

ОПЫТ АБСОЛЮТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЯРКОСТИ ПОВЕРХНОСТИ САТУРНА

В. В. Шаронов

§ 1.

Задача фотометрических наблюдений Сатурна, производившихся мною на Ереванской Астрономической Обсерватории в оппозицию 1935 года заключалась в испытании и сравнении методов абсолютных определений коэффициента яркости, предложенных мною ранее¹. Измерения производились при помощи 9-ти дюймового рефрактора, к которому был привинчен фотометр Розенберга.

Сатурн был выбран в качестве объекта для испытаний главным образом потому, что согласно данным фотоэлектрических измерений, его блеск отличается исключительным постоянством, что в свою очередь указывает на постоянство яркости. Моментом, отрицательно влияющим на результаты измерений, являлся малый угловой размер диска планеты; при данной аппаратуре изображение Сатурна в поле зрения было намного меньше внутреннего поля сравнения фотометра, освещаемого лампой накаливания. Поэтому при измерениях рефрактор располагался таким образом, чтобы край поля сравнения пересекал диск планеты по середине. При этом положении средний николь поляризационной системы фотометра вращался до тех пор, пока край поля сравнения не пропадал на фоне наиболее яркой центральной части диска Сатурна. Легко видеть, что при таких условиях в наблюдение могут войти добавочные погрешности, происходящие как от неточности наведения на центр диска, так и от диффракции, которые однако в настоящей работе, имеющей лишь релативный характер, не изучались и не учитывались.

Лампой сравнения в фотометре служила „Цвергглюмпе“ Осрам, питаемая от батареи аккумуляторов. Сила тока контролировалась по редетвом амперметра типа „ДНН“ и поддерживалась на уровне 0.400 А. Цвет выравнивался посредством синего клина фотометра, установленного на отсчете 30.0 мм., при чем цветовой разницы сравниваемых объектов почти не замечалось. Все наведенные делались исключительно поляризационной системой; серый клин в данной работе не применялся. На пути светового потока объекта, непосредственно перед луммеровским кубом фотометра, был установлен серый желатиновый фильтр, в дальнейшем обозначаемый „№ 2“ и имевший прозрачность около 1/10.

Наблюдения велись в течении 5 вечеров: 10 11 12, 13 и 15 сентября 1935 г., во всех случаях при совершенно безоблачной погоде. Всего выполнено 9 наблюдений, каждое из которых состояло из 10 отсчетов фотометра.

Вывод абсолютных коэффициентов яркости из измерений был произведен по трем различным методам; детали этого процесса описываются ниже.

§ 2. Вывод коэффициента яркости из абсолютной яркости освещенной поверхности с расчетом освещенности по световой солнечной постоянной

Для применения этого метода было необходимо подвергнуть фотометр абсолютной градуировке, которая позволяла бы переводить отсчеты круга анализатора поляризационной системы в абсолютные значения яркости наблюдаемого объекта, выраженные в стильбах. Это было сделано по возвращении в Ленинград при помощи имеющегося в фотометрической лаборатории АОЛГУ эталона яркости. Этот последний представляет собою металлическую камеру К цилиндрической формы, изнутри покрашенную в белый цвет. Внутри камеры помещается газополная лампа Л на 12V, 35W, которая питается током от аккумуляторов. В боковой стенке камеры сделано отверстие О, перед которым в специальном цилиндрическом отростке Т вставляется молочное стекло М и, в случае надобности,

диафрагма Д. Вырезанный последний участок молочного стекла М, освещенного лампой Л изнутри и наблюдаемого извне, и служит поверхностью стандартной яркости.

Градуировка эталона была произведена на прецизионной фотометрической скамье. Она состояла в том, что сила света окна эталона, при диафрагме Д с диаметром $D = 16,88$ мм, была измерена в направлении, нормальной к плоскости диафрагмы. Эталонном источником света служила группа из 5 пустотных ламп, принадлежащая фотометрической лаборатории АОЛГУ. Сила света I окна эталона яркости при силе тока 2,00 А была найдена равной 0.470 межд. свечей. Отсюда для яркости окна В в стильбах находим:

$$B = \frac{I}{S} = \frac{0.470}{2.238} = 0.210 \text{ сб},$$

где $S = \frac{\pi D^2}{4} = 2.238 \text{ см}^2$ есть площадь диафрагмы.

Поскольку Сатурн наблюдался при синем клине перед лампой сравнения, то и перед эталоном при его сравнении с полем фотометра устанавливался синий фильтр. Последний представлял собою ограниченную желатиновую пленку, заклеенную между двумя стеклами. Его интегральная визуальная прозрачность τ была найдена путем расчета по спектральной прозрачности, при чем цветовая температура окна эталона яркости была принята равной 2468° . Численное интегрирование по методу трапеции дало: $\tau = 0.119$. Отсюда для яркости эталона B_ϕ , наблюдаемого через фильтр, имеем:

$$B_\phi = \tau B = 0.210 \times 0.119 = 0.0251 \text{ сб}.$$

Сравнение фотометра с эталоном яркости производилось двумя различными путями. Во первых, на фотометр была навинчена трубка с небольшим короткофокусным объективом, дававшим в поле зрения фокальное изображение окна эталона. Яркость этого изображения, наблюдаемого через глазную линзу окуляра, диаметр отверстия которой меньше диаметра выходного зрачка оптической системы, будет отличаться от яркости, которая имела бы

место при наблюдении на 9'' рефракторе, лишь вследствие различия в потерях света в обоих объективах. Произведя при таких условиях ряд отсчетов фотометра при том же режиме лампы, который имел место и при наблюдении Сатурна, мы легко найдем множитель C , при помощи которого относительные яркости, получаемые из отсчета круга анализатора, переводятся в абсолютные значения яркости объекта при наблюдении с малым объективом. Умножив этот множитель на отношение прозрачностей 9'' и малого объективов, мы найдем и множитель C для условия работы на 9'' рефракторе.

Второй метод состоял в том, что эталон яркости вплотную подвигался к передней диафрагме фотометра, установленного без объектива. В этих условиях все поле зрения заполняется равномерной яркостью, которая отличается от яркости фокального изображения, полученного на 9'' рефракторе, на полную величину потерь в объективе последнего.

Таким образом, для получения нужного нам множителя C необходимо знать прозрачность T 9''-дюймового объектива—абсолютную и по отношению к малому объективу. Вполне надежный результат здесь может дать только эксперимент, выполнение которого, однако, лежало вне моих возможностей. Поэтому нужные данные были найдены просто путем расчета по данным, указанным в статье Hassenstein'a², а именно, потери приняты равными в 5% у каждой поверхности стекла, граничащей с воздухом и в 1,5% на каждый сантиметр толщины стекла. Это дает:

$$\text{Большой объектив } T_6 = 0,74$$

$$\text{Малый объектив } T_m = 0,78$$

$$\text{Отношение } T_6 / T_m = 0,95$$

С этими данными и был произведен окончательный расчет. Необходимо заметить, что из сопоставления результатов измерений по обоим методам непосредственно получается прозрачность T_m малого объектива, при чем получаем:

$$T_m = 0,77$$

что хорошо совпадает с данными расчета.

Окончательные результаты сравнения фотометра с эталоном яркости дают следующие значения множителя C , пересчитанного на прозрачность 9" объектива:

Измерения с малым объективом	0.363
Измерения без объектива	0.357
Среднее	0.360

Таким образом, для нахождения яркости объекта B в стильбах по отсчету круга фотометра α (в первом квадрате) при наблюдении на 9" рефракторе с принятым режимом лампы имеет следующее равенство:

$$B = 0.360 \frac{\tau_2}{\tau} \sin^4 (\alpha - 0^\circ, 28);$$

здесь τ_2 — прозрачность фильтра № 2, с которым производились наблюдения эталона яркости, τ — прозрачность фильтра, использованного при наблюдении объекта, а $0^\circ, 28$ — поправка нуля.

Для нашей задачи необходимо иметь яркости светила истинные, т. е. не искаженные поглощением в земной атмосфере. Редукция за последнее представляет наиболее трудную часть в практическом применении данного метода.

Лучше всего было бы непосредственно определять коэффициент прозрачности атмосферы для момента наблюдения светила. Но это требует специальных измерений, которые в нашем случае не могли быть поставлены. Поэтому была принята гипотеза, что прозрачность атмосферы днем не отличается от прозрачности ночью, и редукция измерений производилась с значениями коэффициента прозрачности p , определенными путем наблюдений солнца в дневную часть тех же суток (по большей части вечер или утро, непосредственно прилегающие к ночи наблюдений), при помощи клинового солнечного фотометра.

Истинная яркость B_0 находилась путем деления B на прозрачность атмосферы для зенитного расстояния Z , на котором наблюдался Сатурн:

$$B_0 = B p^m(z),$$

где $m(z)$ — воздушная масса, взятая по таблицам Бемпорада.

Наконец, для нахождения коэффициента яркости по формуле:

$$r = \frac{\pi B_0}{E}$$

необходимо знать еще абсолютную освещенность E наблюдаемой точки Сатурна. Она была вычислена со значением световой солнечной постоянной $E_0 = 13,5$ фот², по формуле:

$$E = - \frac{E_0}{\Delta^2 h} = \frac{13,5}{92,76} = 0,145 \text{ фот.},$$

где Δh — радиус вектор Сатурна во время измерений; предполагается, что для наблюдавшейся наиболее яркой части диска падение солнечных лучей происходит нормально.

Результаты, полученные из редукции измерений приводятся в таблице 1.

§ 3. Определение коэффициента яркости через сравнение с яркостью стандартной поверхности, наблюдаемой на прОсвет

Оборудование для этого метода было весьма примитивным и состояло из круга белой бумаги, накладывавшегося непосредственно на об'ектив 9" рефрактора. Рефрактор направлялся непосредственно на солнце, лучи которого при этом падали на бумажный экран нормально. В этом положении поле зрения рефрактора заполняется равномерной яркостью прошедшего сквозь бумажный круг света, яркость которого пропорциональна $r_0 E$, где r_0 — коэффициент яркости бумаги, а E — освещенность прямыми лучами солнца. Большое значение имеет надежная защита экрана от рассеянного света неба и земли. В нашем случае оборудовать, необходимое устройство не представлялось возможным, вследствие чего на экран мог попадать свет от сравнительно широкой зоны неба вокруг солнца. Это может дать систематическую ошибку в направлении снижения значений коэффициента яркости.

Основной константой при данном методе является коэффициент яркости бумажного экрана r_z . Он был определен путем сравнения с эталонной баритовой пластинкой ВИМС'а, коэффициент яркости которой был равен 0.96. Для этой цели бумажный экран и эталонная пластинка попеременно устанавливались на фотометрической скамье в плоскости визирных отвесов. Неподвижно установленная на скамье лампа давала на этой плоскости неизменную освещенность E , при нормальном падении лучей на измеряемый образец. Яркость объектов сравнивалась фотометром Розенберга с малым объективом, при чем для бумаги измерялась яркость в нормальном направлении со стороны противоположной источнику света, а для стандартной пластинки—под углом 45° к нормали. Если яркости бумаги и пластинки в произвольных единицах будут B_z и B_n , то имеем:

$$B_z = r_z E; B_n = r_n E$$

откуда:

$$r_z = r_n \frac{B_z}{B_n}$$

Этим путем было получено:

$$r_z = 0.169$$

Вычисление коэффициента яркости поверхности Сатурна при этом методе производится по формуле:

$$r = r_z \frac{\sin^4(\alpha_h - 0^\circ.28)}{\sin^4(\alpha_\odot - 0.28)} \frac{P_{\odot m}(Z_\odot) - 1}{P_{h(m)}(Z_h) - 1} \frac{\Delta^2 h}{\Delta^2 \frac{1}{2}} \frac{\tau_1}{\tau_2}$$

Здесь α_h и $\alpha_\odot$ — отсчеты круга фотометра при наблюдении Сатурна и Солнца, Δh — радиус вектор Сатурна, $\Delta \frac{1}{2}$ — радиус вектор Земли в момент наблюдения Солнца, Z_h и $Z_\odot$ — зенитные расстояния Сатурна и Солнца при соответствующих наблюдениях, а r_h и $r_\odot$ — коэффициенты прозрачности атмосферы. Для $r_\odot$ я имел надежные значения из наблюдений солнечным фотометром, что же касается до r_h , то здесь, как и в предыдущем случае, было принято, что прозрачность атмосферы днем и ночью одинаковая. Наконец τ_1/τ_2 есть отношение прозрачностей серого филь-

тра № 3, с которым наблюдался бумажный экран и фильтра № 2, применявшегося при наблюдениях Сатурна. Это отношение было найдено из специальных измерений и принято равным 11,76.

Результаты, полученные по этому методу, приводятся в таблице 2. Необходимо заметить, что кроме погрешностей, происходящих от недостаточно совершенного экранирования рассеянного света неба, в них может содержаться еще вторая погрешность, происходящая от освещения бумажного экрана светом, отраженным стеклянной поверхностью об'ектива. Эта погрешность имеет тот же знак, что и предыдущая, т. е. она уменьшает полученные значения.

Выгодное преимущество данного метода перед предыдущими заключается в том, что наблюдения солнечного света производились систематически, чередуясь с ночными измерениями Сатурна. Этим исключается влияние изменений силы света лампы фотометра и других перемен в инструменте не только за время перевозки в Ленинград, но и от одного дня к другому.

§ 4. Вывод коэффициентов яркости из параллельных измерений яркости планеты и освещенности Солнцем на земле

Для этой цели были использованы измерения солнечной освещенности посредством солнечного клинового фотометра, поставленные для определения световой солнечной постоянной³. К ним необходимо было только добавить сравнительную градуировку, дающую множитель перехода от световых единиц одного фотометра к единицам другого (предполагается, что оба прибора дают показания в произвольных единицах). Как было указано в моих предыдущих работах¹, такая градуировка осуществляется посредством стандартной поверхности, имеющей произвольную, но равномерную и постоянную яркость. В условиях работы в Ереване за такую поверхность было решено принять ясное небо. Оно, правда, имело тот существенный недостаток, что цвет его сильно отличался от полей сравнения обоих

фотометров в синюю сторону, поскольку последние были приспособлены к измерению света планет и Солнца, но зато его яркость не зависела от перемещений фотометров и наблюдателя, что всегда может иметь место при лабораторных измерениях.

Для градуировки 9" рефрактор с фотометром Розенберга и приемная трубка солнечного фотометра были установлены строго параллельно. Так как освещенность от небольшого участка неба, вырезанного специальной диафрагмой, укрепленной на передней трубке фотометра, была в сравнении с солнечной слишком малой, то пришлось молочное приемное стекло заменить пластинкой из матового стекла. Это вносило в измерения новую постоянную — отношение коэффициентов яркости матового и молочного стекол, которая была определена как из специальных сравнительных измерений Солнца на клиновом фотометре (в Ереване), так и из специальных лабораторных экспериментов (в Ленинграде). В среднем было получено:

$$d = \operatorname{og} \frac{r_{\text{мат}}}{r_{\text{ал}}} = 1.541$$

Самое сравнение состояло в параллельных измерениях освещенности от некоторого участка неба, вырезанного диафрагмой и яркости этого участка. Обозначая эти величины в системе клинового фотометра через e , b , а в системе фотометра Розенберга — через e' , b' , получаем следующую группу равенств:

$$\left. \begin{aligned} \log e &= D = fx + g \\ \log b' &= 4 \log \operatorname{Sfn} (\alpha - 0^{\circ}.28) \\ e &= ke'; \quad b = kb' \end{aligned} \right\} (*)$$

Здесь D — плотность точки клина, состоящей на x мм от его начала, а f и g — клиновые константы; коэффициент k — есть величина, подлежащая определению. Она находится на основе следующего очевидного равенства:

$$e = b \frac{\pi p^2}{R^2} = kb' \frac{\pi p^2}{R^2}$$

где ρ — радиус диафрагмы, а R — ее расстояние от матового стекла солнечного фотометра. Применяя равенства(*), для практического вычисления k получаем следующую формулу:

$$\log k = fx + g - 4 \log \sin(\alpha - 0^\circ.28) + 2 \log R - 2 \log \rho - \log \pi$$

где x и α — отсчеты фотометров, полученные во время сравнительной градуировки. В среднем из 4-х независимых серий сравнений было получено:

$$\log k = 4.5692$$

Расчет коэффициента яркости основан все на том же предположении равенства прозрачности атмосферы днем и ночью, благодаря чему сравнения, произведенные при равных зенитных расстояниях, можно считать свободными от эффекта экстинкции.

Наблюдения на солнечном фотометре представляют собою ряд последовательных измерений освещенности Солнца при различных зенитных расстояниях. Поскольку логарифм солнечной освещенности, согласно первому из равенств (*) линейно связан с отсчетом клина x , а при неизменной прозрачности атмосферы $\log e$ линейно связан с воздушной массой $m(z)$, можно ожидать, что и отсчет клина x будет линейной функцией воздушной массы. Практика это подтвердила, а потому для каждой серии наблюдений по способу наименьших квадратов были найдены коэффициенты M и N уравнения:

$$x = M + Nm(z)$$

Это позволяло легко вычислить отсчет клина x для того значения $m(z)$, которое соответствовало измерению Сатурна. По отсчету x находилась плотность соответствующей точки клина D .

Коэффициент яркости r находится согласно равенству:

$$r = \frac{\pi b}{e} \cdot \frac{\Delta^2 h}{\Delta^2 d}$$

Если сюда подставить равенства (*) и вспомнить, что сравнение фотометров произведено с матовым стеклом, а

измерение солнечной освещенности—с молочным, то для практического вычисления r получаем формулу:

$$\log r = \log k + 4 \log \sin (\alpha - 0^{\circ}.28) + \log \pi - D - d + 2 \log \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

Результаты вычислений приводятся в таблице 3.

§ 5. Сравнение результатов между собой и с другими данными

В таблице 4 дается сводка измерений по всем методам. Рассмотрение чисел этой таблицы показывает, что несмотря на то, что измерения в некоторых отношениях велись и обрабатывались лишь приближенно и без соблюдения многих весьма важных предосторожностей, результаты сходятся с точностью до 10%, что следует признать весьма удачным. Несколько непонятна причина значительных расхождений между отдельными днями наблюдений; отчасти тут могут влиять колебания в прозрачности атмосферы ночью, которая нами условно была принята равной прозрачности атмосферы днем.

Как окончательное среднее значение коэффициента яркости из всех измерений мы получаем:

$$r = 0.30 [0/4] - 1$$

Оно меньше того, что можно было ожидать. Дело в том, что гипотетическое альbedo Сатурна по данным Рэсселя⁴ вдвое больше и составляет 0.60. В своей предыдущей работе⁵ я показал, что гипотетическое альbedo численно совпадает со средним коэффициентом яркости. Отсюда следует, что если бы поверхность Сатурна была близка к ортотропной, то и коэффициент яркости ее был бы вдвое больше полученного мною. Причина расхождения может лежать как в особенных свойствах отражения света поверхностью планеты, так и в систематических ошибках измерений. Решение вопроса о том, которая из этих двух причин играет доминирующую роль в данном случае, приходится предоставить будущим работам.

Таблица № 1

Определение коэффициента яркости Сатурна из абсолютных измерений яркости поверхности

№ п/п	Дата	Час	B (сб)	m(z)	p	B ₀ (сб)	$\frac{r}{[0/4]} - 1$
1	сент. 10	25 ^h 53 ^m	0,00885	1,601	0,834	0,01183	0,205
2	11	23 45	0,00904	1,626	0,826	0,01234	0,206
3	12	22 57	0,00868	1,599	0,811	0,00984	0,202
4	12	22 58	0,00708	1,599	0,811	0,00989	0,214
5	18	21 21	0,00809	1,783	0,811	0,00885	0,191
6	13	21 26	0,00839	1,767	0,811	0,00925	0,200
7	15	21 17	0,01215	1,763	0,807	0,01773	0,383
8	15	21 21	0,01023	1,747	0,807	0,01488	0,321
9	15	21 27	0,01037	1,725	0,807	0,01497	0,323

Таблица № 2

Вывод коэффициента яркости Сатурна через сравнение с просвечивающим экраном

№ п/п	Дата наблюдения Сатурна	Дата измерения экрана	$\log B_h/B_a$ (испр. за атмосф. погл.)	$\frac{r}{[0/4]} - 1$
1	Сент. 10	Сент. 11	9,412	0,339
2	11	12	9,451	0,371
3	12	13	9,319	0,274
4	12	13	9,344	0,290
5	13	13	9,296	0,280
6	13	13	9,315	0,271
7	15	15	9,560	0,478
8	15	15	9,474	0,392
9	15	15	9,477	0,394

Т а б л и ц а № 3

Определение коэффициента яркости Сатурна из параллельных измерений яркости планеты и освещенности на земле

№	Дата наблюдения Сатурна	Дата наблюдения Солнца	$4 \log \sin (\alpha - 0^{\circ}.28)$	D	$r [0/4]^{-1}$
1	Сент. 10	Сент. 11	8,390	2,843	0,832
2	11	12	8,400	2,875	0,816
3	12	12	8,268	2,879	0,281
4	12	12	8,294	2,879	0,245
5	13	13	8,228	2,851	0,224
6	13	13	8,249	2,853	0,234
7	15	15	8,538	2,865	0,445
8	15	15	8,454	2,867	0,365
9	15	15	8,458	2,869	0,366

Т а б л и ц а № 4

Сводка определений коэффициента яркости Сатурна по разным методам

№	Д а т а	По абсолютной яркости	По сравнен. с просвечивающим экраном	По сравнению с освещенностью на земле	Среднее
1	Сент. 10	0,26	0,34	0,33	0,31
2	11	0,27	0,37	0,32	0,32
3	12	0,20	0,27	0,23	0,23
4	12	0,21	0,29	0,24	0,25
5	13	0,19	0,26	0,22	0,22
6	13	0,20	0,27	0,23	0,23
7	15	0,38	0,48	0,44	0,44
8	15	0,32	0,39	0,36	0,36
9	15	0,32	0,39	0,37	0,36
Среднее		0,26	0,34	0,30	0,30