

УДК 523.4:520.85

Спектрополяриметрия планет.**III. Анализ измерений Юпитера****В. А. Кучеров, А. В. Мороженко**

Выполнен анализ спектрополяриметрических наблюдений Юпитера. Показано, что результаты измерения центра диска планеты согласуются с расчетными данными при $n_r = 1.37-1.38$, $r_0 = 0.26 \pm 0.04$ мкм и $\sigma^2 = 0.24 \pm 0.06$. Изложена гипотеза: обнаруженная зависимость положения плоскости поляризации света всего диска планеты от длины волны — следствие влияния вертикальной неоднородности облачного слоя. Не исключено появление на утреннем приполярном крае диска тонкого слоя хаотически ориентированных кристаллов.

SPECTROPOLARIMETRY OF PLANETS. III. ANALYSIS OF JUPITER'S MEASUREMENTS, by Kucherov V. A., Morozhenko A. V.— Jupiter's spectropolarimetric measurements are analysed. It is shown that the measurements for the centre of the planet's disk agree with computations at $n_r = 1.37-1.38$, $r_0 = 0.26 \pm 0.04$ and $\sigma^2 = 0.24 \pm 0.06$. It is assumed that the wavelength dependence of the position angle of polarization of the whole Jupiter's disk is the result of the influence of vertical inhomogeneity of the cloud layer. The appearance of a thin layer of randomly oriented crystals on the morning limb of the disk near the pole is possible.

В работе [3] приведены результаты изучения зависимости степени поляризации и положения плоскости поляризации света всего диска Юпитера и его центра от длины волны. Настоящая статья посвящена анализу этих результатов.

Определение физических характеристик облачных частиц. Первую попытку оценки среднего радиуса облачных частиц Юпитера предпринял В. М. Лоскутов [5]. Анализируя фазовую кривую поляризации для центра диска Юпитера, полученную Лио в интегральном свете, в рамках двухслойной модели вертикальной структуры атмосферы он нашел, что средний радиус частиц равен 0.3 мкм, а оптическая толщина надоблачного газового слоя $\tau_0 \leq 0.2$. В. М. Лоскутов предполагал, что действительная часть показателя преломления облачных частиц $n_r = 1.38$. Несколько позже А. В. Мороженко и Э. Г. Яновицкий [13] выполнили анализ спектральных фазовых кривых поляризации света всего диска Юпитера, полученных в 1971 г. в интервале длин волн 0.37—0.80 мкм [6]. Было получено значение $n_r = 1.36 \pm 0.01$. Предполагая нормально-логарифмический закон распределения частиц по размерам, они определили значения среднего радиуса частиц $r_0 = 0.19 \begin{smallmatrix} +0.04 \\ -0.06 \end{smallmatrix}$ мкм и дисперсии их размеров $\sigma^2 = 0.30 \begin{smallmatrix} +0.10 \\ -0.04 \end{smallmatrix}$.

В 1973 г. [7] спектральный интервал измерений был расширен до 0.316 мкм. Кроме всего диска измерялась его центральная область. Оказалось, что и эти результаты измерения довольно хорошо согласуются с приведенными характеристиками аэрозоля.

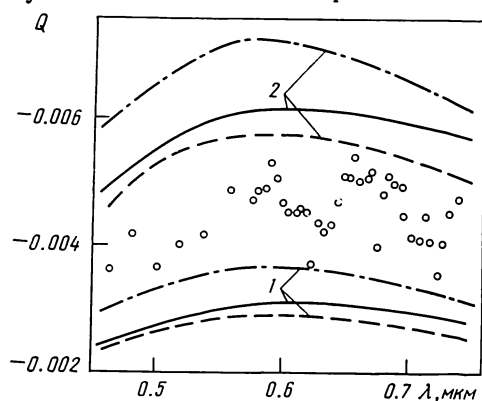
Несколько позже Кавата и Хансен [4], анализируя данные измерений степени круговой поляризации, пришли к выводу о том, что хорошее согласие между результатами измерений и расчетными данными можно получить только при больших значениях показателя преломления или среднего радиуса частиц. Кроме того, было показано, что нельзя подобрать однозначный набор параметров облачных частиц, одинаково хорошо описывающих результаты измерений линейной и круговой

поляризации. Это, возможно, объясняется реально существующими различиями физических характеристик облачных частиц в приполярных и приэкваториальных областях диска Юпитера [2]. Отметим, что в работе [4] круговая поляризация измерялась в приполярных районах. Позднее к такому же выводу пришли другие исследователи [10, 14], которые показали, что для объяснения линейной поляризации приполярных районов необходимы размеры частиц значительно больше 0.2 мкм.

Рассмотрим, с какими характеристиками аэрозоля согласуются наши спектрополяриметрические измерения центра диска Юпитера в 1984 г. Как и в статье [13], предположим:

1. Облачные частицы являются однородными чисто рассеивающими шарами, распределение которых по размерам подчиняется нормально-логарифмическому закону.

2. Атмосферу Юпитера можно представить в виде однородного полубесконечного чисто аэрозольного слоя. Такая упрощенная модель выбрана вследствие того, что в области спектра с $\lambda > 0.45$ мкм вклад чисто газового надоблачного слоя и газа в облачном слое пренебрежимо мал [2].



Сравнение наблюдаемых (кружки) и рассчитанных значений параметра Q при $\alpha = 11.1^\circ$ для центра диска Юпитера. Линия: штриховая — $n_r = 1.37$, $\sigma^2 = 0.20$, $r_0 = 0.26$ мкм; штрихпунктирная — $n_r = 1.38$, $\sigma^2 = 0.20$, $r_0 = 0.29$ мкм; сплошная — $n_r = 1.38$, $\sigma^2 = 0.28$, $r_0 = 0.24$ мкм; 1 — $Q_1(\alpha)$; 2 — $2Q_1(\alpha)$

3. Многократное рассеяние учитывается по приближенной формуле [13]: $Q_1(\alpha) \leq Q(\alpha) \leq 2Q_1(\alpha)$. Здесь $Q(\alpha) = P(\alpha)\rho(1, \mu_0)$, где $P(\alpha)$ и $\rho(1, \mu_0)$ — степень поляризации и коэффициент яркости центра диска. Спектральные значения $\rho(1, \mu_0)$ взяты из работы [1]. Для центра диска, согласно [13], $Q_1(\alpha) = \mu_0 Q_0(\alpha) / 4(1 + \mu_0)$, где μ_0 — косинус угла падения света; $Q_0(\alpha)$ — значения параметра Q , рассчитанные по формулам Ми.

Сравнение результатов расчетов и наблюдений показало, что при $n_r = 1.36$ во всем спектральном интервале $Q(11.1^\circ) > 2Q_1(11^\circ)$. Хорошее согласие получено для $n_r = 1.37$ и 1.38 (рисунок). По-видимому, в 1984 г. облачные частицы в центральной области Юпитера соответствовали $n_r = 1.37 - 1.38$, $r_0 = 0.26 \pm 0.04$ мкм, а $\sigma^2 = 0.24 \pm 0.06$, что неплохо согласуется с ранее полученными характеристиками [13].

Что касается результатов измерений всего диска Юпитера, то провести их сравнение с расчетными данными не представляется возможным, так как при малых фазовых углах измеренная поляризация всего диска планеты сильно искажена оптической неоднородностью диска [6, 7]. В работе [13] она была исключена по данным измерений при $\alpha < 0.5^\circ$. В 1984 г. такие измерения не проводились.

Анализ данных о зависимости положения плоскости поляризации света всего диска Юпитера от длины волны. Положение плоскости поляризации света от всего диска Юпитера показывает довольно сложную зависимость от длины волны [3, рис. 3]. Попытаемся выявить причину такого поведения плоскости поляризации исходя из качественных соображений.

Как известно, при формировании диффузно отраженного излучения в однородной полубесконечной атмосфере, состоящей из сферических или хаотически ориентированных частиц, степень поляризации центра диска планеты в оппозицию ($\alpha = 0$) равна нулю. При переходе к краю диска диффузно рассеянный свет поляризуется, а плоскость поляриза-

ции проходит вдоль радиуса-вектора наблюдаемой точки диска или составляет с ним угол 90° . Так как поляризация на краю диска возникает только в процессе многократного рассеяния, то максимальное ее значение будет в случае чистого рассеяния. По мере увеличения истинного поглощения в среде поляризации света на краю диска будет уменьшаться. В предельном случае, когда происходит только однократное рассеяние, она исчезнет. При $\alpha=0$ в силу полной симметрии и несмотря на довольно большое значение поляризации на краю диска свет всего диска планеты будет неполяризованным.

При $\alpha \neq 0$ для различных частей края диска условия освещения будут разными, в силу чего нарушится симметрия и свет от всего диска планеты будет поляризованным. При этом положение плоскости поляризации света всего диска планеты будет таким же, как и для центра диска.

Если на диске планеты появится деталь, физические свойства которой отличаются от физических свойств окружающей среды, то даже при $\alpha=0$ свет от всего диска планеты станет поляризованным. При этом плоскость поляризации определится радиусом-вектором, на котором находится эта деталь. Поэтому нет ничего удивительного в том, что наличие оптической неоднородности на диске Юпитера приведет к поляризации света всего диска планеты в оппозицию [5, 6]. По нашему мнению, полученное в работе [3] поведение плоскости поляризации также является следствием оптической неоднородности диска. Последнее подтверждается следующими фактами.

Во-первых, для центра диска Юпитера при $\alpha=5.0^\circ$ во всем спектральном интервале степень поляризации отрицательна, тогда как для всего диска при $\alpha=4.0$ и 5.1° — положительна, по крайней мере для $\lambda < 0.6$ мкм.

Во-вторых, как показывают расчеты [11], степень поляризации света, диффузно отраженного полубесконечной однородной атмосферой всего диска планеты или его центральной областью, повышается при увеличении поглощения. Это наблюдается в молекулярных полосах центра Юпитера и всего его диска при больших фазовых углах [3, 15]. В то же время для всего диска планеты при $\alpha=5.1^\circ$ наблюдается обратная картина [3, рис. 3]. В полосах поглощения поляризация меньше, что и должно быть в случае ее формирования на краю диска в процессе многократного рассеяния.

Исходя из данных [3, рис. 3], можно сделать выводы: а) при $\alpha=4.0$ и 5.1° для $\lambda < 0.6$ мкм измеряемая поляризация всего диска планеты представляет собой следствие того, что поляризующие свойства полярных районов больше по сравнению с западным и восточным краями диска;

б) при тех же фазовых углах для $\lambda > 0.6$ мкм область повышенной поляризации должна находиться в приполярных районах, но приблизительно на 20° западнее северного или восточнее южного полюсов;

в) при $\alpha=11.1^\circ$ в длинноволновой области спектра положение плоскости поляризации не противоречит предположению о формировании поляризации в однородном полубесконечном слое, однако в случае $\lambda < 0.6$ мкм существенно влияет неоднородность диска, и положение плоскости различно для разных длин волн.

Итак, каждый отдельно взятый наблюдательный факт легко объясняется влиянием неоднородности диска. При этом сталкиваемся с трудностью локализации места нахождения этой неоднородности. Последнее можно устранить, если принять во внимание вертикальную неоднородность облачного слоя.

Показано [8, 9], что облачный слой Юпитера состоит из двух или трех ярусов, разделенных почти чисто газовыми прослойками. Молекулярные полосы поглощения формируются в более высоких слоях атмосферы, чем непрерывный спектр. Предположим, что физические свой-

ства частиц, составляющих отдельные ярусы облаков, различны. Это может привести к тому, что для разных длин волн и значений фазового угла влияние оптической неоднородности будет различным. Кроме того, поворот плоскости поляризации примерно на 20° в длинноволновой области спектра при $\alpha=4.1$ и 5.2° можно объяснить влиянием оптически тонкого слоя на восходящем краю диска планеты в приполярном районе, состоящего из хаотически ориентированных частиц, дающих малую по величине слабо зависящую от фазового угла поляризацию [12].

Заключение. 1. Анализ зависимости степени поляризации от длины волны, полученной при $\alpha=11.1^\circ$ для центра диска, показал, что результаты наблюдений не противоречат расчетным данным для сферических частиц со следующими характеристиками: $n_r=1.37-1.38$, $r_0=0.26\pm 0.04$ и $\sigma^2=0.24\pm 0.06$.

2. Анализ зависимости от длины волны положения плоскости поляризации света всего диска Юпитера показал, что она обусловлена, вероятно, проявлением ярусной вертикальной структуры облачного слоя Юпитера. Не исключено, что в ночное время в приполярных районах появляется тонкий слой хаотически ориентированных кристаллов, которые какое-то время сохраняются на утреннем лимбе. Для подтверждения последнего необходимы дальнейшие более тщательные исследования спектрополяриметрических свойств света Юпитера, а также математическое моделирование процессов формирования поляризованного излучения в оптически неоднородных (по вертикали и горизонтали) средах.

1. Бугаенко Л. А. Монохроматические коэффициенты яркости планет-гигантов // Астрон. вестн.— 1972.—6, № 1.— С. 19—21.
2. Бугаенко Л. А., Кислюк Л. М., Мороженко А. В. Структура верхних слоев атмосферы Юпитера. II. Обилие метана и аммиака, вращательная температура и давление // Физика планетных атмосфер.— Киев: Наук. думка, 1981.— С. 44—62.
3. Гуральчук А. Л., Кучеров В. А., Мороженко А. В. Спектрополяриметрия планет. II. Юпитер // Кинематика и физика небес. тел.— 1986.—2, № 4.— С. 57—62.
4. Кавата И., Хансен Дж. Е. Круговая поляризация солнечного света, отраженного от Юпитера // Юпитер. II. Атмосфера, ионосфера.— М.: Мир, 1979.— С. 378—394.
5. Лоскутов В. М. Об интерпретации поляриметрических наблюдений Юпитера // Астрон. журн.— 1971.—48, № 5.— С. 1046—1050.
6. Мороженко А. В. Поляриметрические исследования планет-гигантов. III. Юпитер // Там же.— 1973.—50, № 1.— С. 163—166.
7. Мороженко А. В. Результаты поляризационных исследований Юпитера // Астрометрия и астрофизика.— 1976.— Вып. 30.— С. 47—54.
8. Мороженко А. В. О структуре облачного слоя Юпитера // Письма в Астрон. журн.— 1984.—10, № 10.— С. 775—779.
9. Мороженко А. В. Вертикальная структура широтных деталей диска Юпитера // Астрон. вестн.— 1985.—19, № 1.— С. 64—76.
10. Стародубцева О. М., Тейфель В. Г. Поляризация света в полярных областях Юпитера // Там же.— 1984.—18, № 3.— С. 179—190.
11. Fymat A. L. Polarization in astronomical spectra: theoretical evidence // Planets, stars and nebulae studied with photopolarimetry.— Tucson, Arizona: Arizona Univ. press, 1972.— P. 617—636.
12. Giese R. H., Zerull R. Zodiacal light models based on nonspherical particles // Ibid.— P. 804—813.
13. Morozhenko A. V., Yanovitskij E. G. The optical properties of Venus and the Jovian planets. I. Atmosphere of Jupiter according to polarimetric observations // Icarus.— 1973.—18, N 3.— P. 583—592.
14. Smith P. H., Tomasko M. G. Photometry and polarimetry at large phase angles. II. Polarimetry of the south tropical zone, south equatorial belt and the polar regions from the Pioneer 10 and 11 missions // Ibid.— 1984.—58, N 1.— P. 35—73.
15. Wolstencroft R. D., Smith R. J. Spectropolarimetry of the methane and ammonia bands of Jupiter between 6800 and 8200Å // Ibid.— 1979.—38, N 2.— P. 155—165.