

УДК 520.246

**О дифракции света солнца
на одной внешней затмевающей системе коронографа**

А. В. Ленский

Дополнено исследование дифракционных свойств сплошного внешнего затмевающего экрана с внеосевой диафрагмой особой формы, открывающей радиальный участок солнечной короны. Посредством асимптотической оценки интеграла, представляющего комплексную амплитуду краевой дифракционной волны, показано, что в случае касания в угловых точках кривых, образующих контур диафрагмы, эффективность экрана возрастает до такой степени, что в качестве главной линзы коронографа представляется возможным использовать объектив с ординарными требованиями к полировке и выбору стекол линз. Указана возможность образования диафрагмы с помощью упруго изогнутых линеек.

ON THE SOLAR LIGHT DIFFRACTION AT ONE EXTERNAL OCCULTING SYSTEM OF THE CORONAGRAPH, by Lenskij A. V. — Diffraction properties of the entire external occulting screen with the peculiar off-axis opening that views a radial region of the solar corona are further investigated. By means of asymptotic approximation to the integral representing a complex amplitude of the diffraction boundary wave it is shown that provided tangency at two corner points of the aperture-forming curves the efficiency of the screen increases extremely so that the use of ordinary objective as a main coronagraph lens is found possible. Splines are suggested to form the aperture.

В работах [3—6] рассмотрены дифракционные свойства сплошного внешнего затмевающего экрана коронографа с внеосевой диафрагмой особой формы (рис. 1), сканирующей корону по азимуту*. Показано, что эффективность подавления дифракционной засветки таким экраном намного выше, чем у других внешних затмевающих систем, таких как трехдисковая [9—15] или зубчатый диск [7, 8, 16—18]. Однако не был рассмотрен случай, когда $2\alpha = 2\beta = 0$ при угловых точках A и B контура сканирующей диафрагмы (рис. 1). Этот пробел мы намерены восполнить данной работой — тем более, что при $\alpha = \beta = 0$ количество света, дифрагируемого ко входному отверстию коронографа диафрагмой, резко уменьшается.

Мерой эффективности внешней затмевающей системы, как и ранее, будем считать отношение E освещенности входного отверстия (находящегося в тени рассматриваемой системы), обусловленной действием солнца, к освещенности, создаваемой в плоскости входного отверстия коронографа открытым солнцем. Величину E назовем относительной освещенностью.

Если U' — комплексная амплитуда дифрагированного внешней затмевающей системой монохроматического света в исследуемой точке тени, обусловленная действием точки солнца, положение которой определяется угловым расстоянием i от центра солнечного диска и азимутальным углом ψ , то

$$E = \frac{1}{\pi i_{\odot}^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{i_{\odot}} |U'|^2 i di d\psi, \quad (1)$$

где i_{\odot} — угловой радиус солнца. В выражении (1) не учитывается по-

* Идея азимутального сканирования солнечной короны принадлежит С. Кучми.

темнение солнца к краю, и амплитуда падающих световых волн считается равной единице.

Комплексную амплитуду U' удобно выразить, согласно Рубиновичу (см., например, [1] с. 484; [3, 4, 6]), следующим криволинейным интегралом по контуру Γ отверстия в экране:

$$U' = \frac{1}{4\pi} \oint_{\Gamma} U \frac{[\mathbf{a}\mathbf{a}'d\mathbf{p}]}{1-\mathbf{a}\mathbf{a}'} \frac{\exp(jks)}{s}, \quad (2)$$

где \mathbf{p} — радиус-вектор, описывающий Γ ; $U = \exp(jk\mathbf{p}\mathbf{a})$ — комплексная амплитуда падающей (в данном случае плоской) волны; \mathbf{a} и \mathbf{a}' — единичные векторы падающего луча и прямой, соединяющей элемент $d\mathbf{p}$ контура Γ с исследуемой точкой, соответственно; s — расстояние от $d\mathbf{p}$

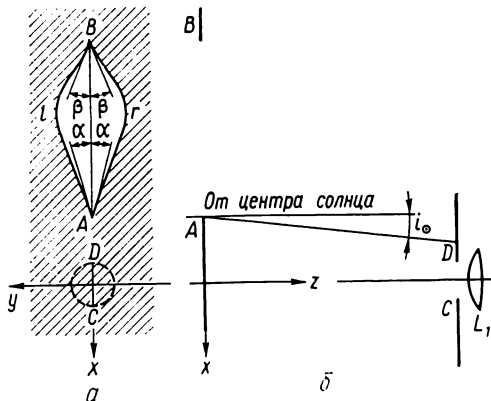


Рис. 1. Внешняя затмевающая система в виде сплошного экрана с внешней сканирующей корону по азимуту диафрагмой AB (a — вид спереди, b — вид сбоку); 2α , 2β — углы между касательными к сторонам диафрагмы в точках A , B ; CD — входное отверстие коронографа; ось сканирования z , не обязательно совпадающая с оптической осью объектива L_1 , проходит через центр солнца; $i\odot$ — угловой радиус солнца

до этой точки; $k = 2\pi/\lambda$; λ — длина волны; $j = \sqrt{-1}$, квадратные скобки означают смешанное произведение трех векторов, а отсутствие знака между двумя векторами — их скалярное произведение.

Относительную освещенность E мы находили ранее [3—6] посредством асимптотической оценки интеграла (2) при $k \rightarrow \infty$ с помощью теоремы [2, с. 47]. Однако при $\alpha = \beta = 0$ главный член соответствующего асимптотического разложения обращается в нуль, и для оценки U' нужно искать следующий член ряда. Полное асимптотическое разложение интеграла типа (2) при отсутствии точек стационарной фазы можно получить повторным интегрированием по частям:

$$\begin{aligned} & \int_{x_1}^{x_2} g(x) \exp(jkf(x)) dx = \\ & = \frac{\exp(jkf(x_2))}{jkf'(x_2)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{g_n(x_2)}{(-jk)^n} - \frac{\exp(jkf(x_1))}{jkf'(x_1)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{g_n(x_1)}{(-jk)^n}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $f'(x) \equiv \frac{df(x)}{dx} \neq 0$ на отрезке $x_1 \leq x \leq x_2$,

$$g_0(x) \equiv g(x), \quad g_{n+1}(x) = \frac{d}{dx} \left(\frac{g_n(x)}{f'(x)} \right),$$

а условия, которым должны удовлетворять функции $g(x)$, $f(x)$ [2], в случае интеграла (2) выполняются, если дуги AlB , BrA контура диафрагмы (рис. 1) описываются аналитическими функциями.

Интеграл (2) распадается на два (по AlB и BrA), и каждый из последних при $k \rightarrow \infty$ может быть оценен в соответствии с (3). При $\alpha = \beta = 0$ члены разложений, соответствующие $n = 0$, взаимно уничтожаются, и главный член асимптотического разложения интеграла (2)

формируется из слагаемых, соответствующих $n=1$. Одного этого нового главного члена вполне достаточно для оценки U' , если значения радиусов кривизны $r_{IA}, r_{IB}, r_{rA}, r_{rB}$ дуг AlB, BrA в точках A, B конечны. Если к тому же $r_{IA}=r_{rA}=r_A$ и $r_{IB}=r_{rB}=r_B$, то в соответствии с изложенным

$$U' = \frac{\exp(jk(\rho_A a + s_A)) \lambda^2 (a - a'_A)}{16\pi^3 r_A s_A (1 - aa'_A) ((a - a'_A) \tau_A)^3} \{ [aa'_A (v_{IA} - v_{rA})] \tau_A - [aa'_A \tau_A] (v_{IA} - v_{rA}) \} + \frac{\exp(jk(\rho_B a + s_B)) \lambda^2 (a - a'_B)}{16\pi^3 r_B s_B (1 - aa'_B) ((a - a'_B) \tau_B)^3} \{ [aa'_B (v_{rB} - v_{IB})] \tau_B - [aa'_B \tau_B] (v_{rB} - v_{IB}) \}, \quad (4)$$

где τ_A, τ_B — единичные векторы общих касательных к кривым AlB, BrA в точках A, B ; $v_{IA}, v_{rA}, v_{rB}, v_{IB}$ — единичные векторы главных нор-

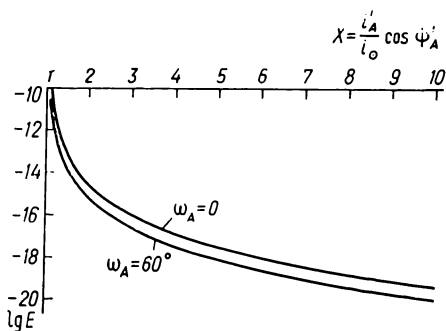


Рис. 2. Зависимость относительной освещенности E от угловой координаты X исследуемой точки при $\lambda=500$ нм, $r_A=10$ см, $s_A=1$ м



Рис. 3. Фрагмент идеального контура зубчатого диска: описываемые аналитическими функциями кривые сторон зубьев касаются друг друга в угловых точках, а максимальное значение γ_m угла между касательной и радиусом меньше критической величины, при которой на сторонах возникают активные зоны

малей соответствующих кривых в тех же точках; остальные символы с индексами A, B обозначают указанные ранее величины, относящиеся к соответствующим точкам.

Напомним, что расположение диафрагмы AB относительно входного отверстия коронографа CD (рис. 1) должно удовлетворять условию $(a - a') \tau \neq 0$ (τ — орт касательной к линии контура Γ), выполняющемуся для всех направлений падающих солнечных лучей, всех точек контура и всех положений исследуемой точки внутри CD . При этом условии на контуре диафрагмы не смогут возникнуть так называемые активные зоны, являющиеся окрестностями точек стационарной фазы.

Для того, чтобы найти явную зависимость E от параметров диафрагмы и положения исследуемой точки, воспользуемся прямоугольной системой координат xyz (рис. 1). Пусть в этой системе

$$a = \{\sin i \cos \psi, \sin i \sin \psi, \cos i\},$$

$$a'_A = \{\sin i'_A \cos \psi'_A, \sin i'_A \sin \psi'_A, \cos i'_A\}, \quad (5)$$

$$a'_B = \{\sin i'_B \cos \psi'_B, \sin i'_B \sin \psi'_B, \cos i'_B\};$$

$$\tau_A = \{1, 0, 0\}, \quad \tau_B = \{-1, 0, 0\}; \quad (6)$$

$$v_{IA} = \{0, -\cos \omega_A, \pm \sin \omega_A\},$$

$$v_{rA} = \{0, \cos \omega_A, \pm \sin \omega_A\},$$

$$\mathbf{v}_{rB} = \{0, \cos \omega_B, \pm \sin \omega_B\}, \quad (7)$$

$$\mathbf{v}_{iB} = \{0, -\cos \omega_B, \pm \sin \omega_B\}.$$

Геометрический смысл углов, входящих в выражения (5) и (7), очевиден (введение отличных от нуля углов ω_A, ω_B позволяет не ограничиваться рассмотрением лишь плоских контуров диафрагмы). Тогда в приближении малых углов i, i'_A, i'_B

$$U' = \frac{\exp(jk(\rho_A \mathbf{a} + s_A)) \lambda^2 \cos \omega_A}{4\pi^3 r_A s_A (i \cos \psi - i'_A \cos \psi'_A)^3} - \frac{\exp(jk(\rho_B \mathbf{a} + s_B)) \lambda^2 \cos \omega_B}{4\pi^3 r_B s_B (i \cos \psi - i'_B \cos \psi'_B)^3}. \quad (8)$$

Легко заметить, что если i'_B хотя бы в несколько раз превосходит i'_A (на практике эти углы должны различаться еще больше), то при $r_B \approx r_A$ и $\omega_B \approx \omega_A$ вкладом дальней угловой точки B можно пренебречь. В таком случае после интегрирования (1) с U' в виде одного лишь первого члена из выражения (8) имеем окончательно

$$E = \frac{\lambda^4 \cos^2 \omega_A}{64\pi^6 i_\odot^6 r_A^2 s_A^2} \frac{X(4X^2 + 3)}{(X^2 - 1)^{4.5}}, \quad (9)$$

где $X = \frac{i'_A}{i_\odot} \cos \psi'_A > 1$.

Расчитанные с помощью выражения (9) кривые зависимости десятичного логарифма E от X для двух значений ω_A (0° и 60°) при $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ см, $r_A = 10$ см, $s_A = 100$ см представлены на рис. 2. Эти кривые показывают чрезвычайно низкий уровень вредной засветки входного отверстия коронографа, находящегося в соответствующем месте тени внешнего затмевающего экрана с диафрагмой (рис. 1), у которой $\alpha = \beta = 0$. Это означает, что в качестве главной линзы можно использовать практически любой объектив подходящего фокусного расстояния и светосилы, состоящий из нескольких линз с одинарными требованиями к полировке и выбору стекол. Для сравнения укажем, что при такой же диафрагме, но с $\beta \approx \alpha = 15^\circ$ [5, 6], относительная освещенность E в диапазоне углов i'_A от 1.5 до $10 i_\odot$ изменяется от 10^{-7} до 10^{-11} .

Касание кривых контура в угловых точках благоприятно сказывается на эффективности не только сканирующей диафрагмы, но и зубчатого диска, идеальная форма контура которого показана на рис. 3. Однако если зубчатый диск с таким контуром остается лишь математической абстракцией вследствие невыполнимости внеш-

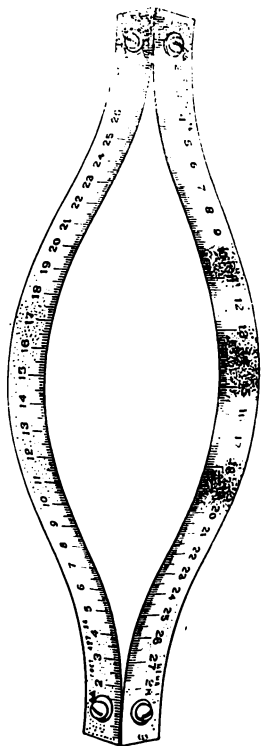


Рис. 4. Макет диафрагмы, образованной двумя упруго изогнутыми линейками, заземленные концы которых касаются друг друга краями, формирующими контур диафрагмы

них угловых точек, то диафрагма с $\alpha = \beta = 0$ вполне реальна. Один из возможных ее вариантов представлен на рис. 4. Показанная диафрагма образована двумя гибкими линейками. Контур диафрагмы не плоский, хотя и состоит из двух плоских кривых, касающихся друг друга в угловых точках.

Реализация высокой эффективности внешней затмевающей системы с описанной выше диафрагмой зависит от поглощения и рассеяния све-

та в пространстве за диафрагмой AB (рис. 1). Там должны быть предусмотрены надежные светоотводы и светоловушки, а лучше всего — возможность прохождения прямого солнечного пучка навывлет.

В заключение заметим, что монохроматическая относительная освещенность E становится численно равной интегральной, полихроматической, если при ее расчете по формуле (9) использовать значение λ^4 , усредненное по спектру с весом, равным распределению яркости солнца по длинам волн. Это справедливо, когда не учитывается различное для разных длин волн потемнение солнца к краю. Для получения имеющей больший практический интерес интегральной относительной освещенности, которая определяется не только источником, но также спектральными пропусканием оптической системы и чувствительностью приемника, нужно лишь соответствующим образом изменить при усреднении λ^4 весовую функцию.

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.— М.: Наука, 1970.— 856 с.
2. Колсон Э. Т. Асимптотические разложения.— М.: Мир, 1966.— 160 с.
3. Ленский А. В. О возможности значительного снижения уровня рассеянного света при регистрации солнечной короны вне затмений // Солнечные данные.— 1978.— № 6.— С. 75—80.
4. Ленский А. В. Расчет освещенности в тени внешнего затмевающего экрана коронографа. II. Одиночные экраны // Пробл. космической физики.— 1979.— Вып. 14.— С. 122—132.
5. Ленский А. В. Расчет освещенности в тени внешнего затмевающего экрана коронографа. V. Сравнение эффективности внешних затмевающих систем // Там же.— 1981.— Вып. 16.— С. 116—122.
6. Ленский А. В. Теоретическая оценка эффективности внешних затмевающих систем коронографов // Астрон. журн.— 1981.— 58, вып. 3.— С. 648—659.
7. Dollfus A., Fort B., Morel C. Observation de la couronne solaire en ballon // Rech. spat.— 1968.— 7, N 5.— P. 1—7.
8. Dollfus A., Fort B., Morel C. Photographie des jets de la couronne solaire a l'aide de ballons stratospheriques // C. r. Acad. Sci. B.— 1968.— 266, N 25.— P. 1537—1540.
9. Gillett F. Summary report.— Minneapolis: Univ. of Minnesota, 1961.
10. Koomen M. J., Detwiler C. R., Brueckner G. E., et al. White light coronagraph in OSO-7 // Appl. Opt.— 1975.— 14, N 3.— P. 743—751.
11. MacQueen R. M., Gosling J. T., Hildner E., et al. The High Altitude Observatory white light coronagraph // Proc. SPIE.— 1974.— 44, Mar. 4—6.— P. 207—212.
12. Newkirk G., Jr., Bohlin D. Reduction of scattered light in the coronagraph // Appl. Opt.— 1963.— 2, N 2.— P. 131—140.
13. Newkirk G., Jr., Bohlin D. Scattered light in an externally occulted coronagraph // Ibid.— 1964.— 3, N 4.— P. 543—544.
14. Newkirk G., Jr., Bohlin J. D. The first flight of Coronascope II // Sky and Telesc.— 1964.— 28, N 1.— P. 16—19.
15. Newkirk G., Jr., Bohlin J. D. Coronascope II: observation of the white light corona from a stratospheric balloon // Ann. d'Astrophys.— 1965.— 28, N 1.— P. 234—238.
16. Purcell J. D., Koomen M. J. A coronagraph improvement // Sky and Telesc.— 1962.— 24, N 4.— P. 197.
17. Purcell J. D., Koomen M. J. Coronagraph with improved scattered-light properties // J. Opt. Soc. Amer.— 1962.— 52, N 5.— P. 596.
18. Tousey R. Observations of the white-light corona by rocket // Ann. d'Astrophys.— 1965.— 28, N 3.— P. 600—604.