

АСТРОНОМИЯ

Г. А. Гурздян, чл.-корр. АН Армянской ССР

Лайман-альфа камера для фотографирования солнца

(Представлено 10/1 1966)

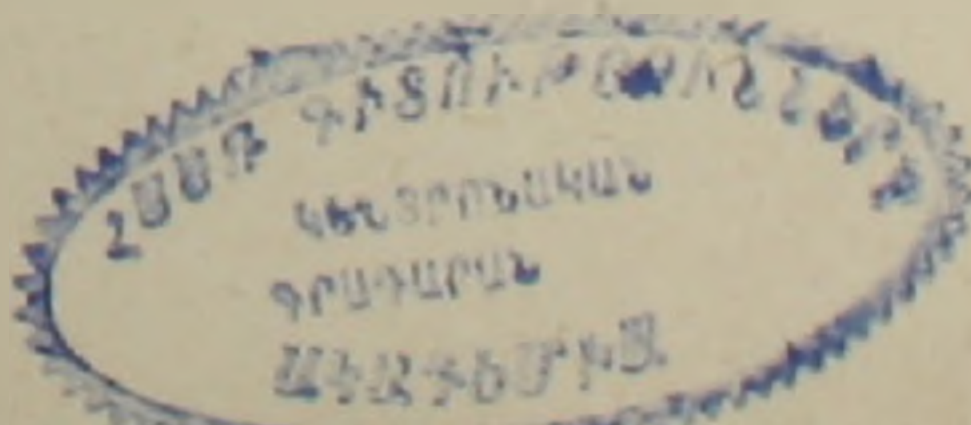
Первые удачные снимки Солнца в лучах спектральной линии Лайман-альфа (L_{α} , 1216 Å) были получены с помощью двойных монохроматоров, состоящих из двух вогнутых дифракционных решеток (^{1, 2}). При этом, с целью устранения астигматизма, одну из решеток делают тороидальной формы, а другую — сферической. Применение тороидальных решеток сильно осложняет и без того сложную систему двойных коротковолновых монохроматоров.

При таких условиях поиски способов фотографирования Солнца в лучах L_{α} без применения дифракционных решеток, очевидно, будут представлять интерес. Наиболее простым и непосредственным способом для достижения поставленной цели, конечно, является применение светофильтра. Но светофильтра для линии L_{α} еще не существует. Ниже приводится описание одного способа получения изображения в лучах L_{α} , где фактически решается задача о создании такого фильтра, пригодного, однако, пока для фотографирования Солнца*.

Этот способ основан на том факте, что коэффициент отражения некоторых кристаллов — фтористого лития, фтористого кальция, флюоридов, каменной соли, кварцев и т. д. — обладает селективной отражательной способностью как раз около 1216 Å. Наиболее сильно это свойство выражено у кристаллического кварца. На фиг. 1а приведена типичная экспериментальная кривая зависимости коэффициента отражения k от длины волны в интервале 1000—2500 Å для кристаллического кварца по измерениям С. А. Куликова (см. также (^{3, 4})). Хотя кривая получена при угле падения светового пучка на полированную поверхность кристалла $\varphi = 45^{\circ}$, но она будет приближенно справедлива и при $\varphi = 0^{\circ}$, поскольку k меняется в интервале 0—45° очень медленно.

Коэффициент отражения, как следует из приведенной кривой, имеет довольно резко выраженный максимум, достигающий до 30% при

* Г. А. Гурздян, Лайман-альфа камера для фотографирования Солнца (авторское свидетельство № 19598 от 16/XII 1961 г.).



$\lambda = 1216 \text{ \AA}$. В области длин волн от 1400 до 2500 $\text{\AA}$ коэффициент отражения почти постоянен и равен 8–12%. В действительности он должен быть еще меньше (почти вдвое), так как в указанном интервале длин волн на отраженный с лицевой стороны образца (плоско-

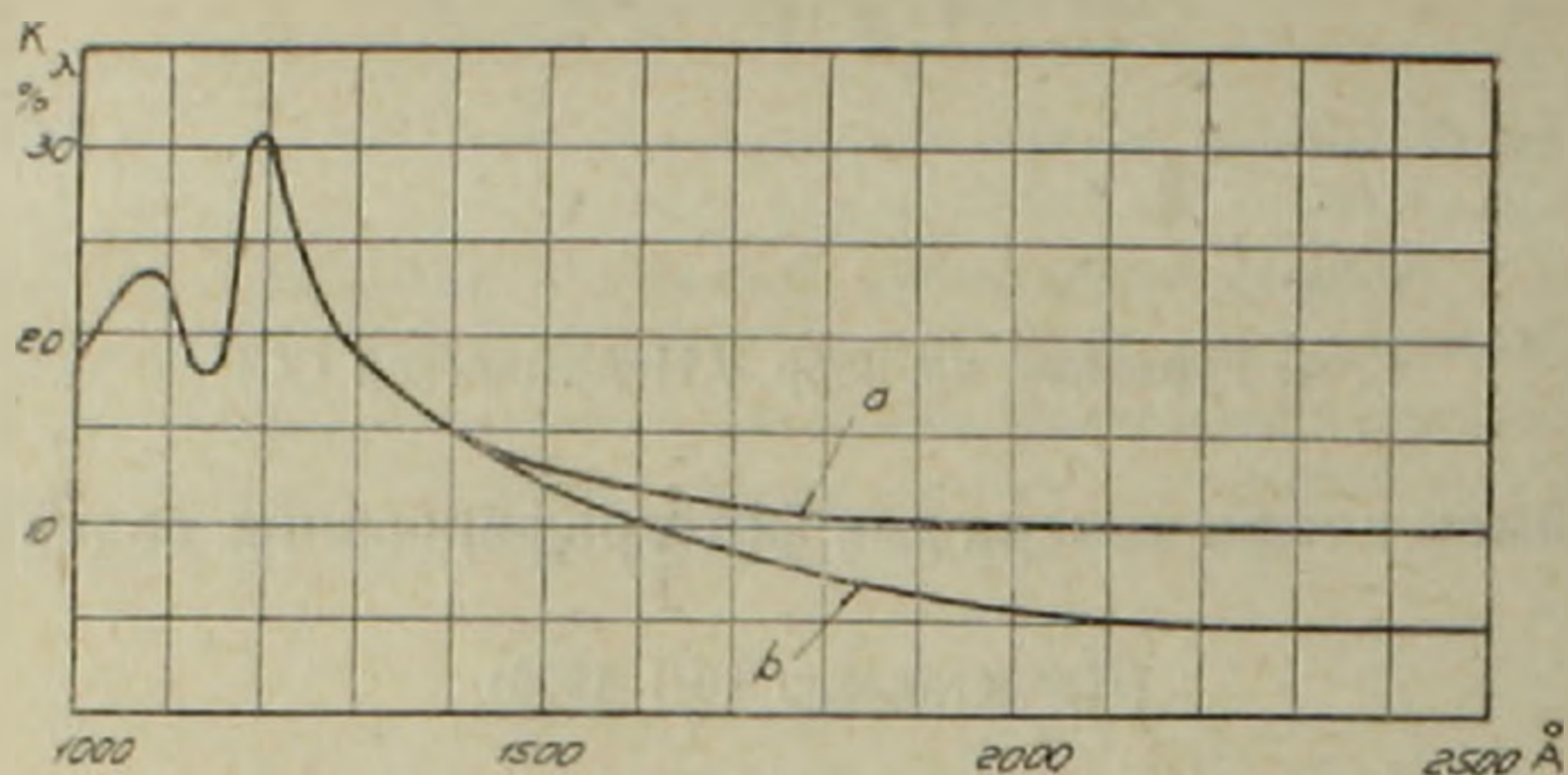


Рис. 1. Зависимость коэффициента отражения K_λ от длины волны для кристаллического кварца. *a* — суммарное отражение с обеих поверхностей; *b* — отражение с одной поверхности.

параллельная пластинка кварца) свет накладывается еще свет, отраженный обратной стороной образца. Указанное явление отсутствует для длин волн $\lambda < 1400 \text{ \AA}$, так как кварц полностью их поглощает. Поэтому кривая отражения с одной поверхности пластинки кварца (бесконечной толщины) должна иметь изображенный на фиг. 1б вид.

Коэффициент отражения для $\lambda = 1216 \text{ \AA}$ с учетом поправки на отражение от другой поверхности почти в 4–5 раз больше, чем в интервале 1500 — 2500 $\text{\AA}$. Очевидно, осуществив многократное отражение света между несколькими пластинками из кристаллического кварца, можно добиться значительного увеличения этого отношения. В результате можно получить оптическую систему, практически пропускающую только линию L_α . Задача заключается в том, чтобы определить минимальное число отражений, то есть количество кварцевых пластинок, при котором непрерывный спектр солнечной фотосферы практически будет устранен.

Рассмотрим оптическую систему для фотографирования Солнца в лучах L_α , состоящую из одного сферического кварцевого зеркала, без всякого покрытия, из n плоских кварцевых пластинок и фотографического приемника излучения, то есть фотоэмульсии, относительная спектральная чувствительность которой равна δ_λ .

Обозначив через E_{ph} и E_α потоки дошедшего до фотоэмульсии, после прохождения всех элементов оптики, суммарного излучения фотосферы и L_α излучения хромосферы соответственно, можем написать:

$$\frac{E_{ph}}{E_\alpha} = \int_{(\lambda)} I_{0\lambda} k_{0\lambda}^n \delta_{0\lambda} d\lambda, \quad (1)$$

где обозначено:

$$I_{0\lambda} = \frac{I_\lambda}{F_\lambda}; \quad k_{0\lambda} = \frac{R_\lambda}{k_\lambda}; \quad \delta_{0\lambda} = \frac{\delta_\lambda}{\delta_\lambda}. \quad (2)$$

I_λ — интенсивность непрерывного излучения фотосферы Солнца на волне λ , F_λ — полная энергия, излучаемая хромосферой Солнца в L_λ линии. Интегрирование в (1) производится практически в интервале 1000—5000 Å, так как функция E_{ph} на границах этого интервала равна нулю, в первом случае из-за малого уровня непрерывного спектра излучения фотосферы ($I_{1000} \approx 0$), во втором случае из-за нулевой чувствительности фотоэмульсионного слоя ($\delta_{5000} \approx 0$).

Поскольку $k_{0\lambda} < 1$, то начиная с некоторого значения λ отношение $\frac{E_{ph}}{E_\lambda}$ становится меньше единицы. Очевидно, чем сильнее выра-

жено неравенство $\frac{E_{ph}}{E_\lambda} < 1$, то есть чем больше λ , тем больше будет преобладать L_λ излучение — с точки зрения оставленного на фотоэмульсионном слое эффекта — над излучением фотосферы и тем монохроматичнее будет изображение Солнца в L_λ линии.

Для интегрирования выражения (1) необходимо иметь значения входящих в него функций — I_λ , F_λ , $\delta_{0\lambda}$, $k_{0\lambda}$.

Из внеатмосферных наблюдений Джонсона (⁵), Байрама (⁶), Тоуси (⁷) и других следует, что интенсивность фотосферического излучения I_λ сильно падает в ультрафиолетовой части спектра (до 1000 Å), становится значительно меньше излучения черного тела при температуре 6000° и приблизительно соответствует планковскому распределению при $T = 5000^\circ\text{K}$. В наших расчетах принято $T = 5000^\circ\text{K}$ для всего рассматриваемого диапазона длин волн (1000—5000 Å). Кривая функции I_λ (интенсивность излучения в эрг/см²сек на внешних слоях атмосферы Земли) приведена на фиг. 2.

Многочисленными наблюдениями установлено (^{8,9}), что F_λ не постоянно и претерпевает значительные изменения в зависимости от степени активности Солнца; обычно F_λ находится в пределах 0,5—5 эрг/см²сек, то есть около миллиона раз меньше энергии, излучаемой Солнцем в видимых лучах.

Фотографирование с помощью описанной камеры, очевидно, целесообразно провести на фотоэмульсионном слое, обладающем селективной светочувствительностью около L_λ линии и подавленной чувствительностью в области, длиннее 2000 Å (до 5000 Å). Такая фотоэмульсия (УФ-2) была разработана в НИКФИ под руководством В. М. Уваровой (¹²). На фиг. 2 приведена примерная кривая функции $\delta_{0\lambda}$ для этой фотоэмульсии. Наконец, кривую функции $k_{0\lambda}$ можно снять прямо из фиг. 1б; она также приведена на фиг. 2.

С помощью этих данных были произведены вычисления интеграла (1) для двух случаев: когда $F_{\odot} = 0,5 \text{ эрг/см}^2 \text{ сек}$ (минимум актив-

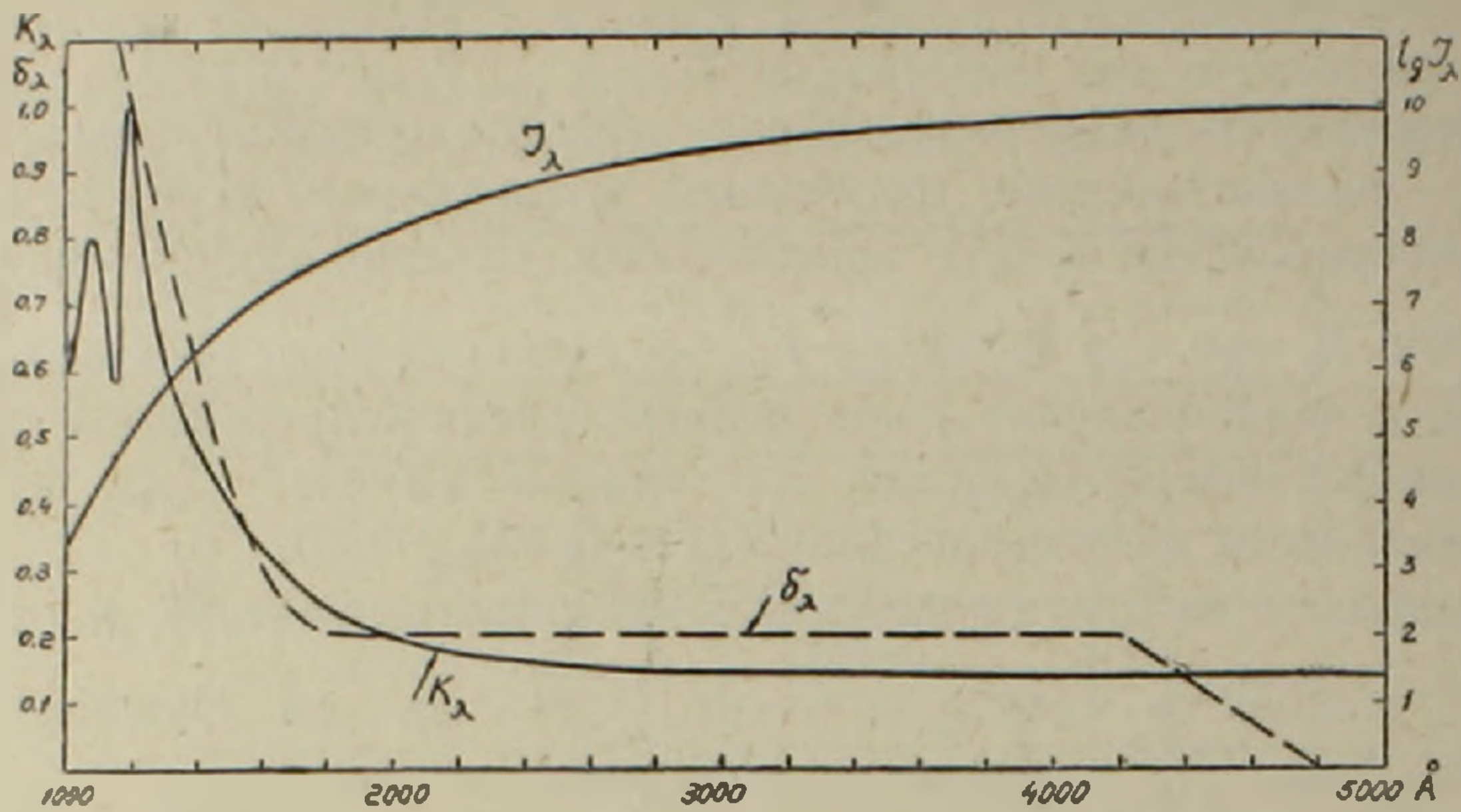


Рис. 2. Кривые зависимости излучательной способности Солнца $I_{\odot}$, коэффициента отражения кристаллического кварца k_{λ} и чувствительности фотографической эмульсии δ_{λ} от длины волны.

ности Солнца) и когда $F_{\odot} = 5 \text{ эрг/см}^2 \text{ сек}$ (максимум активности Солнца). Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

$F_{\odot}$ $\text{эрг/см}^2 \text{ сек}$	Отношение $\frac{E_{ph}}{E_{\lambda}}$ при $T = 5000^{\circ}\text{K}$					
	Количество отражающих поверхностей n					
	1	2	3	4	5	6
0,5	4600	660	100	15	2,4	0,1
5	460	66	10	1,5	0,24	0,01

Как следует из этой таблицы, при наличии в Лайман-альфа камере даже четырех отражающих поверхностей из кристаллического кварца (три плоские пластинки и одно сферическое зеркало) получаемое изображение Солнца практически будет обусловлено фотосферическим излучением. Только при $n=5$ для «активного» Солнца и при $n=6$ для «пассивного» Солнца получаемое изображение почти целиком будет обусловлено излучением Солнца в линии L_{α} , поскольку в этих случаях отношение $\frac{E_{ph}}{E_{\lambda}}$ оказывается существенно меньше единицы.

Дальнейшее сокращение числа кварцевых пластинок, очевидно, будет связано с возможностью разработать фотографические эмульсии с еще большей селективностью чувствительности, около $1200 \text{ \AA}$, то есть с еще большим отношением $\delta(\lambda=1200)/\delta(\lambda > 2000)$.

При конструировании Лайман-альфа камеры описанной системы возникает проблема разработки средств, устраняющих возможность попадания в кассетную часть камеры света, отраженного от задних поверхностей главного зеркала и кварцевых пластинок. В качестве таких средств можно указать клинообразную форму самих пластинок (фиг. 3а),

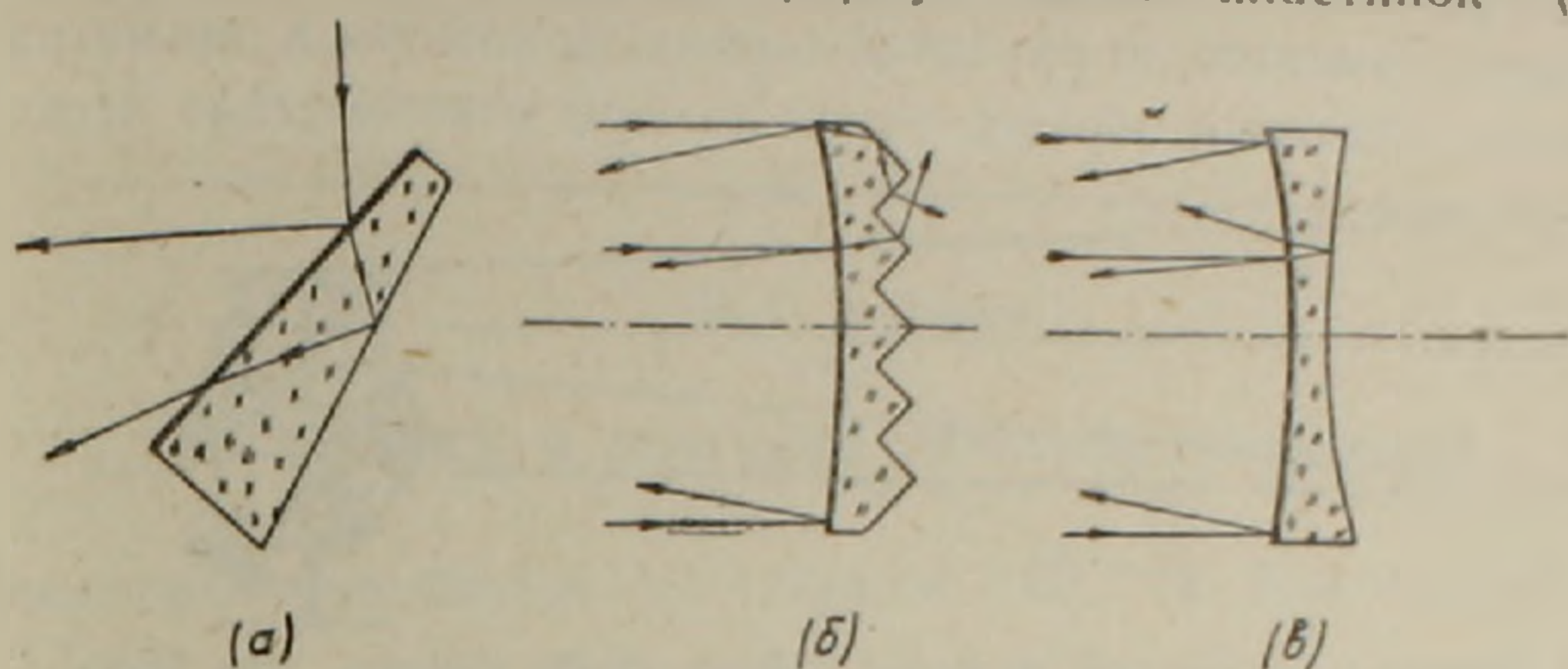


Рис. 3. Возможные схемы оформления обратной стороны плоских и сферических зеркал в Лайман-альфа камере.

пилообразную или сферическую форму задних поверхностей главного зеркала (фиг. 3 б,в). Кроме того, все задние поверхности должны быть обработаны с оптической точностью.

Трудности с выбором формы задних поверхностей отдельных элементов могут отпасть, если вместо кварца для пластинок и главного зеркала использовать обычное стекло с нанесением на их рабочие поверхности двухслойного покрытия, состоящего из сульфида цинка (основной слой) и фтористого магния (толщиной около 250 Å). Это покрытие, впервые разработанное Берингом и сотр. ⁽⁹⁾, имеет доходящий до 45% максимум коэффициента отражения около 1200 Å; коэффициент отражения затем сравнительно быстро падает как в сторону коротких, так и в сторону длинных волн, вплоть до 2000 Å. Однако новейшие данные ⁽¹⁰⁾, которые, правда, относятся к отражению чистого сульфида цинка, как будто не исключают наличия других максимумов в области $\lambda > 2000$ Å. Поэтому вопрос об использовании покрытия $\text{ZnS} + \text{MgF}_2$ в качестве замены кварцевых пластинок не может быть решен без дополнительных данных об отражающих свойствах указанного покрытия в области $\lambda > 2000$ Å.

Задача расчета оптимальной экспозиции при фотографировании солнечной хромосферы с помощью камеры описанной системы является трудной хотя бы потому, что нам неизвестна абсолютная чувствительность эмульсии. Эффективный коэффициент пропускания камеры получается порядка 0,24% при $n = 5$ и 0,07% — при $n = 6$. Тогда эффективная видимая звездная величина Солнца в L_α лучах будет -5^m0 и -3^m5 соответственно. Ряд косвенных соображений приводит к заключению, что при светосиле камеры 1:10 экспозиции порядка от нескольких секунд до минуты будут достаточными для получения нормального снимка. Отсюда следует, что L_α камера не может рабо-

татьяна принципе свободного скандирования и что она должна быть ориентирована и стабилизирована относительно Солнца с заданной точностью. Это есть недостаток L камеры описанной системы.

Оптическое и конструктивное оформление Лайман-альфа камеры может быть выполнено самым различным образом, в зависимости от числа отражающих элементов, от принятой светосилы камеры и диаметра главного зеркала. Опытный образец такой камеры в количестве нескольких

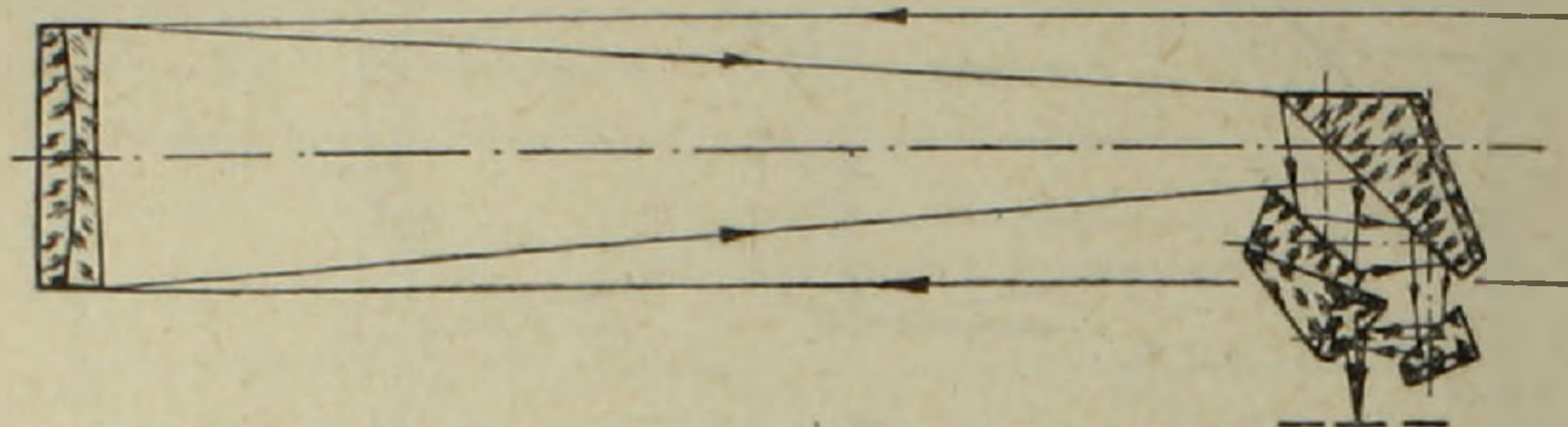


Рис. 4. Вариант оптической системы Лайман-альфа камеры для фотографирования Солнца.

штук был проектирован и изготовлен в ЛОМО (Ленинград) со следующими характеристиками: $n=6$ (одно сферическое зеркало, пять плоских зеркал—все из кристаллического кварца), диаметр светового отверстия 70 мм, фокусное расстояние 500 мм, относительное отверстие 1 : 8. Оптическая схема этой камеры приведена на фиг. 4

Филиал Бюраканской астрофизической обсерватории
Академии наук Армянской ССР

Գ. Ա. ԿՈՒՐՉԱԴՅԱՆ, Հայկական ՍՍՀ ԳԱ լուսակիր-անդամ

Լայման-ալֆա կամերա Արեգակի լուսանկարման համար

Առաջարկված է սկզբունքորեն նոր մեթոդ Արեգակը Լայման-ալֆա սպեկտրալ գծում լուսանկարելու համար: Մեթոդը հիմնված է որոշ բյուրեղների, այդ թվում բյուրեղային քվարցի լույսի անդրադարձման ընտրողական հատկության հենց 1216 անգստրեմ ալիքում: Մշակված է այս սկզբունքով զործող լուսանկարչական կամերայի տեսությունը և նրա աշխատանքի պայմանները:

Л И Т Е Р А Т У Р А — Գ Ր Ա Կ Ա Ն Ո Ւ Ի Յ Ո Ւ Ն

- ¹ Р. Меркур, С. К. Миллер, В. А. Ренсе, Ф. Д. Стюарт, J. Geophys. Res. 61, 571, 1956
- ² Дж. Д. Перселл, Д. М. Паккер, Р. Тоуси, Nat., 184, 8, 1959; JOSA, 47, 1057, 1957
- ⁴ Ф. М. Герасимов, С. А. Куликов, А. В. Яковлева, «Оптико-мех. промышленность», № 11, 12, 1958. ⁴ Г. Хасс, В. Р. Унтер, Р. Тоуси, JOSA, 46, 1009, 1965. ⁵ Ф. С. Джонсон, Дж. Перселл, Р. Тоуси, Н. Вилсон., Ракетные исследования верхней атмосферы, стр. 309, М., 1957. ⁶ Е. Т. Байрам, Т. А. Чабб, Х. Фридман, Дж. Е. Купперман, Р. В. Креплин, Ар. J., 128, 738, 1958. ⁷ Р. Тоуси, Дж. Д. Перселл, К. Ватанабе, Phys. Rev., 83, 792, 1951
- ⁸ Е. Т. Ренсе, Т. Чабб, Х. Фридман, Дж. Купперман JOSA, 46, 384, 1956. ⁹ П. Х. Бернинг, Г. Хасс, Р. П. Мадден, JOSA, 50, 586, 1960. ¹⁰ В. С. Уолкер, Дж. Остановски, JOSA., 53, 399, 1963.