

УДК 531.715, 525.7, 528.8

Д. В. Паненко

Таврійський національний університет, Сімферополь

**О некоторых особенностях света,
рассеянного пространственно ограниченными
областями солнечного ореола земной атмосферы**

Виявлено та експериментально досліджено когерентність розсіяного світла у просторово обмежених областях сонячного ореолу. Розроблена методика дистанційного зондування, основана на використанні інтерферометра з малою кутовою апертурою і целостата. Просторова когерентність розсіяного ореолом світла обумовлена аерозольними частинками. Зроблено деякі пропозиції щодо застосування когерентності світла в аерокосмічних дослідженнях.

Для построения аэрозольных моделей атмосферы [3] широко используются оптические величины и корреляционные характеристики света [3], например когерентность при обратном рассеянии. Теория [4] и лабораторный эксперимент [2] предсказывают также когерентное рассеяние света вперед, однако это явление исследовалось меньше из-за экспериментальных трудностей. В данной работе когерентное рассеяние света вперед было обнаружено и экспериментально исследовано при наблюдении рассеяния света в солнечном ореоле, где оно надежно регистрируется. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию когерентного рассеяния света в солнечном ореоле, выяснению его возможностей и анализу физических факторов, предопределяющих когерентность света.

ТЕХНИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Пассивное дистанционное зондирование Солнца и солнечного ореола осуществлялось целостатом и интерферометром с малой угловой апертурой. На рис. 1 показана оптическая схема установки. Свет Солнца или солнечного ореола попадал на целостатное зеркало 1, а затем на зеркало 2, от которого свет отражался в интерферометр, изготовленный по схеме Юнга. В плоскости \mathcal{E}_1 интерферометра расположена входная диафрагма диаметром $2b = 3$ мм, которая предназначена для формирования угла поля зрения и интерферометра. В плоскости \mathcal{E}_2 симметрично относительно оптической оси Z

находятся два отверстия P_1 и P_2 диаметром $2a = 0.12$ мм каждое, расстояние d между ними равно 0.4 мм. Световые пучки от отверстий P_1 и P_2 создают в плоскости \mathcal{E}_3 интерференционную картину в виде полос, перпендикулярных к плоскости рисунка, P — текущая точка выходной плоскости, Φ — фильтр $\lambda = 0.63$ мкм, предназначенный для монохроматизации света. В некоторых опытах красный фильтр менялся на синий, чтобы отличать поглощение водного аэрозоля. Интерференционное поле выходной плоскости \mathcal{E}_3 сканировалось круглым отверстием 0.25 мм, и установленным за ним ФЭУ, которые находились на одной каретке и при измерениях вместе перемещались по оси X перпендикулярно к полосам интерференционной картины. При слабых сигналах отверстие перед ФЭУ заменялось щелью, параллельной полосам интерференционной картины. Сигнал ФЭУ регистрировался графопостроителем Н-307, время регистрации интерферограммы составляло 13 с. Системы сканирования и регистрации подробно описаны в работе [5].

Угол поля зрения в приближении геометрической оптики рассчитывался по формуле $\theta = 2b(Z_1)^{-1} = 1020''$, где $Z_1 = 2bl_1[(2a + d) + 2b]^{-1}$, $2b$ — диаметр входной диафрагмы, $l_1 = 0.71$ м — расстояние между \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 , $l_2 = 1$ м — расстояние между плоскостями \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 . Входная диафрагма в \mathcal{E}_1 , как в камере-обскуре, строит изображение источника на плоскости \mathcal{E}_2 , которое имеет размер 7 мм и соответствует приближению тени. Отверстия P_1 и P_2 расположены симметрично относительно оптиче-

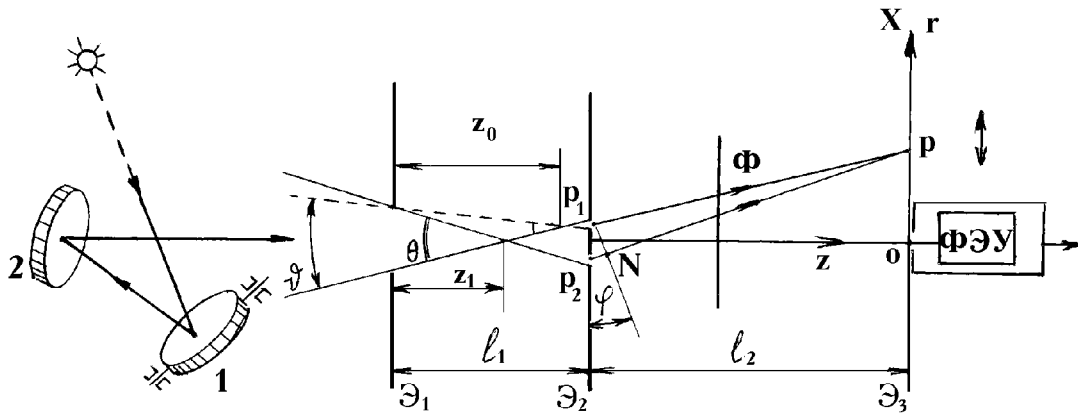


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра

ской оси Z интерферометра. Они всегда ориентировались так, чтобы линия P_1P_2 , соединяющая центры отверстий, совпадала с направлением движения Солнца. Входная диафрагма в \mathcal{E}_1 попарно с каждым из отверстий P_1 и P_2 , образует два меньших поля зрения. Угол ν для каждого из этих каналов в геометрическом приближении рассчитывался по формуле $\nu = 2b(Z_0)^{-1}$, где $Z_0 = b_1(a + b)^{-1}$. Для входной диаграммы 3 мм эти углы равны $906''$. Сравнение с углом θ означает, что в интерферометре эти два угла перекрываются в пространстве на 90 %, а общий угол составляет $920''$. При измерениях исходной позицией интерферометра было положение, при котором его ось установлена на центр Солнца. С этой позиции, выключением ведения зеркала 1, интерферометр по секундомеру выводился в ореол за счет естественного движения Солнца. Затем включалось ведение зеркала, регистрировалась интерферограмма. Интерференционная формула описана Борном и Вольфом [1].

Степень когерентности определяется по контрасту полос интерференционной картины $\gamma_{12} = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЯРКОСТИ СВЕТА В ОРЕОЛЕ

На рис. 2 показана кривая распределения яркости по диаметру диска Солнца и в солнечном ореоле. В таких изменениях интерферометр использовался как фотометр. Ось интерферометра наводилась на центр Солнца. Усиление ФЭУ было установлено максимальным, а усиление графопостроителя было небольшим. Затем ось интерферометра устанавливалась перед Солнцем, а ведение целостата

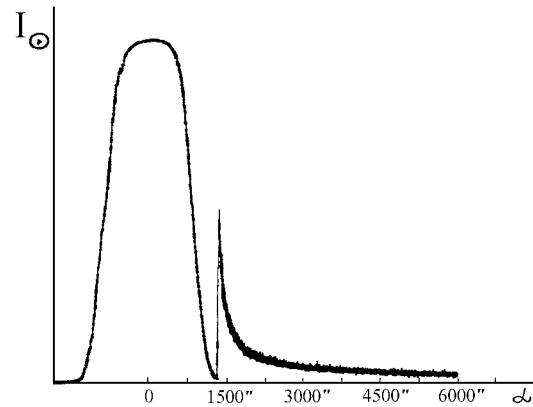


Рис. 2. Распределение яркости в солнечном ореоле

выключалось. Своим движением Солнце придвигалось к полю зрения интерферометра, что позволяло регистрировать распределение яркости. Ореол сканировался дважды: первый раз при приближении к диску Солнца (левая сторона кривой) с усилением, выбранным для центра Солнца; второй раз при выходе из ореола усиление графопостроителя было увеличено в 50 раз. Дифракционных проявлений (следы колец), которые могли бы повлиять на когерентность света нет. Поэтому когерентность света солнечного ореола следует связывать с рассеянием света аэрозольными частицами, размеры которых сравнимы с длиной волны или превышают ее. Для таких частиц преобладает рассеяние света вперед.

Согласно фотометрическим наблюдениям [5] яркость неба возрастает плавно, но чрезвычайно быстро по мере приближения к Солнцу.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Угол поля зрения прибора составляет $1020''$, что близко к угловому радиусу Солнца. Следовательно, если установить ось интерферометра слева или справа от центра Солнца, на расстоянии, равном или большем его углового диаметра, то интерферометр не будет принимать прямые солнечные лучи, а будет принимать только рассеянный свет солнечного ореола, направленный к интерферометру в пределах телесного угла поля зрения. Результаты наблюдений 06.08.2003 г. (переменная облачность, ветер северный 9—14 м/с, 28 °С, давление 745 мм рт. ст., высокая влажность) представлены на рис. 3. Кривая 1 получена при ориентации оси интерферометра на центр Солнца. По виду это односторонняя кривая с легкой волнистостью. Подобная волнистость носит систематический характер, т. е. имеется и в других аналогичных измерениях. Есть основания связывать эту волнистость с влиянием когерентности рассеянного света в прямом ореоле. Кривые 2 и 3 рис. 3 представляют собой интерферограммы, полученные при наведении оси интерферометра в ореол на угловые расстояния от центра Солнца, равные его угловому диаметру (кривая 2) и 1.5 углового диаметра (кривая 3). Измеренные значения степени когерентности γ равны 0.35 и 0.25 соответственно. Полученные интерферограммы показывают, что свет, рассеянный солнечным ореолом является частично пространственно когерентным.

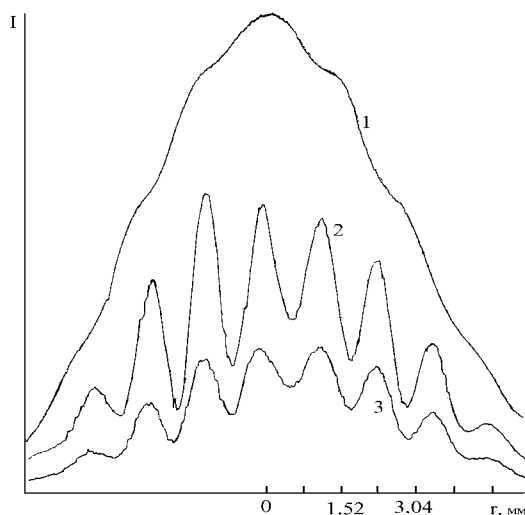


Рис. 3. Интерферограммы от центра солнечного диска (кривая 1) и от солнечного ореола (кривые 2 и 3). Чувствительность при регистрации кривых 2 и 3 в 75 раз выше

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ

В турбулентной атмосфере должны быть механизмы, которые обеспечивают наблюдаемую пространственную когерентность. Физический анализ приводит к следующим выводам. Солнце является тепловым источником света, состоящим из бесконечно большого числа излучателей, которые излучают свет некогерентно. Однако в физической оптике для некогерентных источников используется понятие круга когерентности. Диаметр такого круга можно подсчитать по формуле [1]: $D = 0.16R\lambda/\rho$, где ρ — радиус источника, R — расстояние до источника, λ — средняя длина световой волны. По данным [1] для $\lambda = 0.55$ мкм $D = 18\lambda$. Это означает, что диаметр круга когерентности сопоставим с размерами аэрозольных частиц. Каждая аэрозольная частица находится в центре круга когерентности, освещается Солнцем когерентно, и следовательно, рассеивает свет также когерентно. Кроме этого, по теории Ми [1] значительное рассеяние света вперед также дают частицы, сравнимые с длиной волны и больше ее. Следовательно, пространственная когерентность света, рассеянного в ореоле, обусловлена аэрозолями. Можно исходить из следующих представлений. Телесный конус поля зрения интерферометра заполнен аэрозольными частицами, которые непрерывно освещаются солнечным светом и по отношению к интерферометру являются точечными источниками света. Однако аэрозольные частицы в объеме поля зрения интерферометра распределены случайно и на разных расстояниях от интерферометра, и не все они смогут удовлетворить жесткому условию когерентности по величине разности хода: $\Delta L_m = S_m P_1 - S_m P_2 \ll \lambda$, где S_m — аэрозольная частица с номером $m = 1, 2, \dots, N$. Поэтому пространственная когерентность будет частичной. Вклад в когерентность будут вносить лишь приосевые аэрозольные частицы с $\Delta L_m \ll \lambda$. Таким образом, физической основой частичной когерентности рассеянного света является когерентное освещение аэрозольных частиц в атмосфере.

ВОЗМОЖНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ

При освещении Солнцем взволнованной поверхности моря, его изображение разбивается случайной поверхностью волны на множество отдельных участков, дающих изображения небольших частей солнечного диска. На основе интерферометрических измерений можно наблюдать и изучать взаимодействие света с взволнованной водной поверхностью. Исследования на начальной стадии следует прове-

сти в земных условиях: высокий морской берег, платформа, затем перейти к наблюдениям с летательных аппаратов.

Солнечный свет при отражении от некоторых объектов суши может быть когерентным, что можно обнаружить специальным интерферометром в виде очков или бинокля, что позволит без монтаровок привести поисковую работу в земных условиях (наблюдения с возвышенностей, самолета или вертолета), а затем перейти к наблюдениям с летательных аппаратов.

Автор признателен профессору Э. И. Терезу за интерес к работе и полезные обсуждения.

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1970.— 955 с.
2. Иванов А. П., Хайрулина А. Я., Харьковская Т. Н. Экспериментальное обнаружение кооперативных эффектов в рассеивающем объеме // Оптика и спектроскопия.—1970.—28, вып. 2.—С. 380.
3. Кондратьев К. Я., Поздняков Д. В. Аэрозольные модели

атмосферы. — М: Наука, 1981.—С. 103.

4. Кузьмин В. Л., Романов В. П. Когерентные эффекты рассеяния света в неупорядоченных системах // Успехи физ. наук.—1996.—166, № 3.—С. 247.
5. Паненко В. В., Булатова О. В. Многофункциональное сканирующее устройство для оптических измерений с цифровым управлением и отсчетом сигналов // Опτικο-мех. пром-сть.—1990.—№ 10.—С. 27—31.
6. Ситник Г. Ф. Исследование земной атмосферы по ореолам Солнца и Луны. — М.: Изд-во Москов. ун-та, 1985.—117 с.

ON SOME PECULIARITIES OF THE LIGHT SCATTERED BY SPATIAL-LIMITED REGIONS OF SOLAR HALO OF THE EARTH'S ATMOSPHERE

D. V. Panenko

The coherence of the light scattered in spatial-limited regions of solar halo is discovered and investigated by an experimental approach. We developed a remote sounding method based on the use of an interferometer with a small angular aperture and of a coelostat. Spatial coherence of the light scattered by solar halo is due to aerosol particles. Some suggestions on application of the coherence of light in aerospace investigations are made.