, что в 1930 году сразу после открытия Плутона: «Спустя несколько ночей Лампланд, используя 105-сантиметровый рефлектор, фотографически сравнил цвет объекта (Плутона.-А.Л.) с цветом Нептуна. Его сравнение подтвердило визуальное впечатление, что цвет объекта (Плутона.-А.Л.) явно желтоватый, а не голубоватый, как у Нептуна» (С.36). Диск Плутона тогда в тот 105-сантиметровый рефлектор, похоже, различить не удалось, иначе это событие было бы отмечено там же [37, С.36]. Далее А.Уайт в своей книге «Планета Плутон» (М., Мир, 1983) пишет: «Путнам и Слайфер отметили, что отчётливый желтоватый цвет Плутона, наблюдавшийся Лампландом с помощью 105-сантиметрового ловелловского рефлектора, указывает на отличие атмосферы Плутона от той, которая окружает Нептун» (С.52).

В телеграмме, разосланной примерно через три недели после открытия Плутона и несущей объявление об открытии Плутона, указывается, что объект (Плутон) имеет пятнадцатую звёздную величину [37, С.36].

В 1932 году для визуальной звёздной величины Плутона было найдено значение $14,2^m$ [37, С.47].

В начале 70-х годов XX в. было отмечено, что с 1930 года и по 1972 год средний блеск Плутона постепенно ослабевал, начиная со значения $14,75^m$ в 1930 году и до $15,12^m$ в 1972 году [37, С.86]. В настоящее время блеск Плутона “затормозился” на значении $15,1^m$ [25, С.503].

Возможно ли увидеть в 105-санитметровый рефлектор непосредственно глазом желтоватый цвет у Плутона?

Самая слабая звёздная величина m_{PP} в соответствии с формулой (2) для 105-санитметрового рефлектора равна:

$$m_{PP} \approx 2,0^m + 5 \cdot \lg 1050 \approx 17,1^m.$$

Поскольку диска у Плутона в такой рефлектор разглядеть не удалось, то Плутон остался виден звездообразным объектом. Следовательно, чтобы увидеть истинный желтоватый цвет у такого объекта, необходимо, чтобы звёздная величина объекта была бы больше или равна $2,5^m$.

Если Плутон имеет $14,2^m$, то в 105-санитметровом рефлекторе его звёздная величина m будет равна:

$$m \approx 14,2^m - (17,1^m - 6^m) = 3,1^m,$$

что меньше $2,5^m$. А при 15^m Плутона – и того хуже: $3,9^m$.

Возможно ли увидеть непосредственно глазом голубоватый цвет Нептуна?

Пусть звёздная величина Нептуна равна $7,7^m$. Будем стараться рассматривать Нептун в телескоп с диаметром объектива D_{MM} так, чтобы звёздная величина Нептуна стала равной $2,5^m$, а диска у Нептуна не было бы видно.

Если телескоп покажет диск Нептуна до того, как общий блеск Нептуна поднимется до $2,5^m$, то никакого истинного цвета Нептуна видно не будет. Если, например, блеск Нептуна достиг $2,6^m$, когда истинный цвет ещё не виден, а диск уже начал проявляться, то Нептун с этого момента становится протяжённым объектом, поверхностная яркость которого, как известно, не может быть повышена, а, следовательно, истинный цвет Нептуна так и останется недоступным глазу.

Случайно оказалось, что Нептун имеет голубоватый, голубой, синий, тёмно-синий цвет – цвета, которые и так передаются нашим сумеречным зрением независимо от воспринимаемого цвета. Однако выполним расчёты.

Найдём сначала m_{PP} для телескопа, в который блеск Нептуна станет равным $2,5^m$:

$$2,5^m = 7,7^m - (m_{PP} - 6^m); \quad \Rightarrow \quad m_{PP} = 11,2^m.$$

Тогда диаметр объектива D_{MM} такого телескопа найдём, используя формулу (2):

$$11,2^m \approx 2,0^m + 5 \cdot \lg D_{MM}; \quad \Rightarrow \quad D_{MM} \approx 70 \text{мм}.$$

Чтобы диск Нептуна не был различим, необходимо, чтобы угловой размер Нептуна $2,3''$ не превышал $4'$. Значит, увеличение M не

должно быть более:

$$M = \frac{\operatorname{tg} 2'}{\operatorname{tg} 1,15''} \approx 104^{\times}.$$

Вочных условиях принято считать, что диаметр зрачка глаза равен 6мм. Тогда диапазон полезных увеличений, предоставляемых 70-миллиметровым объективом, в соответствии с формулами (1) и (4): от $\approx 11,7^{\times}$ до 196^{\times} . Поэтому избежать 104-кратного увеличения вполне возможно, поставив на 70-миллиметровом телескопе, для надёжности, например, всего 35^{\times} .

Значит, в 70-миллиметровый телескоп с 35-кратным увеличением Нептун виден в своём истинном голубоватом цвете. А чтобы этот цвет был виден отчётливо, 35^{\times} можно считать и наименьшим полезным увеличением для 210-миллиметрового телескопа. Тогда Нептун будет иметь блеск $\approx 0^m$ и уже отчётливо покажет свой истинный голубоватый цвет.

Очевидно, что если повышать увеличение до 104^{\times} , а лучше - до 175^{\times} , но сохраняя его наименьшим полезным, а на 105-сантиметровом рефлекторе это возможно, то у Нептуна будет отчётливо виден не только истинный голубоватый цвет, но и диск истинно голубоватого цвета.

Если Плутон в 105-миллиметровом рефлекторе имел $3,1^m$ без видимого диска и производил визуальное впечатление объекта явно желтоватого цвета, то почему тогда Полярная звезда, которая для простого глаза имеет блеск явно намного ярче 3^m и тоже желтоватый

цвет, такого впечатления не производит?

При восприятии цвета индивидуальные особенности играют роль. Процион, например, имеет явно желтоватый цвет, но блеск Проциона $0,48^m$.

Фотографически наличие желтоватого цвета можно определить, находя *показатель цвета*: $m_B - m_V$, где m_B – фотографическая звёздная величина, m_V – визуальная звёздная величина, которую можно получить фотографически на специальной фотоэмulsionии через определённый светофильтр. Если $m_B > m_V$, то это значит, что объект излучает меньше голубых лучей, к которым наиболее чувствительна фотопластинка, а больше жёлтых, оранжевых и красных. Желтовато-белый цвет констатируется при показателе цвета $0,4^m - 0,6^m$.

Если Плутон повысил свой блеск в 105-сантиметровый рефлектор до $2,5^m$, то тогда следует предположить, что Плутон изначально был открыт с блеском $13,6^m$ для невооружённого глаза. Заметить явно отчётливый желтоватый цвет у звездообразного объекта $3,1^m - 3,9^m$ невероятно сложно, практически невозможно.

Можно ли увидеть истинный цвет Плутона ($15^m; 0,23''$) в некоторый телескоп?

Выполним расчёты, подобные сделанным для Нептуна. Разные варианты решений дадим в табл. 15.

Из табл.15 получается, Плутон едва успевает достичь блеска, необходимого для обнаружения цвета, как тут же неизбежно увеличивается его угловой размер, готовый показать диск. Ведь нет гарантии, что некий зоркий глаз не различит диск диаметром $76,6''$, а

тем более 121,2".

Таблица 15

Угловой размер Плутона при наименьших увеличениях некоторых телескопов, делающих блеск Плутона ярче 2,5^m

Диаметр объектива телескопа мм	Наименьшее увеличение ×	Звёздная величина Плутона m	Угловой размер Плутона "
2000	333	2,5	76,6
2512	419	2	96,4
3163	527	1,5	121,2
3982	664	1	152,7
5012	835	0,5	192
6312	1052	0	242 >4'

Поскольку всё-таки в качестве минимального углового размера для различия светлого диска на тёмном фоне выше было принято значение 4', то будем считать, что Плутон ещё позволяет быть виден в своём истинном цвете, и в 5-метровый рефлектор этот цвет заметен весьма отчётливо.

Какова будет поверхностная яркость Земли, наблюдаемой из космоса?

Используя, что визуальное сферическое альбедо Земли равно 0,36 [25, С.503], а визуальное сферическое альбедо Луны равно 0,068 [25, С.504], получаем, что поверхностная яркость Земли в фазе 1,00 будет соответственно в 0,36/0,068 раз больше, чем у Луны, т.е. равна:

$$\frac{0,36}{0,068} \cdot 481176K_{\text{эм}} \approx 2547402K_{\text{эм}}.$$

Довольно высокое значение, сравнимое со значениями яркости Меркурия и Венеры.

Вычислим видимую звёздную величину Земли с расстояния 10пк.

С такого расстояния Землю удобнее всего наблюдать в состоянии какой-нибудь наибольшей элонгации от Солнца. Фаза Земли будет $\approx 0,5$. Тёмный промежуток между Солнцем-звездой и маленькой «звёздочкой»-Землёй составит тогда примерно $0,1''$, что будет доступно для разрешения, например, телескопа Хаббла. Учитывая, что поверхностная яркость Венеры, окружённой тоже атмосферой как и Земля, в фазе 0,50 уменьшается примерно в 2 раза, примем, что и поверхностная яркость Земли в такой ситуации тоже уменьшится в два раза и, следовательно, составит:

$$2547402 \text{ Кэт} / 2 = 1273701 \text{ Кэт.}$$

Беря экваториальный радиус Земли $R_3=6378\text{км}$ [25, С.503], угловой размер Земли с расстояния 10пк будет равен:

$$2 \cdot \arctg \frac{R_3}{10\text{пк}} = 2 \cdot \arctg \frac{6378\text{км}}{10 \cdot 3,086 \cdot 10^{13} \text{км}} \approx 8,52596846 \cdot 10^{-6}''.$$

Подставляя полученные числа в формулу (5):

$$1273701K_{\text{эм}} = \frac{\pi^2}{129600} \cdot \frac{1}{2,512'' \cdot \tg \frac{8,52596846 \cdot 10^{-6}''}{2} \cdot \tg \frac{8,52596846 \cdot 10^{-6}''}{2}},$$

находим видимую звёздную величину m Земли с расстояния 10пк:

$$m \approx 27,86^m.$$

Телескоп, в который можно хотя бы едва на пределе видимости увидеть звёздочку $\approx 28^m$, имеет диаметр объектива в соответствии с формулой (2) около 158 метров.

Исходя из возможностей 10-метрового рефлектора, проделав

подобные расчёты, можно получить, что прямое наблюдение Земли возможно лишь с расстояния не более 0,67пк. С расстояния 0,67пк наибольшая элонгация Земли от Солнца составит хорошее значение – около $1,5''$, звёздная величина Земли будет $\approx 22^m$ и доступна 10-метровому рефлектору на пределе видимости.

Безусловно, для обнаружения слабой планеты около звезды необходимо экранировать изображение звезды от её окрестностей подобно тому, как это делается в коронографах Лио. Звезда, освещая планету, пригодную для жизни человека, должна иметь практически тот же спектральный состав излучения и, главное, светить также спокойно, как Солнце. Впрочем, человек привыкает ко многому, а фантазии природы непредсказуемы.

2.5. Поверхностные яркости спутников больших планет Солнечной системы

На всём протяжении телескопических наблюдений больших планет Солнечной системы открывались спутники планет. Особенно много новых спутников было открыто на рубеже XX–XXI вв..

Вычислим поверхности яркости спутников планет по их видимым звёздным величинам и радиусам [15, С.230-232]. Сведения о Луне [15, С.230] и значение её поверхности яркости в фазе 1,00 из табл.6 добавим для целостности и сравнения, поскольку Луна – спутник Земли. Необходимые угловые размеры спутников других планет рассчитывались следующим образом: расстояние Z от Земли до соответствующего спутника принималось равным $a - 1$, где $a -$

большая полуось орбиты планеты этого спутника в астрономических единицах. 1 астрономическая единица считается равной 149 597 870 км в соответствии с решением XVI съезда Международного Астрономического Союза, принятым в 1976 году [25, С.103]. Поэтому в километрах $Z = Z_{\text{КМ}} = (a - 1) \cdot 149597870 \text{ км}$.

Исключение было сделано для Харона. Харон, как известно, был открыт в 1978 году. Данные о Хароне были получены, когда расстояние от системы Плутон-Харон до Земли было ≈ 29 а.е.. Поэтому для Харона значение Z было принято ≈ 29 а.е., и, соответственно, $Z_{\text{КМ}} \approx 29 \cdot 149597870 \approx 4\ 338\ 338\ 230$ км.

Любой угловой размер U спутника, соответствующий линейному размеру $R_{\text{КМ}}$ в километрах, вычислялся по формуле:

$$U = 2 \cdot \arctg \left(\frac{R_{\text{КМ}}}{Z_{\text{КМ}}} \right).$$

Исходные данные и результаты вычислений запишем в табл.16.

Таблица 16

Поверхностные яркости спутников больших планет

Солнечной системы

Название спутника	Видимая звёздная величина m	Радиус км	Поверхностная яркость Кэт
<i>Спутник Земли</i>			
Луна	- 12,7	1738	481176
<i>Спутники Марса</i>			
Фобос	11,3	14×10	100762
Деймос	12,4	8×6	106700
<i>Спутники Юпитера</i>			
Метис	17,5	20	7522
Адрастея	18,7	12×8	10378
Амальтея	14,1	135×75	6809
Теба	16,0	50	4792

Продолжение таблицы 16

Название спутника	Видимая звёздная величина m	Радиус км	Поверхностная яркость Кэт
Ио	5,0	1815	91388
Европа	5,3	1569	92766
Ганимед	4,6	2631	62865
Каллисто	5,6	2400	30075
Леда	20,2	8	3910
Гималия	15,0	90	3715
Лиситея	18,2	20	3947
Элара	16,6	40	4308
Ананке	18,9	15	3683
Карме	17,9	22	4301
Пасифе	16,9	35	4268
Синопе	18,0	20	4746
<i>Спутники Сатурна</i>			
Атлас	18,0	20×15	26103
Прометей	15,8	70×40	21218
Пандора	16,5	55×35	16196
Эпиметей	15,7	70×50	18612
Янус	14,5	110×80	22356
Мимас	12,9	195	22586
Энцелад	11,7	250	41501
Тефия	10,2	525	37467
Телесто	18,7	12	28539
Калипсо	19,0	15×10	20783
Диона	10,4	560	27389
Елена	18,4	18×15	20065
Рея	9,7	765	27967
Титан	8,3	2575	8963
Гиперион	14,2	175×100	14820
Япет	10,2 – 11,9	720	19920 – 4162
Феба	16,5	110	2577
<i>Спутники Урана</i>			
Корделия	24	15	629,0
Офелия	24	15	629,0
Бианка	23	20	888,7
Крессида	22	35	729,0

Продолжение таблицы 16

Название спутника	Видимая звёздная величина m	Радиус км	Поверхностная яркость Кэт
Дездемона	22	30	992,2
Джульетта	22	40	558,1
Порция	21	55	741,5
Розалинда	22	30	992,2
Белинда	22	35	729,0
Пэк	20	75	1002
Миранда	16,5	235	2563
Ариэль	14,4	580	2912
Умбриэль	15,3	585	1249
Титания	14,0	790	2269
Оберон	14,2	760	2039
<i>Спутники Нептуна</i>			
Наяда	25	25	230,2
Таласса	24	40	225,8
Деспина	23	90	112,1
Галатея	23	75	161,4
Ларисса	21	95	634,7
Протеус	20	200	359,7
Тритон	13,6	1350	2867
Нереида	18,7	170	1649
<i>Спутник Плутона</i>			
Харон	16,8	595	770,9

Наибольшую поверхностьную яркость среди спутников имеет Луна в полнолунии: 481176 Кэт.

За полной Луной, по убыванию яркости, следуют **спутники Марса**: Деймос и Фобос. Поверхностные яркости Деймоса и Фобоса – 100000 Кэт – наибольшие из яркостей вообще всех остальных спутников, в два раза превосходят яркость Луны, когда Луна бывает в фазе 0,50, фактически одного порядка с яркостью самого Марса.

Спутники Юпитера можно разделить на две группы.

Первая – это яркие галилеевы спутники: Ио, Европа, Ганимед и Каллисто. По яркости Ио и Европа приближаются к Деймосу и Фобосу. Ганимед уже слабее их в 1,5 раза, однако ярче Луны, когда та находится в фазе 0,50. Каллисто же может соперничать лишь тонким серпом Луны. Тем не менее яркость Ио, Европы и Ганимеда получилась выше яркости Юпитера, у Каллисто - ниже.

Вторая группа спутников Юпитера – это все остальные, негалилеевы, его спутники. Их яркости в 10 раз ниже яркостей галилеевых спутников и составляют несколько тысяч Кэт. Возможно отметить среди них более-менее яркую Адрастею.

Спутники Сатурна отличаются тем, что большинство из них имеют относительно высокие для своего расположения от Солнца и примерно схожие поверхностные яркости от 20000 до 40000 Кэт, превышающие яркость самого Сатурна. Самым ярким спутником Сатурна является Энцелад: ≈ 41500 Кэт. Энцелад и Тефия превосходят по яркости Каллисто. Немногим уступают ему Телесто, Диона и Рея.

Крупнейший по диаметру спутник Сатурна Титан оказался имеющим невысокую поверхностную яркость среди семейства Сатурна – всего около 9000 Кэт. В тоже время, известно, что Титан всегда можно легко разглядеть неподалёку от Сатурна даже в небольшую 40-миллиметровую подзорную трубу.

Самым тёмным спутником Сатурна явилась Феба – около 2600 Кэт.

Япет, как и ожидалось [20, С.214,215], может предоставить значительное изменение своей яркости: от ≈ 20000 до ≈ 4000 Кэт, что связывают с видимостью разных полушарий Япета: светлого и тёмного [20, С.214].

Спутники Урана значительно слабее спутников предыдущих семейств. Здесь Феба явились бы одним из ярчайших. Можно отметить, что спутники Урана Миранда, Ариэль, Титания и Оберон, открытые ещё наземными наблюдениями, имеют наиболее высокие поверхностные яркости: 2000-3000 Кэт. Умбриэль, также открытый с Земли, со своими 1249 Кэт возглавил группу остальных менее ярких спутников с 500-1000 Кэт. Ни один из спутников Урана не превосходит по яркости самого Урана.

Среди **спутников Нептуна** своей поверхностной яркостью выделяются Тритон – 2867 Кэт и Нереида – 1649 Кэт. По яркости Тритон и Нереида соперничают с ярчайшими спутниками Урана. При этом не стоит забывать, что всё семейство Нептуна находится примерно в 1,5 раза дальше от Солнца, чем семейство Урана. Тритон оказался ярче Нептуна. Остальные спутники очень слабы. Из них можно выделить чуть более ярких Лариссу и Протеуса, которые схожи со слабыми спутниками Урана и ярче Плутона. Оставшиеся спутники Нептуна имеют поверхностные яркости, не превышающие 250 Кэт. И здесь находится самый тёмный спутник в Солнечной системе – Деспина: 112,1 Кэт.

Спутник Плутона Харон показал неожиданно высокое для своего далёкого расположения от Солнца значение поверхностной яркости – 770,9 Кэт, оставив позади всех слабых спутников Нептуна и даже многих спутников Урана. Поверхностная яркость Харона оказалась сопоставимой со среднестатистической по табл.14 яркостью Плутона.

2.6. Поверхностные яркости астероидов

Вычислим поверхностные яркости некоторых астероидов. Данные об их видимой звёздной величине и расстоянии от Земли вблизи противостояния [11, С.150, 151, 153], [14, С.153, 158], [10, С.137], [12, С.162], [13, С.152, 154, 156-158], об их диаметрах [36, С.155, 160, 163, 175] и результаты вычислений запишем в табл.17.

Таблица 17
Поверхностные яркости некоторых астероидов

Номер и название астeroида	Звёздная величина m	Расстоя- ние от Земли a.e.	Диаметр км	Поверхностная яркость Кэт
1 Церера	6,7	1,676	1003	39758
2 Паллада	6,7	1,237	608	58939
3 Юнона	7,7	1,133	247	119267
4 Веста	5,3	1,143	538	233362
6 Геба	7,6	1,020	201	160053
10 Гигейя	9,0	1,759	450	26154
15 Евномия	8,1	1,319	272	92214
16 Психея	9,4	1,685	250	53795
18 Мельпомена	7,7	0,854	135	226831
19 Фортуна	9,4	1,217	215	37942
22 Каллиопа	9,9	1,650	177	64928
44 Низа	8,9	1,077	70	444290
324 Бамберга	8,1	0,805	246	41992
532 Геркулина	9,1	1,638	243	70932

Поскольку видимые звёздные величины и расстояния от Земли рассматриваемых астероидов взяты вблизи их противостояний, то расстояния астероидов от Солнца можно легко найти, прибавив 1 а.е.

к их расстояниям от Земли. В результате получается, что рассматриваемые астероиды находятся не совсем в равных положениях от Солнца. Расстояния их от Солнца в данном случае от $\approx 1,8$ а.е. до $\approx 2,8$ а.е.. Таким образом, астероиды по-разному освещены.

Вычисленные значения поверхностных яркостей астероидов не являются раз и навсегда присущими им. С течением времени при движении по своим эллиптическим орбитам астероиды меняют значения своей поверхностной яркости: поверхность одних может потускнеть, у других, наоборот, – сделаться более яркой. Но тем не менее, некоторые выводы сделать можно.

Наиболее высокое значение поверхностной яркости получилось у астероида Низа: 444290 Кэт. С такой поверхностной яркостью Низа сравним с полной Луной, хотя находится от Солнца в два раза дальше, чем Луна. Низа намного ярче Марса. Высокая отражательная способность Низа нашла своё подтверждение [36, С.161].

Высокими значениями поверхностной яркости обладают Юнона, Веста, Геба, Евномия и Мельпомена: 100000 – 200000 Кэт.

Крупнейший по диаметру астероид Церера оказался имеющим чуть ли не самую малую по сравнению с рассматриваемыми астероидами поверхностную яркость: 39758 Кэт. Второй после Цереры по диаметру астероид Паллада также проявил здесь весьма посредственный результат: 58939 Кэт.

Фортуна и Гигейя – обладатели самых низких значений поверхностной яркости: 37942 Кэт и 26154 Кэт соответственно. Возможно, наименьшее значение яркости Гигейи объясняется тем, что Гигейя находится здесь дальше всех от Солнца. Бамберга, например, показала скромное значение яркости, будучи здесь ближе всех к Солнцу.

Конечно, эти сравнения наводят на мысль о различной, высокой и низкой, отражательной способности. То, что наблюдаемый объект имеет ту или иную отражательную способность, можно понимать, но видеть у объекта приходится только имеющуюся у него яркость. Потом уже – цвет, форму. Какова будет яркость объекта относительно яркости окружающего фона – такая будет и видимость объекта.

2.7. Поверхностные яркости диффузных туманностей

Вычислим теперь поверхностные яркости слабых небесных объектов: туманностей, шаровых звёздных скоплений, галактик. Рассматривать будем объекты в основном из Дополненного каталога Шарля Мессье, из Нового общего каталога (New General Catalogue, NGC) и из Дополнительного каталога (Index Catalogue, IC) Йохана Дрейера. Данные об общем блеске и угловых размерах большинства рассматриваемых слабых объектов также взяты из указанных каталогов Мессье и Дрейера [30].

Начнём с диффузных туманностей, табл.18.

Таблица 18

Поверхностные яркости диффузных туманностей

Объект	Общий блеск m	Угловые размеры ,	Поверхностная яркость K_{эт}
M 1	8,4	6×4	0,065452
M 8	6,0	90×40	0,003980
M 17	7,0	46×37	0,003351
M 20	9,0	29×27	0,001154
M 42	4,0	66×60	0,022830
M 43	9,0	2	0,225978

Продолжение таблицы 18

Объект	Общий блеск m	Угловые размеры '	Поверхностная яркость Кэт
M 78	8,3	8×6	0,035884
NGC 2244	5,0	20×30	0,059986
NGC 2467	7,0	4	0,356488

Поверхностные яркости диффузных туманностей ничтожны по сравнению со всеми поверхностными яркостями, которые были вычислены выше: десятые, сотые, а то и всего-навсего тысячные доли Кэт. Тем не менее, эти туманности видны, хотя бы в телескопы. Среди них есть туманности поярче, послабее. Поверхностные яркости рассматриваемых туманностей отличаются друг от друга в 300 раз! Например, туманность NGC 2467 оказалась с наибольшей поверхностной яркостью $\approx 0,356$ Кэт, а M 20 – с наименьшей: всего $\approx 0,001$ Кэт.

Каким же образом получается, что эти туманности всё-таки видны хотя бы в телескоп? Почему они не видны невооружённым глазом как протяжённые туманности, хотя их угловые размеры, как правило, превышают $4'$? Почему не видны простым глазом туманность Ориона M42 , NGC 2244, M8 ? Ведь их общий блеск не слабее 6^m .

Действительно, как уже упоминалось выше, телескоп не может повышать поверхностную яркость протяжённых небесных объектов. В лучшем случае, при равнозрачковом увеличении, он её лишь незначительно снижает и показывает почти такой же, какая она есть для простого глаза в данных условиях наблюдения.

Рассмотрим сначала, как действует глаз в условиях чрезвычайно низкой освещённости, т.е. глубокой ночью.

Как известно, в условиях чрезвычайно низкой освещённости колбочки сетчатки перестают реагировать на слабые потоки света, и мы можем воспринимать слабосветящийся в темноте объект только благодаря палочкам [38, С.264]. Одновременно с переходом на палочковое зрение ухудшается разрешающая способность глаза. Объясняется это тем, что рецептивные поля, состоящие из палочек, имеют значительно большие размеры, чем рецептивные поля колбочек центральной ямки [40, С.53].

Так, например, линейные размеры полей из палочек в непосредственной близости от жёлтого пятна и отчасти в нём самом соответствуют угловым размерам на небе в $4'$, а, следовательно, и разрешающая способность этой области сетчатки будет соответствовать угловому расстоянию в $4'$.

Лишь очень немногие люди имеют разрешающую способность этой области сетчатки вочных условиях менее $4'$ и, таким образом, могут видеть раздельными некоторые слабые двойные звёзды, например: ε Лиры ($3,83^m$) с угловым расстоянием между главными компонентами ε_1 ($4,68^m$) и ε_2 ($4,50^m$) в $208''$ [23, С.273]. Большинство же людей заметить двойственность ε Лиры не может. Для них в лучшем случае эта звёздочка выглядит немного вытянутой.

Размеры же рецептивных полей из палочек, отстоящих от жёлтого пятна на более значительном расстоянии, постепенно составляют $\sim 8'$, ещё далее $\sim 17'$ и на периферии сетчатки доходят до 1° и более.

Указанные размеры рецептивных полей из палочек не остаются постоянными. С ещё большим понижением освещённости или при длительном пребывании глаза в условиях неизменной чрезвычайно низкой освещённости рецептивные поля из палочек начинают перестраиваться: размеры рецептивных полей из палочек начинают увеличиваться, отчего разрешающая способность глаза ещё более ухудшается, причём не только при использовании бокового палочкового зрения, но и для прямого палочкового зрения в этих условиях. Но и в этих условиях разрешающая способность прямого палочкового зрения остаётся несколько выше разрешающей способности бокового палочкового зрения, которая для последнего на дальней периферии сетчатки начинает составлять 3° и даже более.

С увеличением освещённости происходит обратный процесс: рецептивные поля из палочек начинают разрушаться, перестраиваясь в сторону уменьшения своих размеров. С дальнейшим постепенным повышением освещённости зрительный пигмент палочек постепенно выцветает, палочки перестают реагировать на изменения освещённости, к работе постепенно подключаются колбочки и т.д..

Чего же достигает глаз в условиях низкой освещённости путём увеличения размеров рецептивных полей из палочек?

Если теперь в поле зрения глаза попадёт какой-либо слабосветящийся протяжённый объект малых угловых размеров, таких, что изображение этого объекта задействует своей площадью на сетчатке, скажем, десяток-другой палочек, и если при этом поверхностная яркость объекта невелика, то вряд ли нервные импульсы от такой малочисленной группы рецепторов, пусть даже один общий, суммарный, согласованный импульс ото всех от них,

будут замечены мозгом.

Но если глазу вдруг удастся увеличить площадь изображения этого объекта на сетчатке, например: либо приблизиться к объекту, либо посмотреть на этот объект в телескоп при увеличении, не сильно снижающем поверхностную яркость, то, хотя ни в первом, ни во втором способе поверхностная яркость увеличиться не может, изображение этого объекта на сетчатке станет крупнее и сможет задействовать своей площадью на сетчатке уже не 10-20 палочек, а, скорее всего, гораздо больше. Глаз, в свою очередь, может разместить это более крупное изображение не там, где рецептивные поля состоят из 10-20 палочек (этими полями всё равно ничего не будет видно или будет видно, как и раньше, плохо) а там, где есть более крупные поля (одно или несколько – в зависимости от желаемого получения ощущения). Тогда, если удастся облучить нашим изображением (всем или его частью), например, одно, но целиком, рецептивное поле, предположим, размером в $17'$, то все ~400 палочек, находящиеся в пределах такого рецептивного поля, пошлют один общий, гораздо более сильный нервный импульс в мозг, чем нежели 10-20 палочек. Вероятность обнаружить слабосветящийся объект при этом будет намного выше [28, С.169].

Отсюда следует: если невидимые простым глазом слабые туманности становятся видимыми в телескоп, то это происходит потому, что телескоп увеличивает их угловые размеры.

В качестве дополнительного доказательства этого утверждения приведём описание эксперимента, который несложно воспроизвести.

Возьмём чёрный лист плотного картона размерами $30 \times 20\text{см}^2$.

Наклеим на него из белой бумаги параллельно большей стороне

четыре ряда следующих геометрических фигур:

- 7 кружков диаметрами 18мм, 13мм, 9мм, 6мм, 4мм, 2мм, 1мм;
- 7 квадратиков со сторонами 18мм, 13мм, 9мм, 6мм, 4мм, 2мм, 1мм;
- 7 правильных треугольников со сторонами 18мм, 13мм, 9мм, 6мм, 4мм, 2мм, 1мм;
- 7 эллипсов с большими осями 18мм, 13мм, 9мм, 6мм, 4мм, 2мм, 1мм, а малыми осями в два раза меньше соответствующих больших осей.

Расстояния между центрами фигур в ряду пусть будут 43мм, а расстояния между рядами – 50-53мм. В результате должна получиться аппликация, подобная изображённой на рис.9.

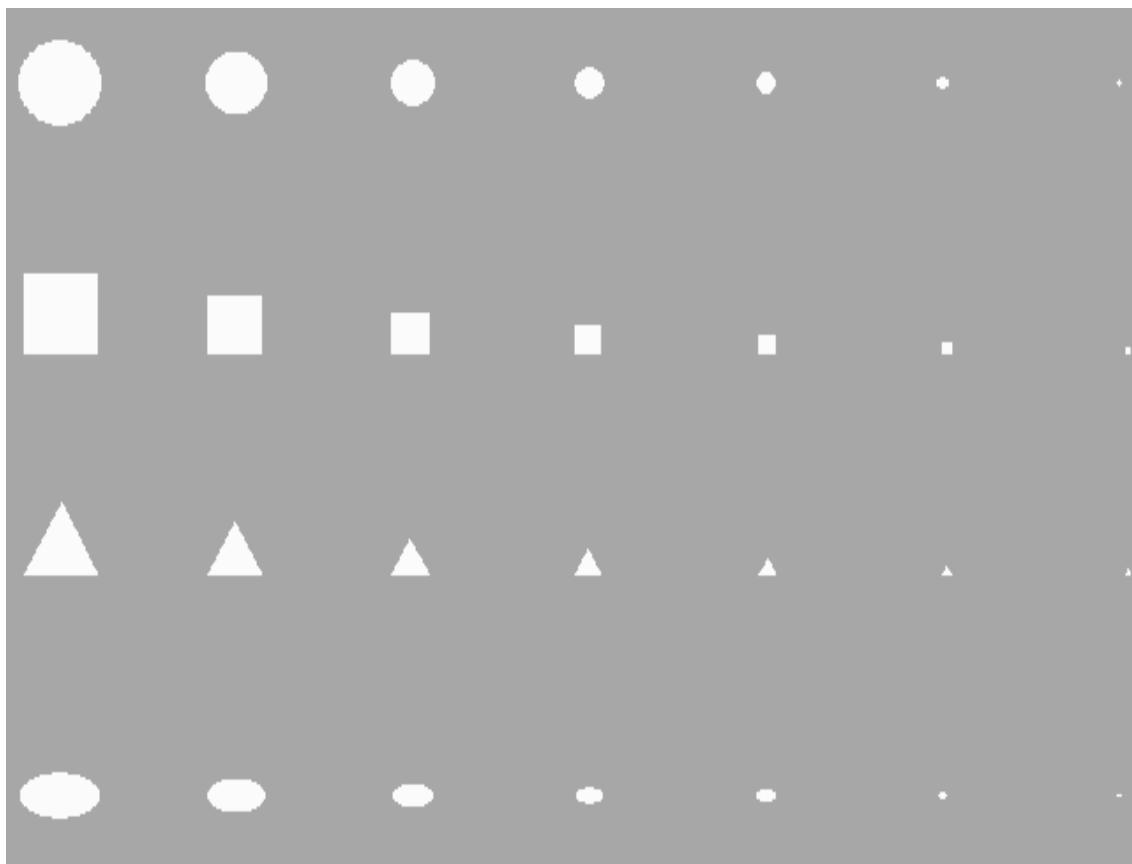


Рис.9. Аппликация.

Будем рассматривать аппликацию с расстояния в 500мм в условиях низкой равномерной освещённости. Для этого в помещении, где находимся с аппликацией, сначала создадим полную темноту, исключив любой свет. Позволим глазам адаптироваться к темноте в течение хотя бы 15 минут. Затем будем понемногу прибавлять освещение, но так, чтобы оно было не более, чем от ясного безлунного звёздного неба на открытой тёмной местности при отсутствии других источников света.

Глядя при этом на аппликацию, с трудом, боковым зрением будет видно, как начнут проступать только самые большие фигуры. Прибавляя ещё немного освещения, можно добиться такого его уровня, при котором самые крупные белые фигуры позволят различить их форму. Фигуры средней величины начнут проблескивать, но определить их форму, не зная её заранее, не удаётся. Имея разную форму, они будут казаться одинаковыми комочками света. Возникает ощущение, что фигуры средней величины не есть мелкие, точечные, а всё-таки крупные, но так как их форму разглядеть не удаётся, то придётся признать их фактически точечными объектами, хотя их угловые размеры при этом – десятки угловых минут.

Мелкие же фигуры не будут видны вообще. Их угловые размеры в этом эксперименте, как правило, более 4'.

Сделаем вывод. Поскольку аппликация освещается равномерно, а фигурки сделаны из одинаково отражающей односортной белой бумаги, следовательно, все фигурки имеют одинаковую поверхностную яркость. Однако те, которые имеют большие угловые размеры – видны, а те, которые меньше – нет. Значит, увеличившиеся

угловые размеры дают возможность увидеть невидимый с малыми угловыми размерами слабосветящийся объект. Это и доказывает ещё раз, почему невидимые простым глазом туманности могут оказаться видимыми в телескоп, не повышающий их яркости.

Очевидно, для обнаружения слабосветящегося объекта, в принципе, необходимо наличие определённого контраста между объектом и окружающим его фоном [28, С.169]. Рассчитывать на помочь цвета не приходится, так как в условиях слабого освещения колбочки сетчатки, дающие возможность видеть различные цвета, не работают. Палочки же передают одинаковое ощущение голубовато-серого, голубовато-белого цвета от любых цветовых оттенков.

Туманность Ориона M42 была открыта случайно с помощью телескопа астрономом Цизатом в 1618 году при наблюдениях кометы 1618 года и только с тех пор стала известной другим наблюдателям [23, С.117].

Почему же никто раньше Цизата не обратил внимание на существование туманности Ориона? Может быть, она образовалась незадолго до своего обнаружения?

Созвездие Ориона является одним из красивейших созвездий всего неба. Яркие цветные и слабые звёзды образуют выразительную фигуру неутомимого охотника, в которой несложно разглядеть такие детали, как: Пояс Ориона с висящим на нём Мечом Ориона, Щит Ориона, Палицу... Меч Ориона обозначен трёмя неяркими звёздами, расположенными примерно на равных расстояниях друг от друга вдоль прямой линии (у одной из крайних звёзд - ещё слабая четвёртая). Средняя звезда Меча как раз и окружена знаменитой туманностью.

Возможно, наблюдателей до Цизата отвлекало всё это великолепие. Может быть, холодная погода не давала подолгу рассматривать созвездие, которое и для широт Греции и арабского Востока является всё-таки зимним.

При прямом взгляде на среднюю звезду Меча – θ Ориона $4,12^m$ – никакой туманности не видно. Видна только одна эта звезда. Однако, если быть не столько внимательным (это, как видим, не помогло), сколько знать заранее, что должно быть увидено, можно заметить: при некотором повороте глаз в сторону от θ Ориона боковым зрением видно, как θ Ориона становится ярче. Вот это усиление яркости и выдаёт присутствие туманности вокруг θ Ориона. Усиление небольшое. Причём туманности всё равно не видно.

Если бы звезды θ Ориона не было, а была бы только одна туманность, то происходило бы следующее: при прямом взгляде на место бывшей θ Ориона туманность, скорее всего, была бы не видна. Не видна, как бывают не видны прямым взглядом белые фигурки на аппликации в условиях низкой освещённости, и которые загораются при боковом зрении. Также и туманность Ориона засияла бы на своём месте при боковом зрении.

Прямое зрение не показывает слабосветящиеся объекты с угловыми размерами менее 1° , так как изображение этих объектов попадает на центральную ямку жёлтого пятна сетчатки. Известно, что на сетчатке напротив зрачка находится так называемое жёлтое пятно с центральной ямкой. В центральной ямке очень плотно сосредоточены исключительно только колбочки [38, С.264]. Диаметр центральной ямки примерно 0,5мм [40, С.44].

Учитывая заднее фокусное расстояние полной системы глаза 22,78мм [21, С.166], по угловым размерам $66' \times 60'$ M42 найдём линейные размеры $l_1 \times l_2$ её изображения на сетчатке:

$$l_1 = 2 \cdot 22,78 \cdot \operatorname{tg} \frac{66'}{2} \approx 0,437 \text{мм}$$

и

$$l_2 = 2 \cdot 22,78 \cdot \operatorname{tg} \frac{60'}{2} \approx 0,398 \text{мм}.$$

l_1 и l_2 не превышают диаметра центральной ямки. Значит, изображение M42 действительно умещается в пределах центральной ямки. Но, может, оно всё-таки воспринимается колбочками центральной ямки? Увы, туманность Ориона при наблюдении глазом в телескоп видна светлого серого цвета, именно цвета светлого тумана, в то время как на фотографиях обнаруживаются красновато-оранжевые и розовые оттенки. Это говорит о том, что цвет M42 не воспринимается, значит, колбочки на M42 не реагируют. Значит, M42 не будет видна при прямом взгляде простым глазом.

Боковым зрением туманность Ориона всё равно была бы видна как звезда, без видимой протяжённости и формы, так же как небольшие белые фигурки аппликации в полутьме. Также, наверное, с большим трудом осознавалось бы, что видится что-то крупное, должно быть, протяжённое.

Если бы звезды θ Ориона не было, то вот это резкое отличие в видимости: когда то появляется, то пропадает, позволило бы заметить существование M42. С присутствием звезды θ Ориона резкого различия не происходит. Звезда θ Ориона видна постоянно: как звезда, как будто бы одинаково. Заметить существование M42 сложно.

NGC 2244 находится в неяркой полосе Млечного Пути. Слабый общий блеск 5^m и невозможность разглядеть протяжённость по причине низкой поверхностной яркости позволяют в лучшем случае обнаружить этот объект в виде рядовой звёзды такой же 5^m .

M8 находится в богатой звёздами части Млечного Пути. При общем блеске 6^m и особо низкой поверхностной яркости M8 также будет восприниматься непротяжённым объектом, находящимся на пределе обнаружения невооружённым глазом, как звезда 6^m .

Поэтому вряд ли NGC 2244 и M8 могут обратить на себя внимание при наблюдениях простым глазом.

Практика наблюдений показывает: если общий блеск точечного или протяжённого небесного объекта ярче, как правило, $\approx 6^m$, то такой объект будет виден глазом [31, С.104]. Мешающие, отвлекающие, маскирующие факторы такие как: тесное соседство со слишком яркими источниками света, присутствие неотличающихся по внешнему виду от объекта других объектов, невидимость краёв объекта, недостаточный контраст с окружающим фоном и др., не учитываются. Если общий блеск небесного объекта слабее $\approx 6^m$, то объект глазом не будет виден.

2.8. Поверхностные яркости планетарных туманностей

Вычислим поверхности яркости планетарных туманностей.

С учётом того, что планетарная туманность M57 («Кольцо»), с угловыми размерами $80'' \times 60''$, имеет в своей середине заметную тёмную дыру размерами $40'' \times 30''$, поверхностная яркость M57 была

рассчитана, как если бы угловые размеры были $69'' \times 52''$, при том же общем блеске. Аналогично, для планетарной туманности M97 («Сова»): исходный угловой размер - $180''$, минус две дыры - $50'' \times 35''$ и $50'' \times 50''$, получается - $168''$, и для планетарной туманности NGC 7293 («Улитка»): исходные размеры - $840'' \times 720''$, минус дыра - $360'' \times 360''$, получается - $745'' \times 638''$. Подобные детали в других планетарных туманностях несущественны и не учитывались. Результаты расчётов запишем в табл. 19.

Таблица 19

Поверхностные яркости планетарных туманностей

Объект	Общий блеск m	Угловые размеры "	Поверхностная яркость Кэт
M 27	7,6	480×240	0,102566
M 57	9,3	80×60 :→ 69×52	0,687971
M 76	12,2	157×87	0,012501
M 97	12,0	180 :→ 168	0,007274
NGC 246	8,5	120	0,358159
NGC 2392	8,3	30	6,88969
NGC 2438	11,5	50	0,130149
NGC 3242	9,0	30×20	5,42347
NGC 4361	11,0	45	0,254662
NGC 6210	9,5	20	5,13285
NGC 6543	9,0	23×18	7,86010
NGC 6572	9,5	10	20,5314
NGC 6826	9,0	20	8,13520
NGC 7009	8,4	23×17	14,4632
NGC 7293	6,5	840×720 :→ 745×638	0,068470
NGC 7662	9,0	25	5,20653
IC 2149	9,9	12×8	14,7958

Поверхностные яркости планетарных туманностей более разно-

образны, чем у диффузных. Различия в значениях достигают 3000 раз. Здесь есть как очень слабые туманности: M76, M97, NGC 7293 с поверхностными яркостями в сотые, а у M97 – тысячные, доли Кэт, так и средние по яркости, например: M27, M57- десятые доли Кэт, яркие: NGC 2392, NGC 6210, NGC 6543, NGC 6826, NGC 7662 – 5-8 Кэт и очень яркие туманности NGC 6572 NGC 7009, IC 2149 – 14-20 Кэт.

Слабые туманности кажутся серыми. Яркие - имеют красивые, чистые, белые, интенсивно голубые и зеленоватые цвета. Однако, на цветных фотографиях этих туманностей часто видны совершенно другие цвета. Так, например, яркая туманность NGC 6543 при наблюдении глазом в телескоп имеет просто серебряно-белый цвет, в то время как на фотографии, полученной космическим телескопом им. Хаббла, она имеет, в основном, ярко-красный цвет с небольшими вкраплениями оранжевого и зелёные краевые дуги.

Практически ни одна планетарная туманность не видна глазом в телескоп в своём истинном цвете, если только этот цвет случайно не совпадёт с цветами сумеречного зрения. Это замечание относится и к самой яркой из рассматриваемых здесь планетарных туманностей NGC 6572 с поверхностной яркостью 20,5314 Кэт.

В тоже время, как известно, Плутон с поверхностной яркостью даже 244,82 Кэт позволяет увидеть свой истинный желтоватый цвет.

Значит, между значениями 20 Кэт и 245 Кэт лежит критическое значение $K_{ЦВ}$, выше которого истинный цвет может быть виден глазом, а ниже – нет.

Указанный диапазон возможно сузить. Если вспомнить, что Плутон был открыт в 1930 году, когда находился от Солнца дальше, чем Нептун, и уже тогда показал свой желтоватый цвет, то это значит,

что система Нептуна освещена Солнцем не хуже системы Плутона. Следовательно, сам Нептун и его спутники, не удаляющиеся при движении по своим орбитам вокруг Нептуна от Солнца дальше, чем Плутон в 1930 году, позволяют видеть свой истинный цвет.

Среди таких спутников Нептуна существует близкий к нему и самый тёмный во всей Солнечной системе – Деспина со средним расстоянием от центра Нептуна 52500 км [25, С.506] и поверхностной яркостью 112,1 Кэт. Если Деспина может быть видна в своём истинном цвете, то критическое значение $K_{ЦВ}$ находится между 20 Кэт и 113 Кэт.

Поскольку вычисляемые значения поверхностных яркостей являются весьма усреднёнными, а восприятие едва доступных из-за низкой яркости истинных цветов – сугубо индивидуально, для критического значения $K_{ЦВ}$ можно взять, например, 100 Кэт.

Ранее было принято ещё одно критическое значение: $2,5^m$ – для возможности видения истинного цвета у звёзд. Если звезда ярче $2,5^m$ – виден истинный цвет звезды, слабее $2,5^m$ – цвет звезды выглядит цветом сумеречного зрения. Хотя звёзды являются точечными объектами для простого глаза, рассчитаем их формальные угловые размеры А, В, используя формулу (5), подставив туда значения $m=2,5^m$ и $K=100$ Кэт:

$$100 K_{\text{эм}} = \frac{\pi^2}{129600} \cdot \frac{1}{2,512^{2,5} \cdot \operatorname{tg} \frac{A}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{B}{2}} .$$

Будем считать, что $A=B$, тогда:

$$\operatorname{tg}^2 \frac{A}{2} = \frac{\pi^2}{129600} \cdot \frac{1}{2,512^{2,5} \cdot 100} \approx 7,61457478 \cdot 10^{-8}.$$

Откуда $A \approx 114''$.

Полученный формальный угловой размер звёзд по крайней мере почти в 2 раза меньше ещё одного принятого критического значения $4'=240''$ – минимального углового размера, необходимого для различия протяжённости. Формально это, конечно, ещё раз доказывает, что звёзды простому глазу кажутся точечными объектами.

В центре планетарных туманностей: M27, M57, NGC 7293 и др., имеется ядро планетарной туманности – горячая центральная звезда, которая инициирует свечение туманности, благодаря которой туманность и светится, а мы туманность видим. Практика наблюдений показывает, что, например, планетарная туманность M57 «Кольцо» хорошо видна в своих деталях в 110-миллиметровый рефлектор при 96 кратах увеличения, однако центральной звезды в центре кольца при этом не видно. Как же так получается: звезда, которая делает туманность светящейся, звезда, за счёт которой мы, собственно, и видим M57, – сама не видна?!

Дело в том, что общий блеск M57 равен $9,3^m$, 110-миллиметровый рефлектор «берёт» (как нетрудно вычислить по формуле (2)) до $12,2^m$, поэтому M57, будучи в этом телескопе ярче предельного значения 6^m , вполне видна в этот телескоп. Центральная звезда планетарной туманности M57 имеет $14,7^m$ и 110-миллиметровому рефлектору просто недоступна. Легко вычислить, что в 400-миллиметровый

телескоп центральную звезду будет видно в центре «Кольца». Таково разрешение этого парадокса.

2.9. Поверхностные яркости шаровых скоплений

Вычислим поверхностные яркости шаровых скоплений, табл.20.

Таблица 20

Поверхностные яркости шаровых скоплений

Объект	Общий блеск m	Угловые размеры '	Поверхностная яркость Kэт
M 2	6,3	12	0,075477
M 3	6,4	6	0,275343
M 4	6,4	20	0,024781
M 5	6,2	12	0,082759
M 9	7,3	6	0,120187
M 10	6,7	8	0,117487
M 12	6,6	9	0,101786
M 13	5,7	23	0,035705
M 14	7,7	3	0,332590
M 15	6,0	12	0,099500
M 19	6,6	5	0,329786
M 22	5,9	17	0,054361
M 28	7,3	15	0,019230
M 30	8,4	9	0,019393
M 53	7,6	6	0,091170
M 54	7,3	6	0,120187
M 55	7,6	15	0,014587
M 56	8,2	5	0,075544
M 62	6,6	6	0,229018
M 68	8,2	4	0,118038
M 69	8,9	4	0,061945
M 70	9,6	4	0,032508
M 71	9,0	6	0,025109
M 72	9,8	5	0,017305

Продолжение таблицы 20

Объект	Общий блеск m	Угловые размеры '	Поверхностная яркость Кэт
M 75	8,0	5	0,090825
M 79	7,9	3	0,276634
M 80	7,7	5	0,119732
M 92	6,1	10	0,130672
M 107	9,2	3	0,083537
NGC 104	3	23	0,429324
NGC 5139	3	30	0,252346
NGC 6356	9,5	3	0,063368
NGC 6934	10,0	1,2	0,249887

Поверхностные яркости шаровых скоплений отличаются относительно малым разбросом значений среди яркостей слабых небесных объектов: от 0,01 Кэт до 0,4 Кэт, примерно в 40 раз. Самым слабым шаровым скоплением оказалось M 55: 0,014587 Кэт, самым ярким - NGC 104: 0,429324 Кэт.

Шаровые скопления с общим блеском ярче $6,3^m$, как правило, видны невооружённым глазом: M 5 и M 92 – с трудом, если знать куда смотреть; M 13 и M 15 – легко, так как находятся на пустых участках неба; M 22 – в гуще Млечного Пути; NGC 104 и NGC 5139 – видны свободно наблюдателям южных широт.

Безусловно, рассуждать о поверхности яркости шаровых скоплений имеет смысл лишь до тех пор, пока шаровые скопления выглядят туманными пятнами, не разрешёнными на отдельные звёзды. Далёкие шаровые скопления нашей Галактики и некоторых других галактик, конечно, являются такими компактными, и даже точечными, объектами, у которых можно рассматривать поверхность яркость.

3.0. Поверхностные яркости галактик и квазаров

Галактики можно вполне считать протяжёнными объектами, за исключением небольшого количества ближайших из них: Большое и Малое Магеллановы Облака (БМО и ММО), M31, M33, NGC 6822, GR 8 [39, С.83, С.84] и некоторые другие, которые разрешаются на отдельные звёзды в большие телескопы при очень сильных увеличениях.

Вычислим поверхностные яркости галактик, табл.21. Данные об общем блеске БМО, ММО и NGC 5128 взяты отдельно, а их угловые размеры рассчитаны по их диаметрам и расстояниям от Земли [25, С.478]. Для NGC 5128 исходный угловой размер был перерассчитан на меньший из-за наличия заметной тёмной полосы, опоясывающей NGC 5128. Сведения о маленькой галактике GR 8 также взяты отдельно [39, С.85, С.90].

Таблица 21

Поверхностные яркости галактик

Объект	Общий блеск m	Угловые размеры '	Поверхностная яркость Kэт
БМО	0,1	685×196	0,024367
ММО	2,4	246×123	0,013037
M 31	4,8	160×40	0,006760
M 32	8,7	3×2	0,198601
M 33	6,7	55×40	0,003418
M 49	8,6	4,5×4	0,072587
M 51	8,1	12×6	0,028761
M 58	8,2	8×6	0,039346
M 59	9,3	2×1,5	0,228559
M 60	9,2	2,5×2	0,150367

Продолжение таблицы 21

Объект	Общий блеск m	Угловые размеры ,	Поверхностная яркость Кэт
M 61	9,6	6	0,014448
M 63	10,1	10×5	0,006563
M 64	6,6	8×5	0,206116
M 65	9,5	8×2	0,035645
M 66	8,8	8×3	0,045281
M 74	10,2	8	0,004677
M 77	8,9	3	0,110125
M 81	7,9	16×10	0,015561
M 82	8,8	7×1,5	0,103500
M 83	10,1	8×7	0,005860
M 84	9,3	2	0,171419
M 85	9,3	3	0,076186
M 86	9,7	3×2	0,079061
M 87	9,2	3	0,083537
M 88	10,2	5×2	0,029930
M 89	9,5	3	0,063368
M 90	10,0	7×3	0,017135
M 94	7,9	3×2	0,414950
M 95	10,4	3	0,027660
M 96	9,1	4×3	0,068698
M 98	10,7	8×2	0,011802
M 99	10,1	5×4	0,016409
M 100	10,6	5	0,008282
M 101	9,6	10×8	0,006502
M 104	8,7	6×2	0,099300
M 105	9,2	2	0,187958
M 106	8,6	19×8	0,008596
M 108	10,7	8×1	0,023605
M 109	10,8	7×4	0,006151
NGC 147	10,4	4×2	0,031118
NGC 205	9,4	8	0,009771
NGC 253	7,5	20	0,008997
NGC 2403	9,5	16×10	0,003564
NGC 2903	10,0	4×2	0,044980

Продолжение таблицы 21

Объект	Общий блеск m	Угловые размеры ,	Поверхностная яркость Кэт
NGC 4038	10,5	2,5	0,036326
NGC 4548	9,5	4	0,035645
NGC 4565	10,5	15×1	0,015136
NGC 4697	10,5	2,5×1	0,090815
NGC 5128	6	10 :→ 9,5	0,158758
NGC 6822	9,3	15×7	0,006530
GR 8	14,6	1,3×0,5	0,008000

Поверхностные яркости галактик, как и ожидалось, невелики, но имеют меньший разброс, чем у туманностей: от тысячных до десятых долей Кэт. Наиболее низкие значения поверхностной яркости встречаются у спиральных галактик. Галактика М33, вроде бы легко доступная по общему блеску даже небольшим телескопам, оказалась вообще самой слабой из всех рассмотренных здесь галактик. Её яркость составила 0,003418 Кэт. Прямые наблюдения подтверждают: ядро М33 довольно яркое, однако рассмотреть края, спиральные рукава чрезвычайно сложно [30, С.86].

Поверхностные яркости Магеллановых Облаков (БМО и ММО) оказались чуть ниже среднестатистической яркости $\approx 0,062$ Кэт рассмотренных здесь галактик и составили соответственно 0,024367 и 0,013037 Кэт. Большое Магелланово Облако, таким образом, примерно в два раза ярче Малого. Может быть, жителям северных умеренных широт полученные числа дадут возможность представить, как видны знаменитые Облака.

Туманность Андромеды (M31) имеет в среднем низкую поверхностьную яркость. Лишь середина M31 с угловыми размерами

примерно $51' \times 16'$, которая в общем-то и бывает видна невооружённому глазу, намного ярче. Сравнивая туманность Андромеды и туманность Ориона, видим, что и по общему блеску M31 уступает M42. При этом туманность Андромеды легко видна невооружённым глазом, а присутствие M42 может быть обнаружено боковым зрением за счёт незначительного увеличения яркости области θ Ориона.

Просто туманности Андромеды ничто не мешает видеть её невооружённым глазом. Она расположена на пустом, контрастном участке неба. Сравнивая яркость M31 с яркостью того участка Млечного Пути, который проходит тут же по созвездиям Персея и Кассиопеи, можно вообразить, что M31 – просто какая-то отдельная часть общей клюковатой полосы Млечного Пути.

Знаменитая массивная радиогалактика Дева А (M87) показала среднюю среди галактик поверхностную яркость в видимом диапазоне: 0,083537 Кэт. Другая, не менее известная радиогалактика Центавр А (NGC 5128) попала в разряд ярких: 0,158758 Кэт.

Эллиптические галактики могут быть как очень яркими: M32 – 0,198601 Кэт, так и имеющими «скромные» значения поверхностной яркости: NGC 147 – 0,031118 Кэт, и слабыми: NGC 205 – 0,009771 Кэт. Все три, кстати, – спутники туманности Андромеды.

Карликовые неправильные галактики Местной группы NGC 6822, GR 8 показали низкие значения поверхностной яркости: 0,006530 и 0,00800 Кэт соответственно. По общему же блеску NGC 6822 является ярчайшей среди карликовых неправильных галактик Местной группы.

Самой яркой галактикой оказалась M94: 0,414950 Кэт.

На сколько же способен глаз отличить одно значение поверхностной яркости от другого?

Опытный наблюдатель переменных звёзд способен заметить наименьшее различие в блеске звёзд примерно на $0,07^m$ [41, С.268]. В соответствии с формулой (5) такому изменению блеска соответствует изменение поверхностной яркости в $2,512^{0,07}$ раз. $2,512^{0,07} \approx 1,0666$. Значит, глаз способен заметить минимальное различие в поверхностных яркостях, если они отличаются друг от друга приблизительно на 6,7%. По другим источникам [40, С.62, 63] указанное значение составляет 2%. Можно принять, что минимальное различие в поверхностных яркостях замечается тогда, когда поверхностные яркости отличаются друг от друга на 2 - 7%. Возможно, лучше, когда яркости находятся в некотором оптимальном диапазоне: не слишком яркие и не слишком тусклые.

Какова поверхностная яркость квазаров?

Рассмотрим один из самых близких к нам квазаров – самый яркий квазар 3C 273 [25, С.481]. Он имеет 13^m [25, С.481], [39, С.139], [24, С.487], его расстояние от Земли примерно 600 Мпк [25, С.482], а может быть и 3,0 млрд. световых лет [24, С.488]. Размеры квазара составляют не более 1 светового дня – порядка размеров Солнечной системы [39, С.141, 142]. По другим источникам, размеры квазаров имеют порядок $10^{15} - 10^{16}$ см [24, С.489].

Рассчитаем угловой размер квазара 3C 273, рассматривая некоторые комбинации его линейных размеров и расстояний от Земли, табл.22. Скорость света примем равной 300000 км/с, диаметр орбиты Плутона (размер Солнечной системы) – 11,8 млрд. км.

Таблица 22

Варианты угловых размеров и поверхностных яркостей квазара 3C 273 при его общем блеске 13^m , принимаемых расстояниях от Земли и линейных диаметрах

Расстояние от Земли	Линейный диаметр	Угловой размер "	Поверхностная яркость Кэт
600 Мпк	1 св. день	$2,887 \cdot 10^{-7}$	$9,805 \cdot 10^{14}$
600 Мпк	диаметр орбиты Плутона	$1,314 \cdot 10^{-7}$	$4,733 \cdot 10^{15}$
600 Мпк	10^{15} см	$1,114 \cdot 10^{-7}$	$6,585 \cdot 10^{15}$
600 Мпк	10^{16} см	$11,14 \cdot 10^{-7}$	$6,585 \cdot 10^{13}$
$3,0 \cdot 10^9$ св. лет	1 св. день	$1,884 \cdot 10^{-7}$	$2,302 \cdot 10^{15}$
$3,0 \cdot 10^9$ св. лет	диаметр орбиты Плутона	$0,8576 \cdot 10^{-7}$	$1,111 \cdot 10^{16}$
$3,0 \cdot 10^9$ св. лет	10^{15} см	$0,7268 \cdot 10^{-7}$	$1,547 \cdot 10^{16}$
$3,0 \cdot 10^9$ св. лет	10^{16} см	$7,268 \cdot 10^{-7}$	$1,547 \cdot 10^{14}$

Из-за большого разброса исходных данных значения поверхности яркости квазара 3C 273 получились весьма далеко отстоящими друг от друга. В целом можно сказать, что поверхность яркость квазара 3C 273 велика. Она намного превосходит наибольшую поверхность яркость рассмотренных выше звёзд и в среднем составляет $\sim 10^{15}$ Кэт.

Принимая во внимание найденную выше корреляционную зависимость поверхности яркости и температуры звёзд: $T \approx 28,973 \cdot K^{0,214}$, можно попытаться оценить температуру квазара 3C 273, а используя формулу [25, C.380]

$$\lg R = \frac{1}{2} \lg L + 2 \lg \frac{T_\Theta}{T},$$

где R – будет радиус квазара 3C 273 в солнечных радиусах, L – светимость 3C 273 в светимостях Солнца, T – температура 3C 273 в градусах Цельсия, а $T_{\odot}=5500^{\circ}\text{C}$, можно рассчитать светимость квазара 3C 273 в светимостях Солнца.

Результаты расчётов сведём в табл. 23.

Таблица 23

Варианты температур и светимостей квазара 3C 273
при его общем блеске 13^{m} , рассчитанных поверхностных яркостях
и линейных размерах

Поверхностная яркость Кэт	Линейный диаметр	Линейный радиус \odot	Температура $^{\circ}\text{C}$	Светимость \odot
$9,805 \cdot 10^{14}$	1 св. день	18621	46800	$1,818 \cdot 10^{12}$
$4,733 \cdot 10^{15}$	диаметр орбиты Плутона	8477	65500	$1,445 \cdot 10^{12}$
$6,585 \cdot 10^{15}$	10^{15} см	7184	70300	$1,378 \cdot 10^{12}$
$6,585 \cdot 10^{13}$	10^{16} см	71839	26300	$2,698 \cdot 10^{12}$
$2,302 \cdot 10^{15}$	1 св. день	18621	56200	$3,780 \cdot 10^{12}$
$1,111 \cdot 10^{16}$	диаметр орбиты Плутона	8477	78700	$3,013 \cdot 10^{12}$
$1,547 \cdot 10^{16}$	10^{15} см	7184	84400	$2,862 \cdot 10^{12}$
$1,547 \cdot 10^{14}$	10^{16} см	71839	31500	$5,553 \cdot 10^{12}$

Температуры квазара 3C 273 также получились с большим разбросом, а вот светимости оказались одного порядка: примерно от $1,4 \cdot 10^{12}$ до $5,6 \cdot 10^{12}$ солнечных светимостей, т.е. отличаются друг от друга не более, чем в 4 раза. По порядку своей величины значения светимостей квазара 3C 273 получились равными светимости нескольких триллионов Солнц.

Сравним варианты светимостей квазара 3C 273 со светимостью Галактики, которая считается довольно высокой среди галактик [24, С.472]. Светимости галактик измеряют абсолютными звёздными величинами [25, С.476], [24, С.472]. Предполагая, что абсолютная видимая звёздная величина M нашей Галактики составляет $\sim -20^m$ [25, С.478], [39, С.84], [24, С.472], по формуле (9) можно найти светимость L Галактики в солнечных светимостях:

$$L = 2,512^{M_\Theta - M} = 2,512^{4,77^m - (-20^m)} \approx 8,1 \cdot 10^9.$$

Значит, значения светимостей квазара 3C 273 превышают светимость Галактики, состоящей из около 200 млрд. звёзд [25, С.432], в сотни раз. Последнее подтверждается соответствующими источниками [24, С.488, С.489], [39, С.141, С.142].

Определим общий блеск галактики M31, если бы она находилась от нас на расстоянии 12 миллиардов световых лет. Учитывая приводимые в табл.21 угловые размеры M31 $160' \times 40'$ и расстояние от Земли – 0,7Мпк [25, С.478], находим линейные размеры M31: $32,585$ Кпк $\times 8,145$ Кпк. С расстояния 12 млрд. св. лет эти линейные размеры дадут угловые размеры: $1,826'' \times 0,456''$. Принимая во внимание, что поверхностная яркость не изменяется, используя формулу (5), находим общий блеск галактики M31 с расстояния 12 млрд. св. лет:

$$0,006760 K_{\Theta m} = \frac{\pi^2}{129600} \cdot \frac{1}{2,512^m \cdot \operatorname{tg} \frac{1,826''}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{0,456''}{2}}.$$

Откуда $m \approx 23,4^m$.

Действительно ли это так? Окружающее нас космическое пространство чёрное. Это объясняется расширением Вселенной.

Возможно, что поверхностная яркость уменьшается при переходе к таким масштабам расстояний. Открытие закономерностей в изменении поверхностных яркостей небесных объектов от больших расстояний приоткроет тайну пространственно-временной структуры Вселенной.

Заключение

В результате исследования была решена проблема отсутствия конкретных числовых значений поверхностных яркостей небесных объектов.

Для её решения была предложена формула (5), которая вычисляет поверхностную яркость по видимой звёздной величине m и угловым размерам A , B . Видимая звёздная величина и угловые размеры небесного объекта являются естественными, легко доступными для исследований внешними данными небесного объекта, которые измерялись ещё с незапамятных времён и в настоящее время вычислены чрезвычайно точно для многих известных небесных объектов. Поэтому вычисление поверхностной яркости выполняется достаточно быстро.

Было доказано, что получающиеся значения поверхностных яркостей правильно отражают истинные их величины, удобно и адекватно описывают их зрительное восприятие человеком.

Значения поверхностных яркостей, получаемых по формуле (5), впервые предложено измерять в новых единицах измерения – $K_{\text{эт}}$.

Были вычислены поверхностные яркости многих небесных объектов: Солнца, звёзд, Луны, больших планет Солнечной системы, почти всех известных на сегодня их спутников, астероидов, туманностей, шаровых скоплений, галактик и др. Теперь все эти яркости получили конкретные числовые значения в $K_{\text{эт}}$.

Зная числовые значения поверхностных яркостей небесных объектов, можно совершенно объективно оценивать их поверхностную яркость. Например, обрабатывая фотоснимки

небесных объектов на компьютере, можно ввести конкретные числовые значения, характеризующие поверхностную яркость того или иного участка изображения, и таким образом значительно повысить реалистичность изображения небесного объекта на мониторе компьютера.

Ведь хорошо известно, что даже обычные диапозитивы, рентгеновские снимки в медицине, любительские слайды, *рассматриваемые на просвет*, выглядят намного живее любой высококачественной фотографии или художественной картины. Это происходит потому, что диапазон яркостей, передаваемых таким способом, намного шире, чем в отражённом свете. А стоит ли говорить астрономам о том, что никакая самая лучшая фотография небесного объекта не производит такого восхитительного впечатления от увиденной яркости этого объекта при наблюдении его глазом в телескоп?

Очевидно, что даже небольшое такое улучшение изображения может привести к значительным научным открытиям, проясняющим природу небесного объекта.

Снимки, полученные космическим телескопом им.Хаббла, на которых видны, в основном, одни мириады далёких галактик, можно было бы сделать намного информативнее, изображая их на мониторе компьютера с учётом и выделением различной поверхностной яркости их участков. Возможно, эти различия в поверхностных яркостях привели бы к важным открытиям в понимании пространственно-временной структуры Вселенной.

Сложность различения отдельных деталей квазаров и других небесных объектов, имеющих малые угловые размеры, может способствовать привлечению к исследованию поверхностной яркости

таких объектов. Анализ получающихся числовых значений, безусловно, важная часть такой работы. Однако явная визуализация поверхностной яркости зачастую приводит к лучшему пониманию и скорейшему совершению научного открытия.

По ходу основного исследования поверхностных яркостей были получены некоторые интересные побочные результаты.

Так, было установлено, что существует критическое значение для общего блеска точечного небесного объекта, ярче которого точечный небесный объект виден в своём истинном цвете, а слабее – нет. Разумеется, данное значение сопряжено с индивидуальными способностями цветовосприятия отдельного наблюдателя. Оказалось, что оно находится в пределах от 2^m до 3^m и было взято равным $2,5^m$.

При 2^m истинный цвет точечного небесного объекта вполне ещё виден при внимательном рассмотрении, при $2,5^m$ истинный цвет точечного небесного объекта ещё как-то подмечается, при 3^m – точно нет.

При создании компьютерных программ, изображающих звёздное небо на мониторе или экране, было бы, конечно, неплохо учитывать это критическое значение для более естественного отображения точечных небесных объектов и, соответственно, лучшего его восприятия зрителем.

Для поверхностных яркостей также было доказано существование критического значения, выше которого поверхность протяжённого объекта будет видна в своём истинном цвете, а ниже – истинный цвет поверхности будет недоступен. На основе вычислений и анализа поверхностных яркостей самых ярких планетарных туманностей, Плутона и наиболее тёмных спутников Нептуна это критическое

значение было оценено в 100 Кэт. Безусловно, указанное значение также сопряжено с индивидуальным восприятием цвета. Однако цветочувствительность у разных наблюдателей не отличается настолько, чтобы можно было утверждать, что многие наблюдатели видят истинные цвета у самых ярких планетарных туманностей или отрицают видимость истинного желтоватого цвета Плутона.

Наличие пограничного значения для поверхностных яркостей подчёркивает существование более жёсткого ограничения на видимость цвета, чем то, которое даёт пограничное значение общего блеска.

Ведь, как известно, с помощью оптического телескопа общий блеск может быть повышен [24, С.157], в то время как поверхностная яркость – нет [18, С.137].

Подставляя критические значения общего блеска и поверхностной яркости в формулу (5), было получено среднестатистическое значение разрешающей способности глаза для дневного, различающего цвета, зрения, хорошо согласующееся с существующим принятым значением, полученным другими методами.

Было изложено влияние различных механизмов зрения на видимость небесных объектов.

Приведено подробное объяснение особенностей видимости некоторых конкретных небесных объектов, например: M42, M57, M31.

При вычислении поверхностных яркостей звёзд была установлена тесная корреляционная связь между десятичным логарифмом поверхностной яркости и десятичным логарифмом температуры поверхности звёзд. Бессспорно, подобная связь существует и между поверхностной яркостью и цветом звезды.

Очевидно и то, что для звёзд существует ещё одно критическое значение поверхностной яркости, выше которого звезда начинает светиться. Возможно, это значение порядка 10 миллионов Кэт.

Особый интерес представляет собой перспектива вычисления цвета слабых планетарных туманностей. Это позволило бы многое проверить и уточнить в технологии получения цветных фотоснимков небесных объектов. Однако эта тема другой проблемы и требует своего отдельного исследования.

В ходе исследования было подробно рассмотрено явление ослепления глаза Луной, наблюданной в телескоп при определённом увеличении в условиях сумеречного и ночного освещения. Увеличенные линейные размеры изображения Луны на сетчатке выходят за пределы жёлтого пятна сетчатки и засвечивают области палочек, обеспечивающих видение в сумерках. При этом на время выключаются из работы именно те области палочек, которые обеспечивают и наиболее острое сумеречное зрение.

Возможно, расчёты, выполненные в данной работе, помогут точнее устанавливать минимальную дистанцию для переключения с дальнего света фар автомобиля на ближний. При этом необходимо учитывать линейные размеры фар, которые весьма различны у разных марок автомобилей. Соответственно, различными, индивидуальными могут быть и рекомендации к переключению фар.

Во время полного теневого лунного затмения поверхностная яркость Луны значительно падает. Однако истинный красновато-желтоватый цвет затмившейся Луны остаётся вполне виден. Это означает, что поверхностная яркость затмившейся Луны остаётся значительно выше 100 Кэт. Представляет интерес получение более точного числового значения этой яркости и его сравнение со

значениями яркостей далёких планет Солнечной системы и их спутников.

Изучение распределения значений яркости по видимой поверхности протяжённого небесного объекта, которые непросто выявить только по обычным цветным фотоснимкам, может также послужить источником новых знаний об объекте.

Аналогично, вычисление поверхностной яркости солнечной короны во времена полных солнечных затмений в различных участках короны и короны в целом, сравнение находимых значений со значениями, полученными в предыдущих затмениях, возможно, помогло бы открыть новые сведения о динамике дневного светила.

Поверхностная яркость объекта есть инвариант относительно расстояния до объекта. На основе этого можно попытаться проложить шкалу расстояний в далёком космосе. Возможные отклонения наблюдаемой поверхностной яркости от предполагаемой могут дать много новых открытых об истинных масштабах и устройстве видимой части Вселенной.

Библиографический список использованной литературы

1. Астрономический календарь на 1979 г. – М.: Наука, 1978. – 336с.
2. Астрономический календарь на 1980 г. – М.: Наука, 1979. – 352с.
3. Астрономический календарь на 1981 г. – М.: Наука, 1980. – 320с.
4. Астрономический календарь на 1982 г. – М.: Наука, 1981. – 336с.
5. Астрономический календарь на 1983 г. – М.: Наука, 1982. – 320с.
6. Астрономический календарь на 1984 г. – М.: Наука, 1983. – 320с.
7. Астрономический календарь на 1985 г. – М.: Наука, 1984. – 320с.
8. Астрономический календарь на 1986 г. – М.: Наука, 1985. – 304с.
9. Астрономический календарь на 1987 г. – М.: Наука, 1986. – 288с.
10. Астрономический календарь на 1988 г. – М.: Наука, 1987. – 288с.
11. Астрономический календарь на 1989 г. – М.: Наука, 1988. – 320с.
12. Астрономический календарь на 1990 г. / Под ред. Д.Н.Пономарёва – М.: Наука, 1989. – 336с.
13. Астрономический календарь на 1991 г. / Под ред. Д.Н.Пономарёва – М.: Наука, 1990. – 368с.
14. Астрономический календарь на 1992 г. / Под ред. Д.Н.Пономарёва – М.: Наука, 1991. – 352с.
15. Астрономический календарь на 1993 г. / Под ред. Д.Н.Пономарёва – М.: Наука, 1992. – 288с.
16. Астрономический календарь на 1994 г. / Под ред. Д.Н.Пономарёва – М.: Физматлит, Наука, 1993. – 272с.
17. Астрономический календарь на 1995 г. / Под ред. Д.Н.Пономарёва – М.: Физматлит, Наука, 1994. – 272с.
18. Гершензон Е.М., Малов Н.Н., Мансуров А.Н. Курс общей физики: Оптика и атомная физика: Учебное пособие. – М.: Просвещение, 1992. – 320с.

19. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие. – М.: Высш. школа, 1997. – 479с.
20. Дариус Дж. Недоступное глазу: Пер. с англ./Предисл. К.В.Чибисова. – М.: Мир, 1986. – 249с.
21. Енохович А.С. Краткий справочник по физике. – М.: Высш. школа, 1976. –288с.
22. Зверева С.В. В мире солнечного света. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 160с.
23. Зигель Ф.Ю. Сокровища звёздного неба: Путеводитель по созвездиям и Луне. – М.: Наука, 1986. – 296с.
24. Климишин И.А. Астрономия наших дней. – М.: Наука, 1986. – 560с.
25. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии: Учебное пособие / Под ред. В.В.Иванова. – М.: Едиториал УРСС, 2001. – 544с.
26. Куликов Л.Я. Алгебра и теория чисел: Учебное пособие. – М.: Высш. школа, 1979. – 559с.
27. Лабузов А.С. Визуальные наблюдения Луны и Венеры: Тез. докл. Пятая межвузовская науч. конф. молодых учёных. – Липецк: ЛГПИ, 1991. – 138с.
28. Лабузов А.С. Визуальные наблюдения туманностей и галактик: Тез. докл. Шестая межвузовская науч. конф. молодых учёных. – Липецк: ЛГПИ, 1992. – 211с.
29. Лабузов А.С. Поверхностные яркости небесных объектов: Тез. докл. Седьмая межвузовская науч. конф. молодых учёных. – Липецк: ЛГПИ, 1993. – 116с.
30. Лабузов А.С. Наблюдение галактик, туманностей и звёздных скоплений / Под ред. А.А.Мартыся. – М.: Наука, 1993. – 240с.

31. Лабузов А.С. Гипотеза о видимости небесных объектов: Тез. докл. Восьмая межвузовская науч. конф. молодых учёных. – Липецк: ЛГПИ, 1994. – 124с.
32. Лабузов А.С. Визуальные наблюдения звёздного неба во время проведения внеаудиторных занятий по астрономии / Профессиональная подготовка в высшей педагогической школе накануне ХХI века: Межвузовский сб. науч. тр. / Науч. ред. Э.Д.Новожилов. – М.: МПУ, ЕГПИ, 1997. – 160с.
33. Лабузов А.С. Лабораторный практикум по астрономии: Учебное пособие. – М.: Прометей, 1999. – 90с.
34. Лабузов А.С. Расчёт и анализ поверхностных яркостей небесных объектов / Методология и методика непрерывного образования: Межвузовский сб. науч. тр. / Науч. ред. В.Е.Медведев. – Елец: ЕГУ им.И.А.Бунина, 2001. – 172с.
35. Лабузов А.С. Исследование поверхностных яркостей небесных объектов / Общее и частное в образовательном процессе высшей школы: Сб. науч. тр. / Науч. ред. Э.Д.Новожилов. – М.: МГОУ, Елец: ЕГУ им.И.А.Бунина, 2003. – 162с.
36. Симоненко А.Н. Астероиды или тернистые пути исследований. – М.: Наука, 1985. – 208с.
37. Уайт А. Планета Плутон./Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 127с.
38. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики, том III. – Л.:Физматгиз, 1962. – 644с.
39. Ходж П. Галактики: Пер. с англ./Под ред. Ю.Н.Ефремова. – М.: Наука, 1992. – 192с.
40. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение: Пер.с англ. – М.: Мир, 1990. – 239с.
41. Цесевич В.П. Что и как наблюдать на небе. – М.: Наука, 1979. – 304с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Основные визуальные характеристики небесных объектов...	9
1.1. Необходимые сведения о телескопе.....	9
1.2. Видимая звёздная величина.....	18
1.3. Видимость угловых размеров.....	29
Глава 2. Расчёт и анализ поверхностных яркостей небесных объектов.....	36
2.1. Формула для вычисления поверхностных яркостей небесных объектов.....	36
2.2. Поверхностные яркости звёзд.....	44
2.3. Поверхностные яркости Луны.....	59
2.4. Поверхностные яркости больших планет Солнечной системы.....	67
2.5. Поверхностные яркости спутников больших планет Солнечной системы.....	85
2.6. Поверхностные яркости астероидов.....	91
2.7. Поверхностные яркости диффузных туманностей.....	93
2.8. Поверхностные яркости планетарных туманностей.....	103
2.9. Поверхностные яркости шаровых скоплений.....	108
2.0. Поверхностные яркости галактик и квазаров.....	110
Заключение.....	119
Библиографический список использованной литературы.....	125