

УДК 523.4+524.5

**А. В. Мороженко**

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
03680 ГСП Киев, ул. Академика Заболотного 27

### **Астрофизические задачи поляризационных исследований на малых телескопах**

*Предлагается программа поляризационных наблюдений небесных тел на телескопах с малыми диаметрами, направленных на решение следующих задач: изучение тонкой структуры аэрозольной составляющей межзвездной среды и сил, ориентирующих межзвездные частицы; изучение природы переменности блеска звезд; изучение вероятной природы поверхностных слоев астероидов и приближенных оценок их альbedo (с использованием эффекта Умова) и размеров; контроль долгопериодических изменений количества метана в надоблачных слоях Юпитера и Сатурна и характеристик аэрозольной составляющей планетных атмосфер (например, пылевых бурь на Марсе), а также степени оптической неоднородности дисков планет. Кроме того, с успехом могут вестись и традиционные для тел Солнечной системы поляризационные наблюдения, которые направлены на изучение оптических свойств безатмосферных небесных тел, планетных атмосфер и ярких комет.*

*АСТРОФІЗИЧНІ ЗАДАЧІ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ НА МАЛИХ ТЕЛЕСКОПАХ, Мороженко О. В. — Запропоновано програму поляризаційних спостережень небесних тіл на телескопах з малими діаметрами дзеркала, яка спрямована на вирішення наступних задач: вивчення тонкої структури аерозольної складової міжзоряного середовища та орієнтації сил, які орієнтують частинки; визначення природи змінності блиску зірок; вивчення імовірної природи поверхневих шарів астероїдів та наближених оцінок їхнього альbedo (з використанням ефекта Умова) і розмірів; контроль довгоперіодичних змін кількості метана в надхмарових шарах Юпітера і Сатурна та характеристик аерозольної складової планетних атмосфер (наприклад, у періоди пилових бур на Марсі), а також ступеня оптичної неоднорідності дисків планет. Крім того, з успіхом можуть продовжуватись традиційні для тіл Сонячної системи поляризаційні спостереження, які спрямовані на вивчення оптичних властивостей безатмосферних небесних тіл, планетних атмосфер та яскравих комет.*

*SOME ASTROPHYSICAL PROBLEMS OF POLARIZATION INVESTIGATIONS WITH SMALL TELESCOPES, by Morozhenko O. V. — We propose a program for polarization investigations of celestial bodies with small tele-*

*scopes. The program aims are as follows: the study of the fine structure of the interstellar medium aerosol component and of forces orienting interstellar particles; the investigation of the origin of stellar variability; the study of probable origin of surface layers of asteroids and making rough estimates of asteroids' albedos (on the basis of the Umov effect) and sizes; the control over long-period changes of the methane quantity in overcloud layers of Jupiter and Saturn; the control over the aerosol component characteristics for planetary atmospheres (for example, dust storms on Mars) and over the degree of optical inhomogeneity of planetary discs. Moreover, polarization observations can be performed successfully, which are traditional for solar system bodies and aimed at the investigation of optical properties of atmosphereless celestial bodies, of planetary atmospheres and of bright comets.*

#### ВВЕДЕНИЕ

Как известно, поляризационный метод исследований является единственным дистанционным методом, который позволяет получать данные о: 1) физических свойствах аэрозольной составляющей (в первую очередь действительной части показателя преломления); 2) параметрах функции распределения частиц по размерам; 3) наличии в среде ориентированных частиц и направлении действия ориентирующей их силы; 4) наличии на дисках небесных тел деталей оптической неоднородности и вероятного их расположения на диске; 5) приближенных значений отражательной способности безатмосферных небесных тел с неизвестными размерами; 6) наличии металлов в поверхностных слоях безатмосферных небесных тел; 7) силе и направлении магнитного поля и др. Для лучшего понимания сказанного напомним общие принципы формирования параметров вектора Стокса в излученном, диффузно пропущенном и диффузно отраженном свете.

Как известно, свет представляет собой поперечные электромагнитные волны, колебания электрического и магнитного векторов которых происходят в плоскостях, перпендикулярных к направлению распространения волн. Каждая из таких волн является эллиптически поляризованной и характеризуется вектором Стокса  $(I, Q, U, V)$ . Когда мы имеем дело с большим количеством волн, то происходит усреднение отдельных параметров и световой пучок превращается в частично поляризованный или полностью неполяризованный, интенсивности которых соответственно равны

$$I = I_0 + (Q^2 + U^2 + V^2)^{1/2} \quad (1)$$

и

$$I = I_0, \quad (2)$$

где  $I_0$  — часть неполяризованного излучения. Примером последнего могут служить звезды с нулевой поляризацией, хотя излучение их лимбовых точек довольно сильно поляризовано. Вследствие того, что (в случае оптически однородного диска звезды) степень поляризации одинакова для всех точек лимба, а плоскость поляризации каждой точки привязана к радиусу-вектору звезды, усредненное для всего диска значение  $P$  будет равно нулю. Однако вследствие действия различных эффектов (появление асимметрии оптических свойств диска небесного объекта, взаимодействие света с веществом и пр.) излучение небесных объектов становится частично поляризованным. Ниже рассмотрим наиболее простые механизмы превращения неполяризованного излучения в поляризованное и отметим ожидаемые наблюдательные эффекты.

ЭФФЕКТ ЗАТМЕННО-ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД

Когда звезда, свет которой неполяризован, частично затеняется другим небесным объектом (звездой или планетой), то вследствие нарушения условия оптической однородности диска ее свет становится частично поляризованным, а положение плоскости поляризации (в зависимости от того, неполяризован или поляризован свет затеняющей звезды) не будет зависеть или очень слабо будет зависеть от длины волны. Если свет затеняемой звезды поляризован, то на всей фазе затмения положение плоскости поляризации практически всегда будет зависеть от длины волны. В обоих случаях степень линейной поляризации и положение ее плоскости будут изменяться при изменении фазы затмения, а характер этих изменений

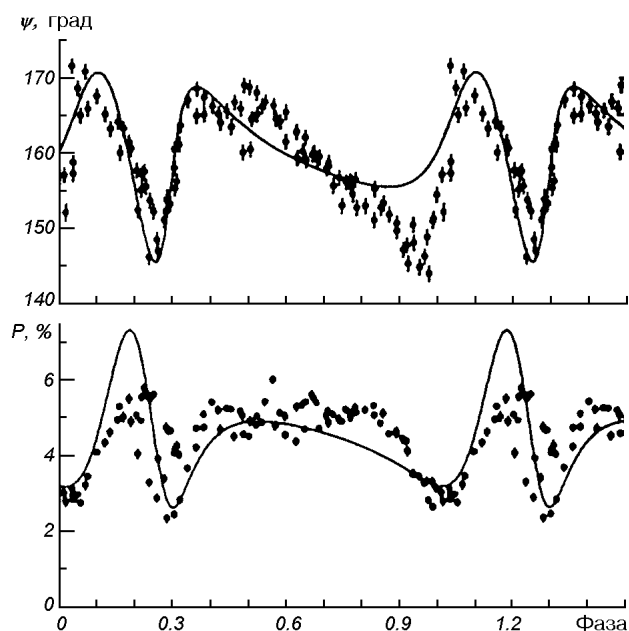


Рис. 1. Наблюдаемые (точки) и промоделированные (сплошные линии) изменения положения плоскости поляризации  $\psi$  и степени поляризации  $P$  двойной звезды Вольфа — Райе EZ Canis Major в зависимости от фазы затмения [7]

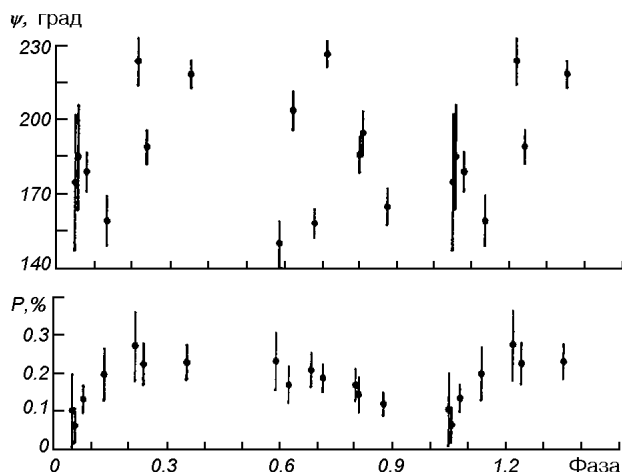


Рис. 2. Наблюдаемые изменения положения плоскости поляризации  $\psi$  и степени поляризации  $P$  звезды RU Lup в зависимости от фазы затмения [6]

Рис. 3. Изменение степени межзвездной поляризации с длиной волны [9]

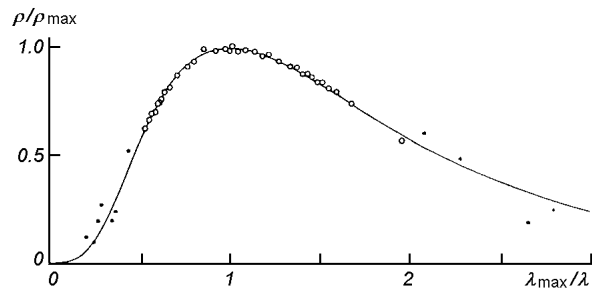
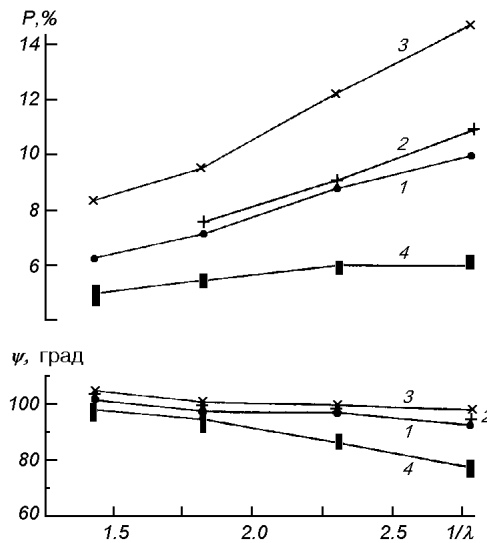


Рис. 4. Временные изменения спектральных значений степени поляризации и положения плоскости поляризации переменной звезды PR Puppis по наблюдениям на протяжении 76 дней [8]: 1 — JD = 471.27, 2 — JD = 472.27, 3 — JD = 478.17, 4 — JD = 503.20, 504.20, 505.18, 508.16



будет зависеть от положения трассы прохождения затемняющего объекта относительно центра диска звезды. Сказанное качественно подтверждается данными поляризационных измерений переменных звезд (рис. 1 и 2). Качественно подобная ситуация будет и тогда, когда оптическая неоднородность возникает непосредственно на диске звезды и за счет вращения последней изменяет свое положение на видимом диске.

#### ЭФФЕКТ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ

При прохождении света звезды сквозь межзвездную среду, которая содержит ориентированные частицы, независимо от первоначального состояния прошедшее излучение превращается в эллиптически поляризованное. При прохождении первоначально неполяризованного излучения измеряемая степень поляризации будет зависеть от длины волны (рис. 3), а положение плоскости поляризации привязано к плоскости ориентации частиц, и в довольно широком спектральном интервале не будет зависеть от длины волны. При прохождении поляризованного излучения может появиться спектральная зависимость ориентации плоскости поляризации. Это будет тогда, когда плоскость поляризации света звезды с плоскостью ориентации частиц составляет угол, отличный от 90 или 180°. Не исключено, что именно эту ситуацию отображает рис. 4.

Если при движении звезды в пространстве она проходит сквозь межзвездную среду с различными ориентацией частиц и их количеством на луче зрения, то в результате будет изменяться степень поляризации и положение плоскости поляризации со временем даже у стационарных звезд. Возможно, именно на это указывают данные рис. 5.

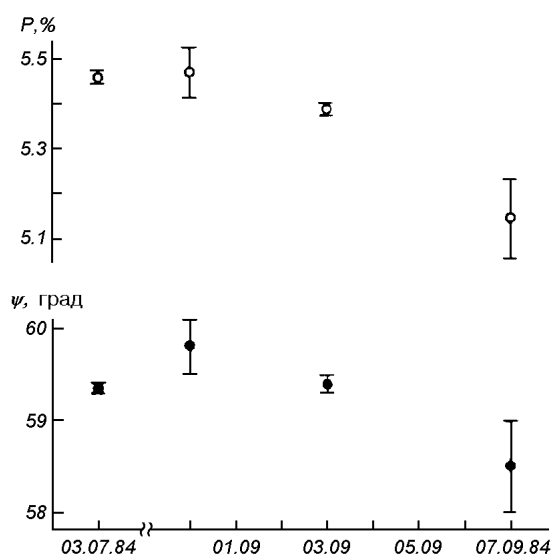


Рис. 5. Временные изменения степени поляризации и положения плоскости поляризации звезды HD204827 — поляризационного стандарта с большим значением степени поляризации [5]

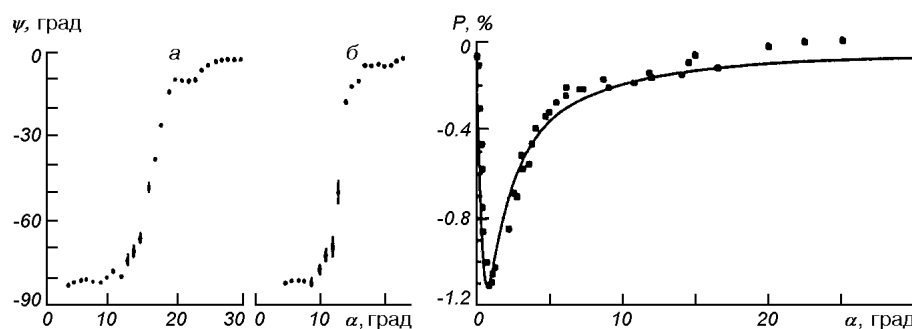


Рис. 6. Поворот положения плоскости поляризации вблизи точки инверсии для земных образцов: *a* — гранит, *б* — базальт

Рассмотренные эффекты относятся к оптически тонкому слою межзвездной среды, когда можно пренебречь многократным рассеянием. В этом случае наблюдаемая поляризация будет увеличиваться с увеличением относительного количества ориентированных частиц. Однако при больших оптических толщинах межзвездной среды многократное рассеяние приведет к деполаризации света. Если размеры частиц межзвездной среды сравнимы с длиной волны, то за счет сильного спектрального хода коэффициента рассеяния аэрозоля и газа в коротковолновой области спектра оптическая толщина может достигнуть значений, когда эффекты многократного рассеяния станут существенными. Не исключено, что этим эффектом хотя бы частично обусловлен приведенный на рис. 3 спектральный ход степени поляризации.

Из сказанного следует, что высокоточные (с погрешностями степени поляризации на уровне сотых долей процента и положения плоскости поляризации не больше  $1^\circ$ ) систематические поляризационные измерения звезд позволят накопить наблюдательные данные для изучения пространственной структуры аэрозольной составляющей межзвездной среды и направления ориентирующих частицы сил (магнитного поля или гравитационной силы).

**НЕБЕСНЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ**

Поскольку основные поляризационные свойства света этих тел довольно подробно были рассмотрены в работе [4], то здесь назовем только основные научные задачи, эффективное решение которых возможно только при наличии данных поляризационных наблюдений.

**Безатмосферные тела.** 1. Используя общеизвестный эффект Умова, согласно которому темные шороховатые тела характеризуются большим значением степени поляризации чем светлые, можно изучать оптическую неоднородность и оценивать приближенные значения отражательной способности безатмосферных небесных тел и искусственных небесных тел. Дело в том, что данные многочисленных измерений (в первую очередь земных образцов и деталей диска Луны) для максимального значения положительной поляризации указали на наличие эмпирического выражения, которое связывает видимое альbedo  $A(\alpha)$  и степень поляризации  $P(\alpha)$  безатмосферного небесного тела

$$\lg A(\alpha) = C(\alpha) - n \lg P(\alpha), \quad (3)$$

где  $C$  — постоянная;  $n$  — параметр, значение которого близко к 1 и, возможно, также изменяется с углом фазы. Сейчас имеются довольно веские аргументы в пользу того, что это выражение справедливо для всей ветви положительной поляризации (для  $\alpha > 30^\circ$ ). Если принять, что постоянная  $C(\alpha)$  и параметр  $n$  для шероховатых поверхностей различной природы имеют примерно одинаковые значения, то это выражение можно использовать для оценки приближенных значений альbedo тел с неизвестными размерами и определять степень оптической неоднородности дисков естественных и искусственных безатмосферных небесных тел.

$$R = \left[ \frac{\pi}{2A(\alpha)} 2.512^{m_c - m} \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где  $m_c$  — звездная величина Солнца,  $m$  — звездная величина астероида, приведенная на расстояние 1 а. е. от Земли и Солнца.

2. Поскольку переориентация плоскости поляризации на  $90^\circ$  происходит в некотором интервале фазовых углов (в котором и находится точка инверсии  $\alpha_1$ ), а его ширина зависит от природы поверхностного слоя (рис. б), то полученные значения  $\Delta\alpha$  можно использовать при изучении минералогического состава поверхностного слоя безатмосферного небесного тела.

3. Согласно лабораторным измерениям свет, диффузно отраженный шороховатыми поверхностями, на которых находятся металлические частицы, на больших значениях фазового угла ( $\alpha > 130^\circ$ ) будет эллиптически поляризованным даже при освещении неполяризованным светом. Следовательно, такие измерения позволяют обнаруживать небесные тела, поверхности которых содержат металлы.

**Планеты с атмосферами.** Кроме общеизвестного факта определения действительной части показателя преломления и параметров функции распределения частиц по размерам атмосферного аэрозоля, поляризационные наблюдения позволяют решать еще и другие задачи.

1. При изучении причин временных изменений оптических характеристик планет только спектрополяриметрические измерения в контурах сильных полос поглощения газов позволяют однозначно отслеживать изменение оптической толщины надоблачного чисто газового (или почти чисто газового) слоя. Так, если измерены значения степени поляризации в центре полосы поглощения  $P_v(1, \mu_0)$  и в непрерывном спектре  $P_c(1, \mu_0)$ , а также остаточной интенсивности в центре полосы поглощения

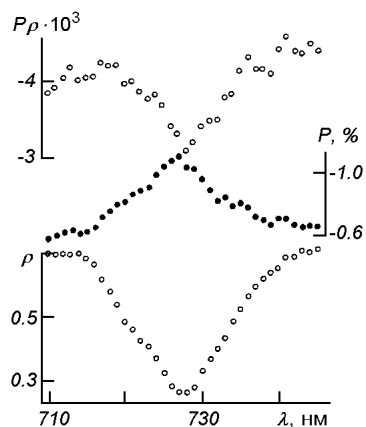


Рис. 7. Контуры полосы поглощения метана в поляризации  $P$ , отражательной способности  $\rho$  и произведения  $P\rho$  при фазовом угле  $10.7^\circ$

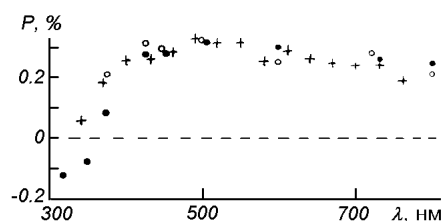


Рис. 8. Зависимость степени поляризации света диска Юпитера от длины волны при  $\alpha < 0.4^\circ$  по наблюдениям в различные годы (светлые кружки — 1971 г., темные кружки — 1973 г., крестики — 1986 г.)

$R_v(1, \mu_0)$  в центре диска планеты при значении косинуса угла падения света  $\mu_0 = \cos\alpha$ , то оптическая толщина поглощающего газа определяется с помощью выражения

$$\tau_v = - \frac{\mu_0}{1 + \mu_0} \ln \frac{P_v(1, \mu_0)}{P_c(1, \mu_0)R_v(1, \mu_0)}. \quad (5)$$

Оно также является следствием эффекта Умова, справедливость которого для центра диска планеты с полубесконечной газовой-аэрозольной средой подтвердили многие модельные расчеты. Степень невыполнения этого эффекта для Юпитера, над облачным слоем атмосферы которого имеется оптически тонкий почти чисто газовый слой, демонстрирует рис. 7.

2. Как показали поляризационные измерения диска Юпитера при близких к нулю значениях фазового угла, наличие оптической неоднородности диска планеты проявляется в увеличении степени поляризации при приближении к нулевому фазовому углу (рис. 8). Это позволяет вести независимый мониторинг долгопериодических изменений степени оптической неоднородности дисков планет.

Поскольку в большинстве случаев поляризационные измерения преследуют цель не только обнаружить поляризованность света того или иного небесного объекта, но и проследить ее изменения во времени, а для тел Солнечной системы еще и с углом фазы, то такие наблюдения требуют постоянной занятости телескопа длительное время (от недель до многих месяцев). Как правило, они ведутся на телескопах с диаметром зеркал от 60 см до 150 см. Так, приведенные на рис. 1—4 данные получены на телескопах с диаметром зеркала 100 см, а на рис. 7 и 8 — 60 и 70 см. Поэтому перечисленные выше научные задачи физики переменных звезд, межзвездной среды и тел Солнечной системы с успехом можно решать на 70-см рефлекторе ГАО НАН Украины, который сейчас практически не эксплуатируется. Для этого необходимо модернизировать (расширить в первую очередь спектральный диапазон до  $\lambda = 1$  мкм) имеющийся оптико-механический блок Астрономического спектрополяриметра [1—3], прототи-

пы которого успешно работали на Высокогорной базе в Узбекистане (гора Майданак) и в Боливии (на обсерватории Санта-Анна вблизи г. Тариха). Напомним, что этот прибор позволял вести как поляриметрические так и спектрополяриметрические измерения небесных тел. В первом случае спектральная селекция осуществлялась с помощью 18 светофильтров, а во втором — дискретным поворотом дифракционной решетки с переменным шагом от 0.1 до 10 нм. Отметим, что в режиме фильтрового фотометра с Международной системой *UBVRI* для поляриметрических измерений с погрешностью на уровне 0.05 % доступны небесные объекты со звездными величинами до 9—10<sup>м</sup>. Отметим, что при использовании поляриметров с высокочастотной (больше 50 Гц) модуляцией света количество пригодных для поляризационных наблюдений ночей (полных и неполных) в Киеве колеблется от 100 до 200.

1. Бугаенко Л. А., Бугаенко О. И., Гуральчук В. Л. и др. Астрономический спектрополяриметр. III. Информационно-измерительная и регистрирующая система // Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 169—178.
2. Бугаенко Л. А., Мельников М. А., Рагозина Л. Е., Самойлов В. С. Астрономический спектрополяриметр. II. Оптико-механический блок // Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 164—169.
3. Бугаенко О. И., Гуральчук В. Л. Астрономический спектрополяриметр. I. Основные принципы работы // Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел. — Киев: Наук. думка., 1985.—С. 169—178.
4. Мороженко А. В. Поляриметрия в изучении тел Солнечной системы // Кинематика и физика небес. тел.—2002.—18, № 6.—С. 483—507.
5. Dolan J. F., Tapica S. Wavelength dependence of position angle in polarization standarts // Publ. Astron. Soc. Pacif.—1986.—98, N 606.—P. 303—310.
6. Drissen L., Bastien P., St.-Louis N. Linear polarization of T Tauri Stars. I. Variability of southern stars // Astron. J.—1989.—97, N 3.—P. 814—820.
7. Drissen L., Robert C., Lamotagne R., et al. Photometry and polarimetry of the Unusual WN5 star EZ Canis Majors // Astrophys. J.—1989.—343, N 1, Pt. 1.—P. 426—436.
8. Raveendran A. V., Kameswara Rao N. Polarimetric observations of the RV Tauri star AR Puppis // Astron. Astrophys.—1988.—191, N 1/2.—P. 259—263.
9. Serkowski K. Polarimeters for optical astronomy // Planets, Stars and Nebulae studied with photopolarimetry / Ed. by T. Gehrels. — Tucson, Arizona, 1974.—P. 135—174.

Поступила в редакцию 06.02.04