

УДК 523.44

Поляриметрия астероидов: результаты сотрудничества между НИИ астрономии (Харьков) и КрАО

Д.Ф. Лупишко, И.Н. Бельская

НИИ астрономии Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина
lupishko@astron.kharkov.ua

Поступила в редакцию 2 сентября 2011 г. Доклад на совещании Рабочей группы «Поляриметрия» в НИИ «КрАО» 19–20 апреля 2011 г.

POLARIMETRY OF ASTEROIDS: RESULTS OF COLLABORATION BETWEEN THE RESEARCH INSTITUTE OF ASTRONOMY (KHARKOV) AND CRAO, *by D.F. Lupishko, I.N. Belskaya.*

Ключевые слова: астероиды, поляриметрия, фазовая зависимость поляризации, вариации параметров поляризации

В первой половине 70-х годов в Аризонском университете (США) осуществлена широкая программа поляриметрических наблюдений астероидов и получены параметры фазовых кривых поляризации в одном или в двух фильтрах около сотни астероидов (Зельнер и Грейди, 1976). Основное использование этих данных сводилось по сути к определениям альbedo и диаметров астероидов, используя эмпирические зависимости «поляриметрический наклон-альbedo» и « P_{\min} -альbedo», а физическая интерпретация их оставалась крайне ограниченной и сводилась к сравнению с аналогичными данными для Луны и Меркурия и заключению о наличии реголита на поверхностях астероидов. Трудности в интерпретации результатов поляриметрии явились одной из причин того, что поляриметрические наблюдения астероидов после этой программы (т. е. начиная с середины 70-х годов) фактически были прекращены.

На этом фоне в 1983 г. началось сотрудничество в поляриметрии астероидов между АО ХГУ и КрАО. Со стороны КрАО в этих исследованиях принимали участие Н.М. Шаховской и Ю.С. Ефимов, а со стороны НИИ астрономии – Д.Ф. Лупишко, И.Н. Бельская и С.В. Васильев. Наблюдения проводились на 1.25-м рефлекторе АЗТ-11 и пятицветном UVVRI-поляриметре, и основной целью их было изучение спектральной зависимости параметров поляризации астероидов, поскольку ранее такие исследования не проводились.

Общий результат изучения зависимостей $P_{\min}(\lambda)$ астероидов различных композиционных типов сводится к тому, что их характер определяется типом астероида и имеет качественное сходство с аналогичными зависимостями для соответствующих метеоритных аналогов вещества: для астероидов низкоальбедных типов $|P_{\min}|$ уменьшается в красную область спектра (подобно углистым хондритам), а для средне- и высокоальбедных, наоборот, возрастает (подобно обыкновенным, энстатитовым хондритам и земным породообразующим силикатам). Этот ре-

зультат представляется важным как с точки зрения генетической связи между астероидами и метеоритами, так и с точки зрения классификации астероидов по типам.

Ряд астероидов главного пояса и сближающихся с Землей (АСЗ) исследовались более детально в течение нескольких оппозиций, и были получены важные результаты, некоторые из них – на уровне новых поляриметрических эффектов.

Астероид 16 Психея

Это крупнейший из астероидов среди М-типа («металлических», $D = 260$ км). Ко времени начала наших наблюдений величина оппозиционного эффекта блеска была измерена только для восьми астероидов, и она оказалась наибольшей у Психеи. Единственной работой, посвященной изучению вещества М-астероидов, была работа Дольфюса и др. (1979), в которой авторы пришли к выводу о чисто металлическом составе вещества поверхностей астероидов М-типа. Если принять их точку зрения, то в этом случае оппозиционный эффект Психеи будет обусловлен теневым эффектом, поскольку металлические частицы непрозрачны и, следовательно, оптическая концентрация света в направлении на источник должна отсутствовать. Поэтому большая величина эффекта оппозиции у Психеи предполагает сильную шероховатость ее поверхности. Так как металлы при температурах ниже 200°K теряют свою ковкость и становятся хрупкими (Дольфюс и др., 1979), то необходимая шероховатость может быть обусловлена достаточно рыхлым слоем частиц поверхностного вещества, образующихся в результате метеоритной бомбардировки астероида и оседающих на его поверхность в условиях вакуума и слабого гравитационного притяжения. При наличии у металлического астероида собственного магнитного поля последнее может ориентировать вдоль направления силовых линий оседающие, а также образующиеся непосредственно на поверхности частицы поверхностного вещества.

Согласно измерениям Гуськовой (1972) вземная остаточная намагниченность железных метеоритов заключена в пределах $0.004 \leq I_n \leq 1.2$ ед. СГС, что свидетельствует о намагниченности их полями $0.4 \div 1.4$ Э. Со своей стороны, нами были сделаны оценки напряженности магнитного поля, которое способно ориентировать продолговатые металлические частицы размером в 30 мкм (такой размер был получен Дольфюсом и др., 1979). Напряженность поля оказалась равной $0.26 \div 3.2$ Э (Бельская и др., 1985), т. е. тоже ~ 1 Э. В условиях метеоритной бомбардировки магнитное поле, в принципе, может создавать на поверхности астероида слой налипших друг на друга вдоль магнитных силовых линий ферромагнитных частиц, обладающий достаточно сильной шероховатостью для обеспечения наблюдаемой величины оппозиционного эффекта (что-то типа «магнитного инея»). Если преимущественная ориентация частиц поверхности действительно существует и не совпадает с направлением оси вращения, то при наблюдении астероида вдоль этой оси (т. е. со стороны полюса), когда наблюдается одна и та же поверхность, должны иметь место периодические изменения с вращением астероида вокруг оси как степени поляризации, так и значения позиционного угла плоскости поляризации (с периодом, равным $0,5P^h$).

Удобный случай для проверки этой возможности представился в 1983 г., когда направление на астероид было близким к направлению его оси вращения. Результаты измерений параметров Стокса q и u , соответствующих максимальной отрицательной поляризации Психеи, в течение 2-х ночей, которые охватывают полный период вращения астероида вокруг своей оси (4 час 12 мин), представлены на рис. 1. Видно, что заметные периодические изменения параметров q и u отсутствуют. Проверка дисперсии параметров Стокса по критерию Фишера привела к выводу об отсутствии значимых периодических изменений параметров q и u и, следовательно, об отсутствии преимущественной ориентации частиц на поверхности Психеи (Бельская и др., 1985).

В принципе, проведенные нами измерения не позволяют обнаружить ориентацию частиц, совпадающую с направлением луча зрения. Для этого нужны наблюдения астероида вблизи

экваториального аспекта. Как выяснилось, единственные поляриметрические наблюдения, которые были проведены ранее американцами, относятся как раз к экваториальному аспекту. При фазовом угле $\alpha = 9.2^\circ$ в полосе V они дали $P_r = 1.02 \pm 0.03 \%$ и $\theta_r = 90.8 \pm 0.8^\circ$ (Зельнер и Грейди, 1976), которые хорошо совпадают с полученными нами для близполюсного аспекта при близком значении фазового угла $P_r = 1.04 \pm 0.03 \%$ и $\theta_r = 89.1 \pm 1.4^\circ$.

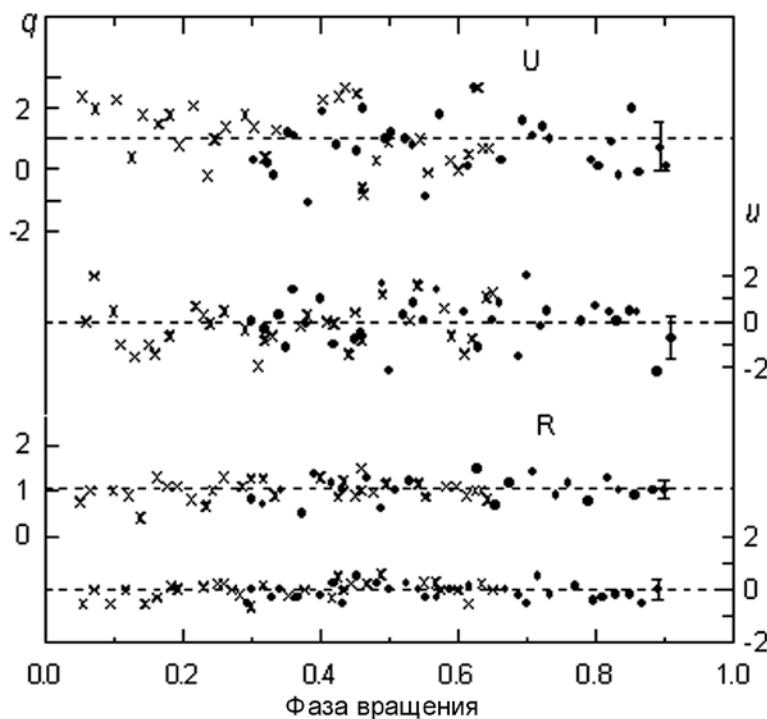


Рис. 1. Астероид 16 Психея: вариации параметров Стокса с вращением астероида вокруг своей оси

Таким образом, полученные данные свидетельствуют об отсутствии преимущественной ориентации частиц поверхностного слоя Психеи, вызванной возможным наличием у астероида магнитного поля. Этот результат делает гипотезу металлической природы вещества Психеи менее вероятной. Добавим, что в 1988 г. Лупишко и Бельская (1989) показали, что вещество крупнейших астероидов М-типа не может быть чисто металлическим (как утверждали Дольфус и др., 1979), а содержит как минимум 50 % силикатов. Спустя еще 7–8 лет этот результат был подтвержден спектральными и радарными наблюдениями.

Астероид 4 Веста

Это один из крупнейших астероидов главного пояса. Вариации степени отрицательной поляризации по диску Весты были измерены в США еще в 70-х годах (Зельнер и Грейди, 1976). В 1986 г. в рамках программы «Веста-86» были проведены наблюдения Весты на трех обсерваториях (КраО, Абастуманской и Советско-Боливийской), которые в общем подтвердили данные американцев, но дали в два раза большие вариации параметра P_{\min} . Кроме того, одновременные измерения блеска и поляризации Весты, полученные Н.Н. Киселевым в Боливии (рис. 2), показали четкую обратную корреляцию модуля степени отрицательной поляризации с кривой бле-

ска. Поскольку последняя обусловлена в случае Весты не столько формой, сколько распределением альбедо по поверхности, то обратная корреляция есть не что иное, как проявление закона Умова. Таким образом, на примере Весты видно, что закон Умова справедлив и для отрицательной поляризации.

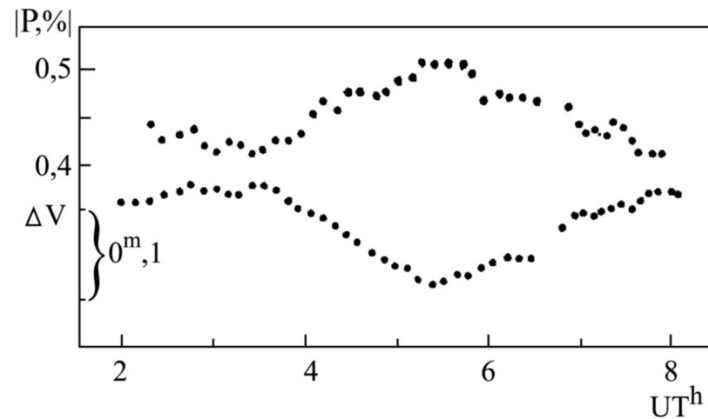


Рис. 2. Вариации степени поляризации по поверхности (верхняя кривая) и кривая блеска в полосе V астероида 4 Веста

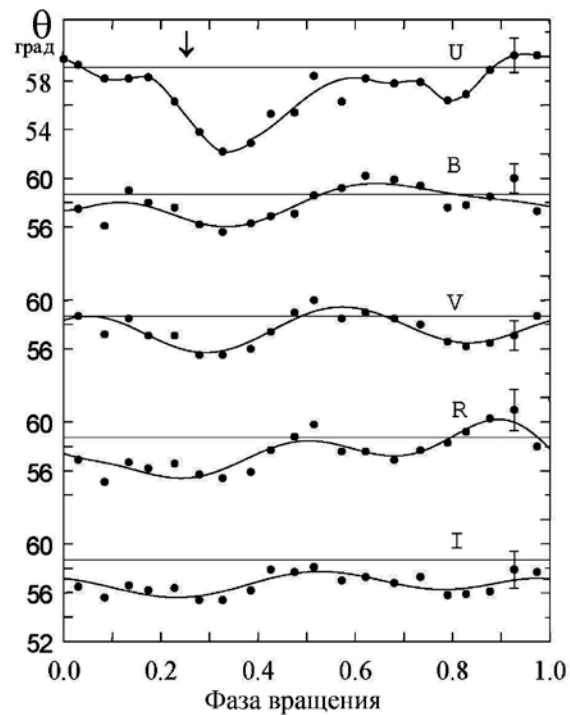


Рис. 3. Вариации позиционного угла плоскости поляризации Весты с вращением ее вокруг своей оси. Стрелкой указано положение центра кратера

В 1990 г. в КрАО были проведены поляриметрические UBVR-I-наблюдения Весты в течение ее полного оборота вокруг оси (5.342 час). В полосе V относительные вариации $\Delta P/P$ оказались наибольшими (0.24) по сравнению с измеренными ранее, поскольку были измерены при экваториальном аспекте астероида. Хорошо видна обратная корреляция степени поляризации с кривой блеска.

На рис. 3 представлены впервые полученные не только для Весты, а для астероидов вообще, вариации позиционного угла плоскости поляризации θ с вращением астероида вокруг своей оси. Отметим, что среднеквадратические ошибки отдельной точки на этом рисунке в среднем составляют от 1.2 до 1.5° . Вариации угла θ оказались максимальными в полосе U ($\Delta\theta = 8^\circ$) и минимальными в полосе I (2.5°). Характер их изменения по спектру, а также с фазой вращения свидетельствует в пользу реальности этих вариаций. Диаграмма параметров Стокса p_x и p_y на периоде вращения Весты (Лупишко и др., 1999) представляет собой замкнутую циклическую фигуру, которая указывает на периодические изменения этих параметров, а значит, и степени поляризации, и угла θ . Повторные наблюдения Весты в 1996 г. тоже при экваториальном аспекте, однако только в полосах UVV подтвердили наличие вариаций позиционного угла θ с вращением и дали даже несколько большую их амплитуду (Лупишко и др., 1999). В оба противостояния имели место отклонения плоскости поляризации от плоскости рассеяния (максимальные – в полосе U), причем в обоих случаях – в одну сторону.

Чем же можно объяснить вариации позиционного угла θ по поверхности Весты? Как известно, космический телескоп Хаббла обнаружил на Весте гигантский кратер диаметром около 460 км (Томас и др., 1997). Ясно, что столкновение, приведшее к его образованию, было близким к катастрофическому для Весты ($D = 525$ км), поэтому в области кратера (а может быть и не только), который вместе с валом занимает большую часть южного полушария, весьма вероятно существование линейных структур типа “grooves” (борозды, трещины) и склонов, которые могут создавать определенную ориентацию деталей рельефа и вызывать соответствующую асимметрию и, как результат, отклонение плоскости поляризации от плоскости рассеяния. Оказалось, что измеренная амплитуда и характер вариаций угла θ в оба противостояния хорошо согласуются с топографическими и геологическими особенностями Весты и положением центра кратера на диске, что говорит в пользу предложенной гипотезы (Лупишко и др., 1999). Почему более резкие вариации и с большей амплитудой были в 1996 г. можно понять из аспектных данных: в 1996 г. наблюдениям было доступно южное полушарие Весты, которое почти полностью занимает этот гигантский кратер. Вывод здесь можно сделать такой, что поляриметрия с вращением астероида вокруг оси дает возможность изучать также особенности макро-рельефа астероидов. Первые снимки Весты, полученные космическим аппаратом “Dawn” в июле 2011 г. показали сложный рельеф ее поверхности, а дальнейшие исследования с более близкого расстояния помогут понять происхождение разнообразных геологических образований на поверхности Весты.

Сближающийся с Землей астероид 4179 Тоутатис

Наблюдения Тоутатиса проводились в течение шести ночей в дек. 1992 – янв. 1993 гг. в диапазоне фазовых углов $15.8 \div 51.4^\circ$. Полученные параметры фазовых зависимостей поляризации Тоутатиса (Лупишко и др., 1995) дали возможность оценить альбедо (0.16) и диаметр (3.1 км) астероида и подтвердить его классификацию как объекта S-типа.

Напомним, что в системе координат, связанной с плоскостью рассеяния, второй параметр Стокса $Q = P \cdot \cos 2\theta_r$ соответствует поляризации с плоскостью колебаний, перпендикулярной плоскости рассеяния ($P > 0$), или совпадающей с ней ($P < 0$), а третий параметр $U = P \cdot \sin 2\theta_r$ соответствует поляризации с плоскостью колебаний, ориентированной под углом 45° (или 135°) к плоскости рассеяния. Так вот оказалось, что когда значения параметра Q большие (три даты с $\alpha > 30^\circ$, $Q = 1 \div 4\%$), параметр U с точностью до ошибок измерений равен нулю. Но вблизи точки инверсии, где Q по своему значению близко к нулю, параметр U, наоборот, становится значимым. Графически это лучше всего видно на зависимости позиционного угла θ_r от угла фазы α (рис. 4). Три разные даты наблюдений с $\alpha = 15.8 \div 18.6^\circ$ показывают, что значение

угла θ_r отличалось от 0 или 90° и равнялось примерно 45° . При этом эффект проявляется во всех фильтрах одновременно, значительно превышая ошибки определения угла θ_r . Стоит отметить также, что в полосах В и R, где ошибки угла θ_r в эти три даты минимальны, изменение величины θ_r с углом фазы практически одинаковое. Эта деталь может быть еще одним доводом в пользу реальности замеченного эффекта. Все это свидетельствует об отклонении вектора поляризации от плоскостей перпендикулярной или параллельной плоскости рассеяния и может говорить о присутствии поляризации, не связанной с плоскостью рассеяния. Каких-либо других указаний на подобный эффект у безатмосферных космических тел в литературе не обнаружено.

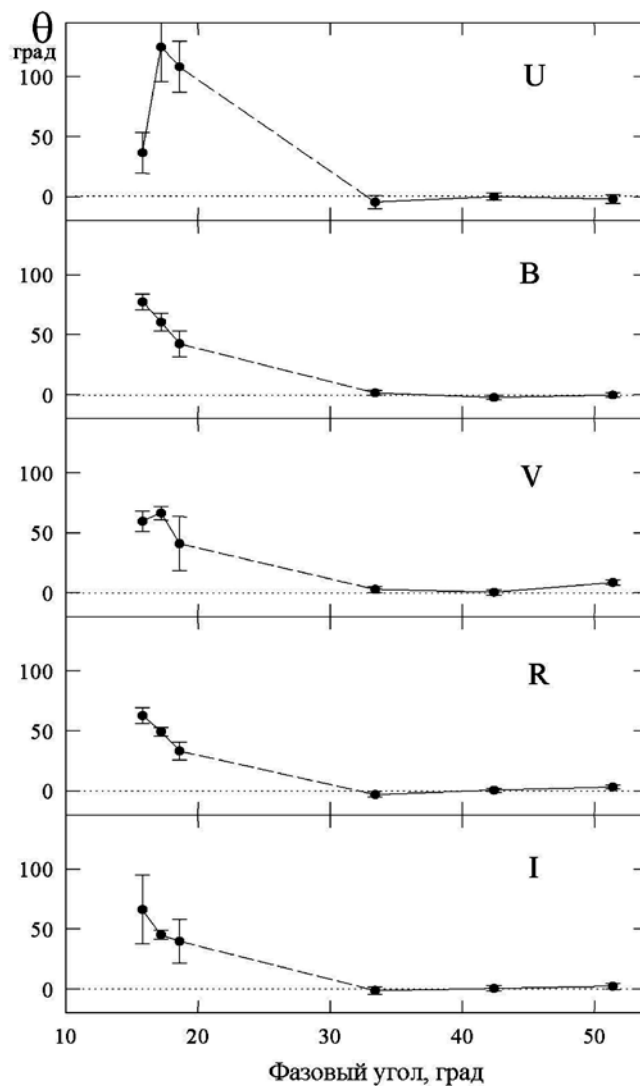


Рис. 4. Зависимость позиционного угла плоскости поляризации астероида 4179 Тютатис от фазового угла

Одно из возможных объяснений – это очень сложная форма Тютатиса, вплоть до двойственности (в пользу чего говорят радарные данные Хадсона и Остро (1995)), при которой, в частности, возможна взаимная подсветка компонент отраженным при больших углах и потому достаточно сильно поляризованным излучением. Ориентация плоскости поляризации при этом

будет зависеть от геометрии расположения компонент астероида по отношению к плоскости рассеяния.

Астероид 419 Аурелия

Это низкоальбедный астероид F-типа с $p_{v(IRAS)} = 0.046$ и $D = 129$ км, один из нескольких астероидов, которые не показывают оппозиционный эффект в фазовой зависимости блеска. Именно поэтому было интересно получить его фазовую зависимость поляризации. Наблюдения Аурелии были проведены в течение трех оппозиций в 1997, 2001 и 2003 гг. (Бельская и др., 2005).

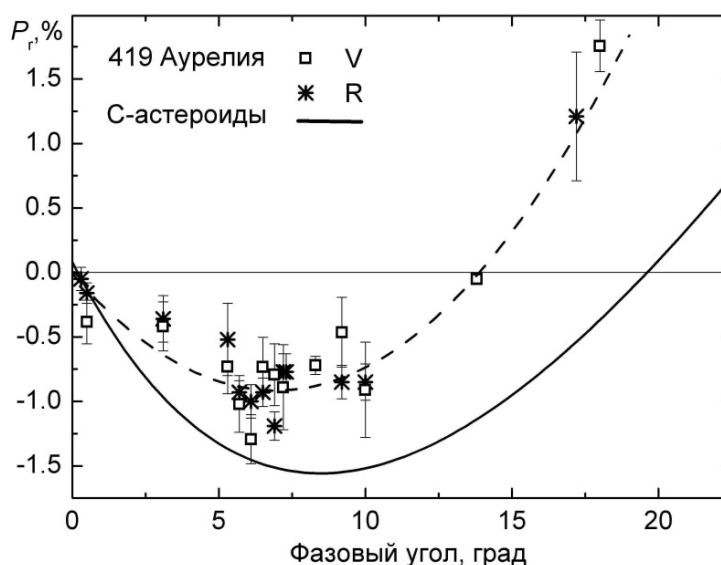


Рис. 5. Фазовая зависимость поляризации Аурелии, измеренная в спектральных полосах V и R, и средняя фазовая кривая поляризации низкоальбедных астероидов C-типа

Оказалось, что фазовая кривая поляризации Аурелии нетипична для низкоальбедных астероидов и характеризуется относительно неглубокой ветвью отрицательной поляризации с $P_{\min} \sim 1\%$ (против $1.5 \div 1.7\%$ для низкоальбедных астероидов). Кроме того, у Аурелии обнаружен наименьший из известных угол инверсии $\alpha_{\text{inv}} \sim 14^\circ$ (против обычных 20°). На рис. 5 представлена фазовая зависимость поляризации Аурелии, измеренная в двух спектральных полосах V и R, и средняя фазовая кривая поляризации низкоальбедных астероидов C-типа. Угол инверсии Аурелии имеет наименьшее значение не только среди низкоальбедных астероидов, но и среди всех около 200 астероидов различных типов поверхности, для которых проводились поляриметрические измерения. Последующие наблюдения показали, что малые углы инверсии характерны и для других астероидов F-типа (Бельская и др., 2005). Возможная интерпретация особых свойств поверхности астероидов этого типа связывается с более высокой оптической однородностью реголита в масштабах порядка длины волны по сравнению с поверхностями других низкоальбедных астероидов (Шкуратов и др., 2004), т. е. с отсутствием оптически контрастных компонентов вещества. Для однородных темных поверхностей характерны менее глубокие ветви отрицательной поляризации по сравнению с поверхностями, в которых присутствуют частицы с высокой отражательной способностью. Такая интерпретация согласуется с плоскими без особенностей спектрами F-астероидов, поскольку спектральные особенности большей частью обусловлены относительно светлой компонентой. Не исключено, что F-астероиды имеют генети-

ческую связь с потухшими ядрами комет. Колоколова и Йокерс (1997) предполагают, что вещество их поверхностей может быть подобным кометной пыли.

Астероид 21 Лютеция

Этот астероид главного пояса диаметром ~ 100 км первоначально был классифицирован как астероид М-типа. Поляриметрические наблюдения, проведенные в КрАО в октябре 1985 г., показали, что отрицательная ветвь поляризации гораздо глубже, чем типичная для астероидов М-типа. Последующие поляриметрические наблюдения Лютеции проводились в 2004–2008 гг. на базе трех обсерваторий в Крыму, Италии и Аргентине (Бельская и др., 2010). Их целью было получение детальной фазовой зависимости этого астероида, отобранного для исследования космической миссией Rosetta Европейского космического агентства.

Измеренная фазовая зависимость поляризации Лютеции в спектральной полосе V показана на рис. 6. Разброс данных измерений относительно средней кривой превышает ошибки индивидуальных измерений, что свидетельствует о возможном наличии вариаций поляризации по поверхности этого астероида. Анализ вариаций показал, что они коррелируют с периодом вращения Лютеции $P = 8.168$ час и зависят от аспекта наблюдений (Бельская и др., 2010). Был сделан вывод, что, как и в случае с астероидом Веста, вариации поляризации по поверхности Лютеции обусловлены ее макрорельефом, вероятнее всего, наличием большого кратера. Этот вывод был подтвержден, когда в июле 2010 г. космический аппарат Rosetta получил снимки поверхности Лютеции и обнаружил большой кратер в северном полушарии с диаметром, сравнимым с размерами астероида.

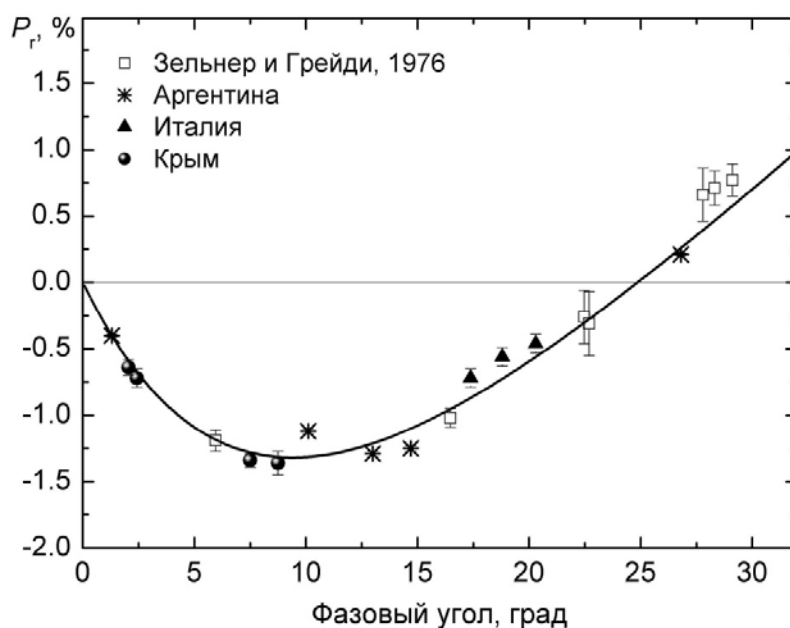


Рис. 6. Фазовая зависимость поляризации Лютеции по данным наблюдений в 1974–2008 гг. на различных обсерваториях

Особенностью фазовой кривой поляризации Лютеции является широкая ветвь отрицательной поляризации с $P_{min} = 1.30 \pm 0.07$ % и углом инверсии $\alpha_{inv} = 25.0 \pm 0.4^\circ$, непохожая ни на один из измеренных на сегодняшний день астероидов. Возможными поляриметрическими

Поляриметрия астероидов: результаты сотрудничества...

(Бельская и Лагерквист, 1996; Бельская и др., 2010) и спектральными (Бирлан и др., 2004) аналогами вещества Лютеции являются углистые хондриты CV3 и CO3 типов, которые характеризуются низким содержанием углерода и поэтому более высоким альбедо по сравнению со средним для низкоальбедных астероидов. Хондриты этих групп содержат кальций-алюминиевые включения с высокими показателями преломления, что может быть причиной больших углов инверсии ($25\text{--}28^\circ$), измеренных у этого типа метеоритов (Зельнер и др., 1977). Другое объяснение широкой ветви отрицательной поляризации Лютеции может быть связано с микроструктурой ее поверхности. Угол инверсии имеет тенденцию увеличиваться с уменьшением размера частиц (см., например, Дольфус и др., 1979). Возможно, что реголит на поверхности астероида Лютеция мелкозернистый с размерами частиц менее 20 микрон (Бельская и др., 2010).

Хочется надеяться, что полная обработка данных космической миссии Rosetta внесет ясность в понимание природы этого «нестандартного» астероида.

Авторы искренне признательны Н.М. Шаховскому, Ю.С. Ефимову и руководству КрАО за многолетнее плодотворное сотрудничество и надеются на его продолжение.

Литература

- Бельская И.Н., Ефимов Ю.С., Лупишко Д.Ф., Шаховской Н.М. // Письма в Астрон. журн. 1985. Т. 11. № 4. С. 286.
- Бельская и Лагерквист (Belskaya I.N., Lagerkvist C.-I.) // Planet. Space Sci. 1996. V. 44. № 8. P. 783.
- Бельская и др. (Belskaya I.N., Fornasier S., Krugly Yu.N., et al.) // Astron. Astrophys. 2010. V. 515. P. A29.
- Бельская и др. (Belskaya I.N., Shkuratov Yu.G., Efimov Yu.S., et al.) // Icarus. 2005. V. 178. № 1. P. 213.
- Бирлан и др. (Birlan M., Barucci M.A., Vernazza P., et al.) // New Astron. 2004. V. 9. P. 343.
- Гуськова Е.Г. // Магнитные свойства метеоритов. М.: Наука. 1972.
- Дольфус и др. (Dollfus A., Mandeville J.C., Duseaux M.) // Icarus. 1979. V. 37. № 1. P. 124.
- Зельнер и Грейди (Zellner B., Gradie J.) // Astron. J. 1976. V. 81. № 4. P. 262.
- Зельнер и др. (Zellner B., Leake M., Lebertre T., et al.) // Proc. Lunar Sci. Conf. 8th. 1977. P. 1091.
- Колоколова и Йокерс (Kolokolova L., Jockers K.) // Planet. Space Sci. 1997. V. 45. P. 1543.
- Лупишко и Бельская (Lupishko D.F., Belskaya I.N.) // Icarus. 1989. V. 78. № 2. P. 395.
- Лупишко Д.Ф., Ефимов Ю.С., Шаховской Н.М. // Астрон. вестник. 1999. Т. 33. № 1. С. 50.
- Лупишко и др. (Lupishko D.F., Vasilyev S.V., Efimov Yu.S., Shakhovskoj N.M.) // Icarus. 1995. V. 113. № 1. P. 2005.
- Томас и др. (Thomas P.C., Binzel R.P., Gaffey M.J., et al.) // Science. 1997. V. 277. P. 1492.
- Хадсон и Остро (Hudson R.S., Ostro S.J.) // Science. 1995. V. 270. P. 84.
- Шкуратов и др. (Shkuratov Yu., Ovcharenko A., Zubko E., et al.) // J. Quant. Spectrosc. Rad. Trans. 2004. V. 88. P. 267.