

УДК 523.64

Поляриметрические исследования комет в Крымской астрофизической обсерватории

Н.Н. Киселев^{1,2}, В.К. Розенбуш¹, Н.М. Шаховской³, Ю.С. Ефимов³

¹ Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, 03680, ул. Заболотного 27, Киев
kiselev@mao.kiev.ua

² Институт астрономии Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, 61022, Харьков

³ НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 10 марта 2006 г.

Аннотация. В период 1976–2005 гг. в Крымской астрофизической обсерватории проведены поляриметрические наблюдения комет C/1976 V1 (Вест), 47P/Ашбрук-Джексон, 67P/Чурюмов-Герасименко, C/1995 O1 (Хейл-Бопп), C/1999 S4 (LINEAR), 2P/Энке, C/2002 T7 (LINEAR), C/2001 Q4 (NEAT) и 9P/Темпель 1. Наиболее важными результатами этих наблюдений являются: подтверждение открытия в комете Веста отрицательной поляризации, обнаружение круговой поляризации излучения комет Хейла-Боппа и S4 (LINEAR) и изучение ее распределения по коме, определение оптической толщины пылевой комы кометы Хейла-Боппа из наблюдений покрытия звезды, спектральная зависимость отрицательной поляризации и найденные кратковременные вариации поляризации до ~0.5%, связанные с активностью кометы T7 (LINEAR). Совместный анализ результатов апертурных и панорамных (ПЗС) поляриметрических наблюдений кометы Энке показал, что низкая поляризация излучения газовых комет является артефактом, вызванным пропусканием континуумными фильтрами молекулярных эмиссий и/или низким пространственным разрешением апертурной поляриметрии. Полученные результаты были использованы в ряде теоретических работ по интерпретации физических свойств кометной пыли.

POLARIMETRIC INVESTIGATION OF COMETS AT CRIMEAN ASTROPHYSICAL OBSERVATORY, by N.N. Kiselev, V.K. Rosenbush, N.M. Shakhovskoy, Yu.S. Efimov. In 1976-2005, the polarimetric observations of comets C/1976 V1 (West), 47P/Ashbrook-Jackson, 67P/Churyumov-Gerasimenko, C/1995 O1 (Hale-Bopp), C/1999 S4 (LINEAR), 2P/Encke, C/2002 T7 (LINEAR), C/2001 Q4 (NEAT), and 9P/Tempel 1 were carried out at the Crimean Astrophysical Observatory. The observations of comet West provided support for the discovery of negative polarization. Circular polarization was found with high accuracy in comets Hale-Bopp and S4 (LINEAR) and its distribution over the coma was investigated. The optical thickness of the Hale-Bopp dust coma was determined from the stellar occultation. The spectral dependence of negative polarization and polarization variations up to ~0.5% connected with the photometric activity of comet T7 (LINEAR) are also important results of these observations. The joint analysis of the aperture and imaging polarimetric observations of comet Encke allowed us to conclude that low polarization of gas-rich comets is an artifact caused by molecular emission transmitted through the continuum filters and/or low spatial resolution provided by the aperture polarimeter. The obtained results were used in some theoretical researches for an interpretation of cometary dust properties.

Ключевые слова: кометы, поляризация

1 Введение

Кометы – нестационарные и быстро эволюционирующие при сближении с Солнцем малые тела. Развитие газопылевых атмосфер и хвостов комет и вызывающие их физические процессы для каждой кометы уникальны и для большинства долгопериодических комет неповторимы. В большинстве случаев условия наблюдений комет и их низкая поверхностная яркость не позволяют получать фазовые и спектральные зависимости поляризации для каждой кометы в широком диапазоне фазовых углов и длин волн, доступных для наблюдений с Земли. Вместо индивидуальных фазовых и спектральных зависимостей поляризации приходится исследовать составные зависимости, полученные в результате наблюдений многих комет. Тем не менее такие зависимости дают возможность исследовать индивидуальные и общие характеристики рассеянного излучения комет, выделения классов или групп комет по физическим свойствам пыли, которые могут быть связаны с эволюцией и/или с местами происхождения комет.

К началу 70-х годов прошлого столетия многочисленные наблюдения комет позволили установить ряд закономерностей в поведении поляризации излучения комет. Они сводились к следующим основным положениям:

- степень поляризации излучения в молекулярных полосах и континууме зависит от фазового угла кометы. Максимальное различие наблюдается на больших фазовых углах;
- степень поляризации излучения в континууме увеличивается с увеличением длины волны;
- степень поляризации излучения в континууме уменьшается с увеличением измеряемой области комы;
- в локальных участках комы степень поляризации может значительно меняться как по величине, так и по направлению;
- для всей области комы плоскость поляризации излучения комет перпендикулярна плоскости рассеяния, что соответствует случаю положительной поляризации комет. Этот факт был надежно установлен для ряда комет, но только в диапазоне фазовых углов $30^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$.

Особенности поведения поляризации на фазовых углах около 0° и 180° не были известны. По аналогии с фазовой зависимостью поляризации молекулярных эмиссий (Эман, 1941), многие исследователи считали, что степень поляризации континуума также асимптотически будет стремиться к нулю с уменьшением фазового угла к 0° . Тем самым предполагалось, что плоскость поляризации интегрального излучения комет на всем диапазоне фазовых углов перпендикулярна плоскости рассеяния. Однако не было ни одного измерения поляризации комет на углах $\alpha < 30^\circ$, когда кометы, как правило, очень слабы и доступны для наблюдений только с большими телескопами (Добровольский и др., 1986).

Случай, когда $\alpha = 180^\circ$, реализуется при рассеянии излучения вперед. Такая возможность предоставляется во время покрытия звезды кометой. Из наблюдения покрытий можно определить оптическую толщину кометной комы и альбедо пыли, а также изучать механизмы выстраивания пылевых частиц. Прямое доказательство наличия в кометах ориентированных частиц может быть установлено сравнением параметров поляризованного излучения звезды, измеренных во время покрытия кометой и вне его (Розенбуш и др., 1994). Об ориентации несферических пылинок в атмосферах комет прямо свидетельствуют и результаты измерений круговой поляризации комет. К началу данной работы практически не были разработаны вопросы, связанные с круговой поляризацией излучения комет, как в наблюдательном, так и в теоретическом плане.

Решение этих и других вопросов физики комет было целью поляриметрических исследований комет в КрАО в 1976–2005 гг. Таблица 1 дает список наблюдавшихся комет, период наблюдений, диапазоны фазовых углов, гелио- и геоцентрических расстояний и количество ночей наблюдений.

Таблица 1. Поляриметрические наблюдения комет

Комета	Период наблюдений	α , град	r , AU	Δ , AU	n
C/1976 V1 (Вест)	30.06.1976	13.5	2.60	1.70	1
47P/Ашбрук-Джексон	27.09–01.10.1978	0.36–2.02	2.36	1.38	4
67P/Чурюмов-Герасименко	25–26.11.1982	27.3–27.7	1.32	0.38	2
C/1995 O1 (Хейл-Бопп)	09–11.03.1997	46	1.00	1.39	2
C/1999 S4 (LINEAR)	28.06–22.07.2000	60.9–122.1	0.77–0.93	0.37–1.08	8
2P/Энке	17–24.11.2003	80.8–105	0.88–1.00	0.26–0.28	5
C/2002 T7 (LINEAR)	21–25.11.2003	6.43–6.77	2.67	1.71	5
C/2001 Q4 (NEAT)	21–23.05.2004	73.0–79.5	0.96–0.98	0.53–0.66	3
9P/Темпель 1	02–03.07.2005	40.8–40.9	1.51	0.89	2

2 Наблюдения и результаты

Комета C/1976 V1 (Вест). Возможность получить данные о поляризации излучения комет на малых фазовых углах предоставила комета Веста. По наблюдениям Киселева и Черновой (1976) поляризация излучения этой кометы оказалась отрицательной. Так как измерения имели невысокую точность, то необходимо было проверить достоверность полученных результатов. Именно это и явилось главной целью наших наблюдений кометы Веста в КРАО.

Наблюдения кометы проведены с помощью поляриметра, установленного в кассегреневском фокусе 2.6-м телескопа им. ак. Г.А. Шайна (ЗТШ) 30 июня 1976 г. (Нарижная и др., 1977). Фазовый угол кометы составлял 13.5° . К этому времени комета распалась на четыре фрагмента. Результаты наблюдений показали, что плоскость поляризации излучения А, В и D фрагментов ядра кометы и межъядерной области комы почти совпадает с плоскостью рассеяния. Таким образом, стало очевидным, что на малых фазовых углах зависимость поляризации излучения комет от фазового угла имеет такую же ветвь отрицательной поляризации, как и у безатмосферных космических тел. Крымские наблюдения не только подтвердили факт существования отрицательной поляризации излучения кометы Веста, обнаруженной Киселевым и Черновой, но и впервые показали, что она не связана с рассеянием света на поверхности ядра кометы.

Комета 47P/Ашбрук-Джексон. Изучение отрицательной ветви поляризации излучения комет было продолжено в ходе специальной программы наблюдений кометы Ашбрука-Джексона. Эта комета дала возможность измерить поляризацию при очень редко встречающихся условиях, когда фазовый угол близок к 0° . Для сферических и неориентированных кометных пылинок степень поляризации на фазовом угле 0° должна равняться нулю. Для несферических ориентированных частиц вблизи нулевого фазового угла можно ожидать заметно не нулевую величину степени поляризации, причем плоскость поляризации может быть произвольной, в зависимости от ориентации пыли в коме. Это обстоятельство определило задачу наблюдений кометы Ашбрука-Джексона.

Наблюдения кометы проведены с поляриметром 2.6-м телескопа ЗТШ в период с 27 сентября по 1 октября 1978 г., когда фазовый угол кометы менялся в пределах $0.36 - 2.02^\circ$ (Киселев и др., 1996). Оказалось, что на фазовом угле 0.36° степень поляризации излучения кометы в полосах В($\lambda 4330/800 \text{ \AA}$), V($\lambda 5450/800 \text{ \AA}$), O($\lambda 6190/750 \text{ \AA}$) и R($\lambda 7440/1000 \text{ \AA}$) составляет $-0.31 \pm 0.26\%$, $0.09 \pm 0.21\%$, $0.18 \pm 0.18\%$ и $0.68 \pm 0.36\%$ соответственно. Несмотря на значительные ошибки, такая последовательность изменения степени поляризации с длиной волны может указывать на специфическое поведение поляризации кометы на очень малых фазовых углах, связанное со свойствами пылинок в комете. К сожалению, наблюдения на таких фазовых углах остаются до сих пор единственными.

На рис. 1 показана степень поляризации излучения кометы Ашбрука-Джексона на предельно малых фазовых углах. Там же для сравнения представлена фазовая зависимость поляризации

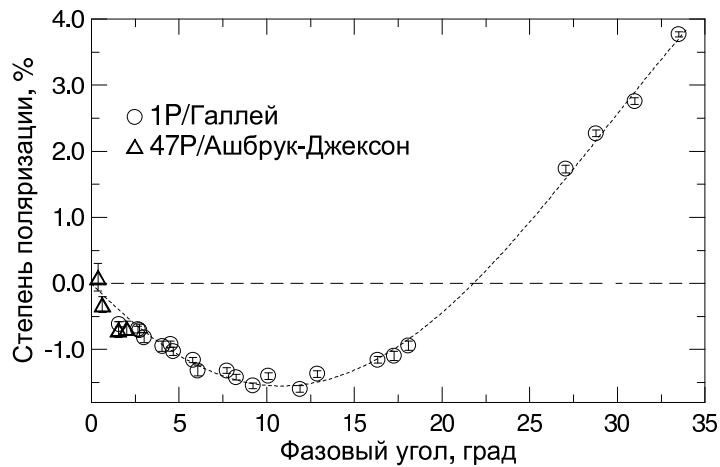


Рис. 1. Фазовая зависимость поляризации излучения комет Ашбрука-Джексона (треугольники) (Киселев и др., 1996) и Галлея (кружки) (Чернова и др., 1993) на малых фазовых углах. Штрих-пунктирная линия соответствует аппроксимации данных тригонометрическим выражением

излучения кометы Галлея (Чернова и др., 1993). Данные для кометы Галлея аппроксимированы с помощью тригонометрического выражения (Люмме, Муйнонен, 1993). Кометы Ашбрука-Джексона и Галлея показывают небольшую депрессию степени поляризации на фазовом угле $\sim 2^\circ$. Положение этой депрессии близко к положению вторичного минимума отрицательной поляризации, так называемого поляризационного оппозиционного эффекта (ПОЭ), характерного для таких высокоальбедных объектов как астероиды 44 Низа и 64 Ангелина и галилеевы спутники Юпитера (см. Розенбуш и др., настоящий том; Розенбуш и др., 2005; Розенбуш, Киселев, 2005; Мищенко и др., 2006), хотя ее амплитуда значительно меньше амплитуды ПОЭ для безатмосферных космических тел. Для уверенного заключения о существовании ПОЭ в кометах необходимы их дальнейшие наблюдения на фазовых углах $< 2^\circ$.

Комета 67P/Чурюмов-Герасименко. Длительное время большой проблемой фотометрических и поляриметрических наблюдений комет было отсутствие специальных фильтров, выделяющих полосы излучения молекулярных эмиссий и континуума. Из-за сложности кометных спектров традиционно используемые в звездной астрофизике широкополосные U-, B-, V- и R-фильтры пропускают излучение как континуума, так и молекулярных эмиссий. С появлением в 1982 г. специальных кометных фильтров появилась возможность проводить фотометрические и поляризационные измерения комет отдельно в эмиссиях и в континууме. Для поляризационных исследований такие фильтры впервые были использованы в КраО для наблюдений кометы Чурюмова-Герасименко. Наблюдения кометы были проведены с поляриметром 1.25-м телескопа и с фильтрами, выделяющими область синего континуума BC($\lambda 4845/65 \text{ \AA}$) и полосу излучения молекулы $C_2(\lambda 5140/90 \text{ \AA})$ на фазовом угле $\sim 27^\circ$ (Чернова и др., 1993). Эти данные дополнили немногочисленные в то время измерения степени поляризации в континууме и эмиссионной полосе молекулярного углерода.

Комета Хейла-Боппа. Исключительно высокий блеск кометы Хейла-Боппа (10 зв. вел. в момент ее открытия 23 июля 1995 г. на гелиоцентрическом расстоянии 7.1 а. е.) дал возможность всестороннего исследования этой уникальной кометы с приближением к Солнцу. Основными задачами исследований этой кометы в КраО стали:

- 1) определение оптической толщины пылевой комы (и ее пространственной и спектральной зависимостей) из фотометрических и поляриметрических наблюдений покрытия кометой звезды;

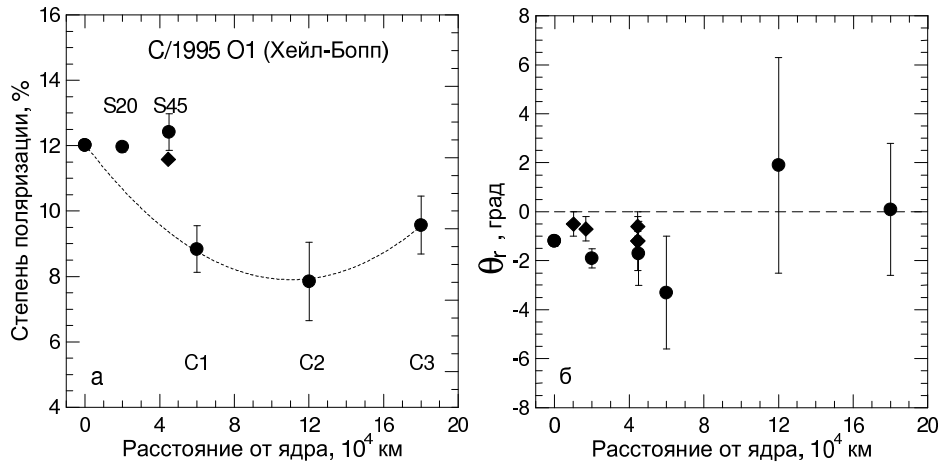


Рис. 2. Изменение степени поляризации (а) и отклонения плоскости поляризации от плоскости рассеяния (б) с расстоянием от ядра кометы Хейла-Боппа. Области комы, где измерялась поляризация, обозначены через С1, С2 и С3, а S20 и S45 - это области в оболочках комы, расположенные примерно перпендикулярно радиус-вектору кометы на расстояниях 20'' и 45'' соответственно

2) измерение круговой поляризации излучения кометы.

Измерения линейной и круговой поляризации кометы Хейла-Боппа проведены 9 и 11 марта 1997 г. с поляриметром, установленным на 2.6-м телескопе ЗТШ (Розенбуш и др. 1997). Одновременно с поляриметрическими наблюдениями кометы на ЗТШ, на 1.25-м телескопе АЗТ-11 проводились фотометрические наблюдения покрытия звезды кометой. Фазовый угол кометы был около 46° . Поляриметрические наблюдения выполнены с узкополосным фильтром ($\lambda 4845/10 \text{ \AA}$) и диафрагмой $10''$, соответствующей площадке комы примерно 10000 км .

Рисунок 2а показывает различия степени поляризации излучения кометы Хейла-Боппа в околоядерной области и на большом расстоянии от ядра. Области комы, где проходило покрытие звезды, обозначены через С1, С2 и С3, а области в оболочках на расстояниях $20''$ и $45''$ – через S20 и S45 соответственно. Степень поляризации по коме кометы Хейла-Боппа менялась от 7.8 % до 12.4 %, а степень поляризации в околоядерной области, $\sim 12\%$, оказалась примерно на 4 % выше, чем степень поляризации любой другой кометы на сопоставимом фазовом угле. Этот результат подтвержден в ряде работ, например, (Киселев, Величко, 1997). На рис. 2б показаны отклонения θ_r между перпендикуляром к плоскости поляризации и плоскостью рассеяния. Обращает внимание тот факт, что углы θ_r в околоядерной области и оболочках (на расстояниях менее $6 \times 10^4 \text{ км}$) систематически отличаются от нуля, примерно на $1-1.5^\circ$. Данные (Киселев, Величко, 1997), полученные из апертурной поляриметрии с разными фильтрами, а также данные ПЗС-поляриметрии (Йокерс и др. 1997) показывают такую же тенденцию. Полученные различия можно было бы объяснить точностью наблюдений, если бы мы через день (11 марта) не зарегистрировали циркулярно поляризованный свет в околоядерной области и оболочках. Все эти результаты могут свидетельствовать о присутствии в коме кометы ориентированных частиц.

Высокая степень поляризации излучения кометы вызвана особыми оптическими свойствами ее пылевых частиц. Рассеяние света на мелких и/или темных пылевых частицах может приводить к высокой степени поляризации (Дольфюс, 1989; Мукай и др., 1987). В соответствии с этим можно заключить, что атмосфера кометы Хейла-Боппа имела необычно высокое содержание мелких поглощающих пылинок по сравнению с другими кометами. Этот вывод подтвержден количественными оценками, сделанными на основе результатов ИК-наблюдений, согласно которым в атмосфере кометы преобладали пылевые частицы с радиусом $< 0.4 \text{ мкм}$ (Керола, Ларсон, 2001;

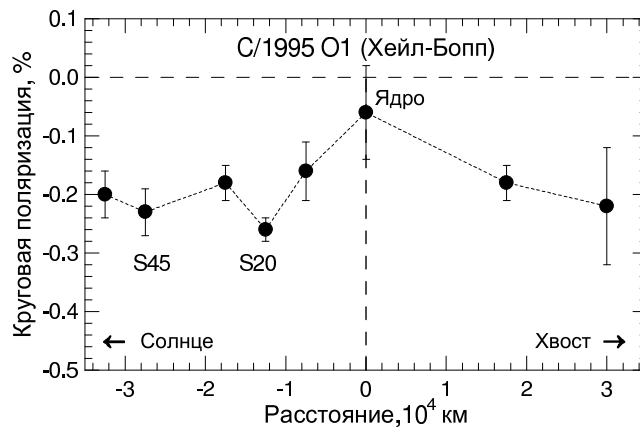


Рис. 3. Круговая поляризация излучения кометы Хейла-Боппа в разных участках комы

Мейсон и др., 2001). Комета Хейла-Боппа была самой запыленной кометой из всех известных комет.

Для кометы Хейла-Боппа впервые с высокой точностью была измерена круговая поляризация. Полученные результаты приведены на рис. 3, где показано изменение круговой поляризации в направлении на Солнце и хвост кометы. Максимальная степень круговой поляризации зарегистрирована в оболочках, $-0.26 \pm 0.02\%$, в то время как в околядерной области она составляет -0.08% (рис. 3). Зарегистрированы вариации (до 0.1%) круговой поляризации по коме. Для всех измеренных областей комы наблюдалась только левосторонняя поляризация.

Еще одно прямое доказательство присутствия в коме ориентированных частиц получено по изменению параметров поляризации во время покрытия кометой звезды 8^m HD 211005, которое наблюдалось на 2.6-м телескопе 9 марта 1997 г. Минимальное расстояние между звездой и фотометрическим ядром кометы составило около 10^5 км. Были сделаны пять поляриметрических и три фотометрических измерения покрываемой звезды. Те же самые области комы, но без звезды, были измерены с той же самой диафрагмой. Поляриметрия и фотометрия этой звезды вне затмения проведены в UVRI-фильтрах с фотометром-поляриметром 1.25-м телескопа в две последующие ночи. Во время покрытия кометой звезды суммарная интенсивность состоит из интенсивности света звезды, прошедшего через кому, и интенсивности рассеянного кометной атмосферой солнечного света. Если в коме кометы присутствуют ориентированные пылинки, то параметры поляризации излучения звезды, рассеянного вперед, изменятся, что приведет к изменению наблюдаемых параметров поляризации суммарного излучения. Параметры поляризации суммарного излучения были рассчитаны с учетом собственных параметров поляризации излучения звезды, поляризации излучения комы и относительных интенсивностей комы и звезды. Отношение интенсивностей комы и звезды зависит от оптической толщины атмосферы кометы. Расчеты показали, что наилучшее согласие вычисленных и наблюдаемых параметров поляризации суммарного излучения звезды и комы можно получить для оптической толщины атмосферы кометы $\tau = 0.3 \pm 0.1$ (Розенбуш и др., 1999). Вместе с тем степень поляризации для всех трех областей комы оказалась в среднем на 0.2% ниже по сравнению со степенью поляризации, измеренной во время покрытия. Таким образом, кометная пыль частично трансформировала поляризацию излучения звезды, что свидетельствует о выстроенности кометных пылинок.

Комета C/1999 S4 (LINEAR). Довольно высокая яркость и большой диапазон ожидаемых фазовых углов позволили поставить задачу получения фазовой зависимости круговой поляризации излучения кометы S4 (ЛИНЕАР) (Розенбуш и др., 2006а). Измерения круговой поляризации излучения кометы проведены на 2.6-м телескопе в течение 8 ночей с 28 июня по 22 июля 2000 г. Использовался широкополосный R-фильтр и диафрагма $15''$. Измерения проведены вдоль сечений

комы, проходящих через оптоцентр кометы, за исключением 28 июня, когда разрез проходил на расстоянии примерно в 1000 км от ядра. С этой целью диафрагма поляриметра помещалась в коме таким образом, чтобы за счет собственного движения ядро кометы проходило через центр диафрагмы. Элементарная экспозиция выбиралась с учетом собственной скорости кометы, от 5 до 10 с. В случае скорости кометы 0.145–0.155 уг. сек/с это позволяло получать до 30 точек в одном сечении комы длиной до 10000 км. Чтобы улучшить отношение сигнал/шум, мы получали от 10 до 38 сечений за ночь. Совмещение сечений контролировалось по профилям интенсивностей. Результаты обработки для средних сечений в каждую ночь представлены на рис. 4.

Во время наблюдений комета была в очень активном состоянии. От ядра кометы отделялись фрагменты, которые наблюдались как вторичные ядра, а около 20 июля ядро полностью развалилось (Киджер, 2000). Таким образом, мы имели возможность изучать физические процессы, происходящие в атмосфере распадающейся кометы. Полученные результаты позволяют заключить, что в комете S4 (ЛИНЕАР) изменения степени круговой поляризации по коме имели систематический ход. В отдельных областях комы величина поляризации достигала $\sim 1\%$, в то время как в околоядерной области комы большую часть времени она была близка к нулю. Вдоль сечений наблюдалась как лево-, так и правосторонняя круговая поляризация. Однако на солнечной стороне комы в основном преобладала левосторонняя поляризация. 28 июня, когда сечение не проходило через ядро, наблюдалась только правосторонняя поляризация. Непосредственно после полной дезинтеграции ядра кометы 21 июля была зарегистрирована только левосторонняя круговая поляризация.

До сих пор зависимость степени круговой поляризации от фазового угла была неизвестна. Зависимость усредненной за каждую ночь степени круговой поляризации излучения кометы S4 (LINEAR) от фазового угла не показала какой-либо закономерности. Однако усреднение данных отдельно для части комы в направлении на Солнце (рис. 5а) и в направлении на хвост (рис. 5б) дали очень интересные результаты. Очевидно, что данные для солнечной стороны комы показывают систематическое увеличение абсолютной величины степени круговой поляризации с фазовым углом. В то же время в хвосте наблюдается совершенно другое поведение круговой поляризации – прослеживается изменение поляризации со временем, т. е. с активностью кометы (рис. 5б).

Так как комета разрушалась, менялись ее видимый блеск, цвет, газо- и пылепродуктивность, то важно было исследовать возможные корреляции степени круговой поляризации. Сравнение степени круговой поляризации в хвостовой части комы с усредненным за ночь визуальным блеском кометы (см. Розенбуш и др., 2006а и ссылки там), который чувствителен к газо- и пылепродуктивности кометы, и продуктивностью воды (Мякинен и др., 2001; Бокели-Морван и др., 2001; Фарнхам и др., 2001) для нашего периода наблюдений показано на рис. 6. Как видно на рисунке, во время нашего периода наблюдений в комете произошло несколько больших вспышек с максимумами около 6–8, 16–18 и 22–23 июля. Эти вспышки коррелируют с увеличением скорости продуцирования воды (Мякинен и др., 2001). Между 18 и 23 июля визуальный блеск кометы увеличился на $\sim 1^m$, а скорость продуцирования H_2O увеличилась примерно в 10 раз (Бокели-Морван и др., 2001). В этот же период, а именно 22.8 июля, произошел полный развал ядра. Таким образом, существует корреляция между временем развала и увеличением яркости, то есть с активностью кометы, и скоростью продуцирования газа и пыли в коме. Казалось бы маловероятно ожидать сильную корреляцию между вариациями блеска кометы и степенью линейной поляризации, так как визуальный блеск зависит от интенсивности эмиссии C_2 и континуума. Тем не менее мы должны отметить, что существует довольно сильное соответствие между вариациями степени линейной поляризации и активностью кометы. Как показывает рис. 6, круговая поляризация практически повторяет ход линейной поляризации.

Комета 2P/Энке. Киселев (1981) и Добровольский и др. (1985, 1986) обратили внимание на то, что данные на фазовых углах 40–110° зависимости $P(\alpha)$ группируются в двух областях, которые можно описать двумя фазовыми кривыми. Одна кривая, с максимумом поляризации ~ 20 –25 %, характерна для комет, богатых пылевой компонентой. Вторая кривая, с максимумом поляризации ~ 8 –10 %, представлена кометами, излучающими в основном в молекулярных полосах. Исползованные данные были получены в основном в широкополосных фильтрах,

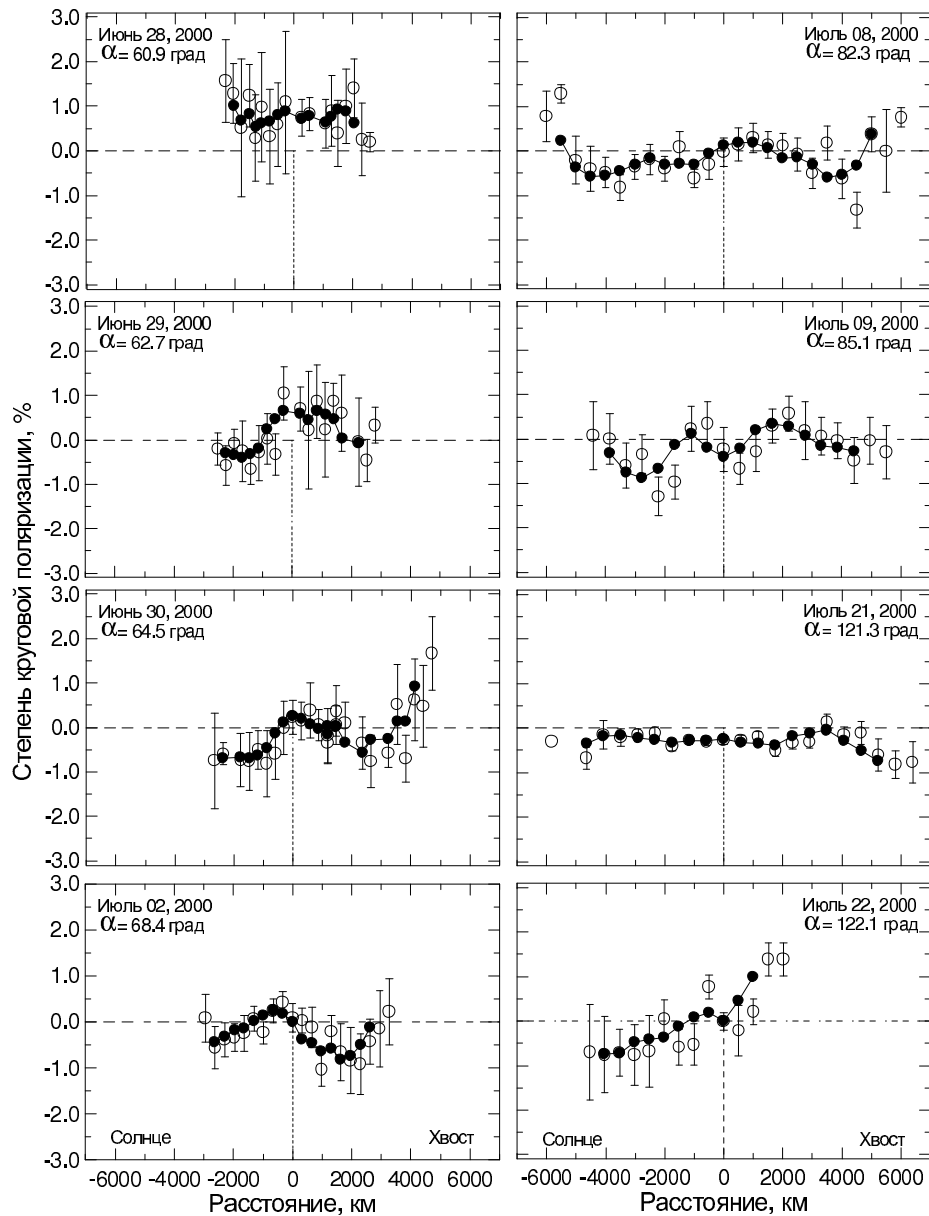


Рис. 4. Вариации степени круговой поляризации вдоль сечения через ядро и кому кометы S4 (LINEAR) 28 июня – 22 июля 2000 г. Сплошные кружки обозначают сглаженные методом скользящего среднего данные на отрезке ~ 1000 км. Позиционный угол сечений $PA \approx 40^\circ$ для 28 июня – 2 июля, $PA \approx 55^\circ$ для 8–9 июля и $PA \approx 151^\circ$ для 21–22 июля

пропускающих излучение комет, рассеянное на пыли и газе. Поэтому деление комет на две группы интерпретировалось авторами отмеченных выше работ как результат проявления двух механизмов возникновения поляризованного излучения комет – рассеяния света на пылевых частицах и резонансной флуоресценции для молекул.

Впоследствии наблюдения комет с узкополосными фильтрами подтвердили различие в поляризации излучения комет с низким и высоким уровнем непрерывного спектра, так называемых

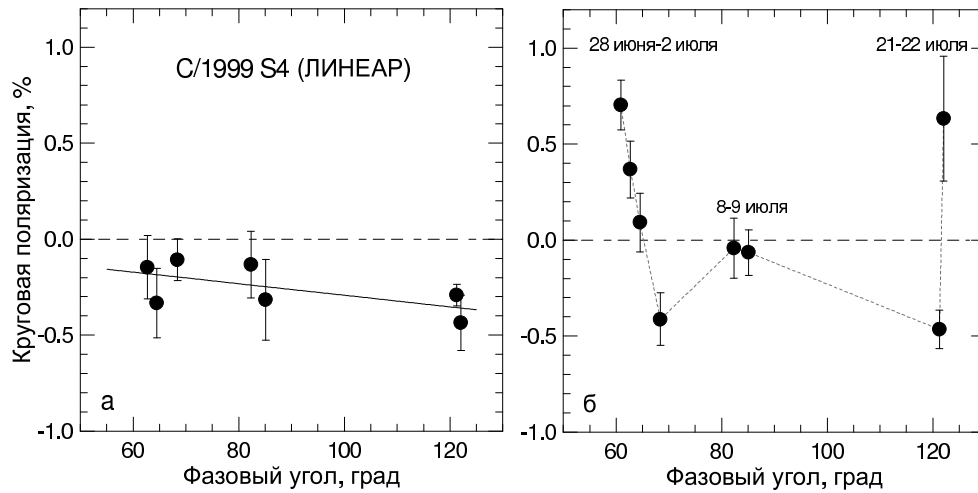


Рис. 5. Вариации степени круговой поляризации излучения кометы S4 (LINEAR) с фазовым углом. а – данные, относящиеся к солнечной части комы; б – данные, относящиеся к хвостовой части комы

газовых и пылевых комет соответственно, на больших фазовых углах. Были предложены три объяснения этому наблюдательному факту. Перин и Лами (1987) считали, что каждая комета имеет собственное поведение поляризации. Чернова и др. (1993) допускали возможность реального различия поляризации излучения газовых и пылевых комет. Вместе с тем они указывали на значительное понижение степени поляризации излучения газовых комет из-за пропускания фильтрами излучения молекул. Левассер-Рего и др. (1996) интерпретировали различия в поляризации на больших фазовых углах разными физическими свойствами (размер, состав, строение и т. д.) пылевых частиц в двух группах комет. В работе (Киселев и др., 2001) было показано, что низкая степень поляризации газовых комет обусловлена пропусканием излучения молекул даже узкополосными фильтрами, предназначенными для выделения кометного континуума. Вторым не менее важным фактором, влияющим на степень поляризации, связан с размером измеряемой области комы. Например, степень поляризации излучения газовых комет Табура (Киселев и др., 2001) и ИРАС-Араки-Алкока (Кикучи, 1983) в околоядерной области комы оказались такими же высокими, как и степень поляризации излучения пылевых комет. Таким образом, низкое пространственное разрешение апертурной поляриметрии могло быть одной из причин наблюдаемого различия в поляризации двух групп комет. Чтобы доказать влияние спектрального и пространственного разрешения на поляризацию рассеянного излучения газовых комет, необходимо было провести наблюдения такой кометы на больших фазовых углах. Для этой цели была разработана кооперативная программа апертурной (КраО) и поверхностной поляриметрии с использованием ПЗС-матрицы (2-м телескоп обсерватории Рожен, Болгария) наиболее подходящей для этой цели кометы Энке (Йокерс и др., 2005).

Апертурные поляриметрические наблюдения кометы Энке проводились 17–24 ноября 2003 г. одновременно на телескопах 2.6-м ЗТШ и 1.25-м АЗТ-11. Несмотря на высокую интегральную яркость кометы в видимой области (~ 7 зв. вел.), комету было трудно наблюдать, так как она имела низкую поверхностную яркость в континууме и из-за близости к Земле быстро двигалась. Поэтому на ЗТШ были использованы широкополосный фильтр R и диафрагма $15''$, соответствующая с учетом перемещения кометы области комы $\sim 3000 \times 4500 \text{ км}^2$. Наблюдения кометы на 1.25-м телескопе выполнены с диафрагмой $33''$ ($\sim \pi \times 5900 \text{ км}^2$) в стандартных UVRI-полосах. Обычно используемый на этом телескопе фотополяриметр не приспособлен для измерений протяженных объектов подобных кометам из-за наложения изображений, получаемых в обыкновенных и необыкновенных лучах. Для исключения этого за кальцитовый пластинкой был

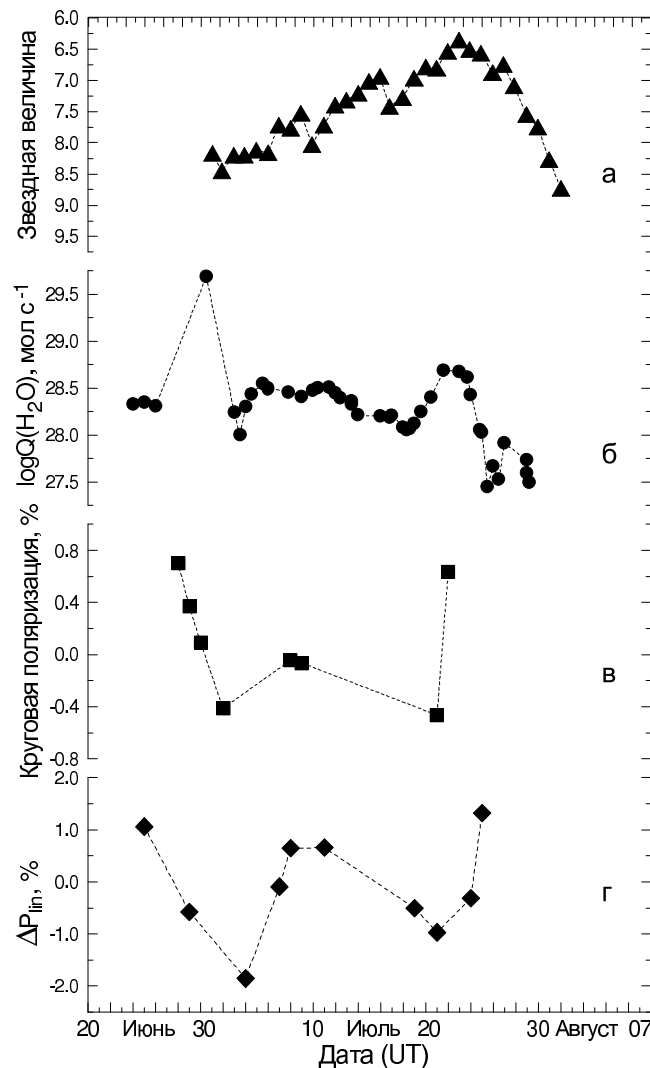


Рис. 6. Сравнение блеска (а), скорости продуцирования воды (б), степени круговой поляризации (в) и линейной поляризации (отклонение наблюдаемой линейной поляризации от аппроксимирующей кривой) (г) для кометы S4 (LINEAR) во время ее окончательного распада в июле 2000г.

поставлен дополнительный поляриод, ориентированный таким образом, чтобы погасить одну из двух поляризованных компонент.

Как и следовало ожидать, степень поляризации, измеренная в больших площадках комы, была $\sim 8\text{--}10\%$, что соответствует газовым кометам. Одновременные ПЗС-наблюдения показали высокую степень поляризации $\sim 25\%$ в околоядерной области комы, размером $\sim 580 \times 580 \text{ км}^2$. В обоих случаях измерения выполнены в широкополосных R-фильтрах. Степень поляризации, измеренная в этих же площадках, но с узкополосными фильтрами, после учета вклада молекулярной эмиссии NH_2 была еще выше, $\sim 35\%$. Сопоставление результатов обработки поляризационных изображений и апертурной поляриметрии показали, что пылевая кома кометы сосредоточена практически около ядра кометы на расстоянии менее 1000 км. Форма пылевой комы была симметричная, то есть “фен” кометы (веерообразный выброс из ядра) в основном состоит из газовых молекул с очень

незначительной добавкой пыли. Таким образом, впервые надежно показано, что деление комет на две группы по степени поляризации на больших фазовых углах является артефактом, вызванным низким пространственным и спектральным разрешением аппаратуры, используемой для апертурных поляриметрических наблюдений. Зависимость степени поляризации газовых комет от измеряемой площадки комы в значительной степени обусловлена тем, что газовые комы этих комет являются более протяженными по сравнению с пылевыми комами. Анализ наблюдательных данных и обсуждение вопроса о разных физических свойствах пыли в двух группах комет рассмотрены в работе (Колоколова и др., 2006).

Комета C/2002 T7 (LINEAR). Спектральная зависимость поляризации кометного континуума является одной из важнейших характеристик кометной пыли. Известно, что на фазовых углах $40\text{--}90^\circ$ степень поляризации комет увеличивается с увеличением длины волны. Исключением является комета 21P/Джакобини-Циннер, у которой обнаружена аномальная спектральная зависимость поляризации, а именно, степень поляризации в синей области спектра была выше, чем в красной области (Киселев и др., 2000). Известно также, что наклон спектральной зависимости поляризации ($\Delta P/\Delta\lambda$) излучения комет уменьшается с уменьшением фазового угла. Однако данные о спектральной зависимости поляризации излучения отдельных комет на малых фазовых углах очень скудны и даже противоречивы (Йокерс и Киселев, 2002). С целью исследования спектральной зависимости поляризации мы провели поляриметрические наблюдения кометы T7 (LINEAR).

Измерения линейной поляризации излучения кометы были выполнены с узкополосным ($\lambda 5260/56 \text{ \AA}$) и широкополосным WRC ($\lambda 7228/1142 \text{ \AA}$) фильтрами на одноканальном поляриметре 2.6-м телескопа и пятицветном UBVR-I-поляриметре 1.25-м телескопа АЗТ-11 в течение пяти ночей (21–25 ноября 2003 г.) (Розенбуш и др., 2006). Фазовый угол кометы менялся в пределах $6.4\text{--}6.8^\circ$. На 2.6-м телескопе использовалась диафрагма размером $15''$, а на 1.25-м телескопе – диафрагмы $10''$ и $30''$.

Спектры кометы T7 (LINEAR), полученные 17 и 25 ноября 2003 г. на 2.6-м телескопе в диапазоне $\lambda 3600\text{--}7700 \text{ \AA}$ (наблюдатели С.Г. Сергеев, В.К. Розенбуш, В.П. Тарашук и В.И. Проник), показали сильный континуум, яркие эмиссии CN(0,0) и CN(0,1), средней интенсивности полосы C₂ Свана и эмиссию C₃ на пределе видимости. Сильный континуум по отношению к излучению в молекулярных полосах позволяет пренебречь вкладом возможных эмиссий (NH₂, H₂O⁺ и др.) в красной области спектра (фильтры WRC, R и I) и предположить, что измеренная в этих фильтрах поляризация обусловлена рассеянием света на кометной пыли.

На рис. 7 представлены спектральные зависимости степени поляризации излучения кометы T7 (LINEAR). В пределах ошибок измерений 22 и 23 ноября зависимость поляризации излучения кометы T7 (LINEAR) от длины волны отсутствует, тогда как 21 и особенно 24 ноября вариации степени поляризации с длиной волны превышают ошибки измерений. Однако средняя спектральная зависимость за весь наблюдаемый период остается практически плоской.

Согласно современным представлениям, кометные пылинки являются агрегатами большого числа мономеров. Теоретические расчеты (Ксинг, Ханнер, 1997; Люмме, Рахола, 1994; Люмме и др., 1997; Петрова и др., 2001; Петрова и др., 2004) свидетельствуют, что именно агрегатная структура кометной пыли является основной причиной возникновения отрицательной поляризации излучения комет. Причем отрицательная ветвь поляризации появляется, если безразмерные параметры мономеров ($x = 2\pi r_0/\lambda$, где r_0 есть радиус частицы) становятся ≥ 1.5 . С одной стороны, с увеличением длины волны безразмерный параметр частиц уменьшается. Поэтому следует ожидать, что глубина отрицательной ветви поляризации комет будет также уменьшаться с переходом в красную область спектра. С другой стороны, спектральный ход поляризации определяется не только соотношением размера частиц и длины волны, но и собственной зависимостью мнимого и действительного коэффициентов показателя преломления кометных пылинок от длины волны. Например, если с увеличением длины волны частички становятся более прозрачными, что справедливо для большинства веществ, то глубина отрицательной ветви поляризации комет должна увеличиваться. Это соответствует средним фазовым зависимостям поляризации излучения комет, полученным в синей и красной областях континуума (Киселев, 2003). Однако найденные различия минимальной степени поляризации континуума в синей ($P_{min} =$

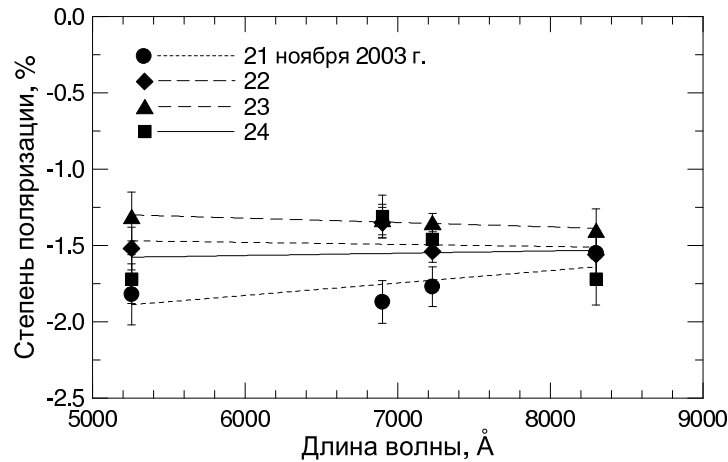


Рис. 7. Спектральная зависимость степени поляризации излучения кометы Т7 (LINEAR)

–1.42%) и красной ($P_{min} = -1.50\%$) областях спектра находятся в пределах ошибок их определения 0.1%. Таким образом, данные для кометы Т7 (LINEAR) подтверждают очень слабую спектральную зависимость поляризации излучения комет на малых фазовых углах. Это может быть результатом компенсации противоположного спектрального хода поляризации, обусловленного разными физическими причинами, о которых мы упомянули выше.

Поляриметрические наблюдения в области малых фазовых углов, т. е. на больших гелиоцентрических расстояниях, все еще остаются довольно редкими. Поэтому анализ поведения поляризации кометы Т7 (LINEAR) на расстояниях около 3 а. е. представляет особую ценность. Рисунок 8а показывает изменение степени поляризации излучения кометы в очень узком диапазоне фазовых углов — примерно от 6.4° до 6.8° . Так как зависимость поляризации от длины волны практически отсутствует, то степень поляризации, измеренная в фильтрах R и I, была усреднена. Имеется хорошее согласие данных, полученных на двух телескопах и в разных фильтрах. Однако наблюдается очень резкое (приблизительно на 0.5%) увеличение степени поляризации 21–23 ноября, а затем происходит плавный спад. В период наблюдений фазовый угол кометы менялся немонокотонно: с 21.9 до 22.9 ноября он уменьшался с 6.46° до 6.43° , а затем стал увеличиваться. В таком узком диапазоне фазовых углов изменение степени поляризации излучения кометы должно быть незначительным. На рис. 8б показано изменение поляризации на временном интервале 21–25 ноября 2003 г., которое, вероятно, отражает реальные временные вариации степени поляризации, связанные с нестационарными процессами в атмосфере кометы. Параметры орбиты кометы Т7 (LINEAR), такие как $1/a = 0.000051$ а. е.⁻¹, эксцентриситет $e = 1.0005$ и наклон $i = 160.6^\circ$ (Marsden, 2003), позволяют отнести ее к классу динамически новых комет, впервые пришедших во внутренние части Солнечной системы. Кометы этой группы, как правило, показывают высокую фотометрическую активность. Действительно, кривая блеска кометы, построенная Филоненко (частное сообщение) по данным International Comet Quarterly, показывает значительные и очень быстрые колебания блеска как до, так и после перигелия. Пилообразные колебания интегрального блеска характерны для этой кометы как до, так и после перигелия и могут быть связаны как с активностью кометы, так и с вращением ядра (Розенбуш и др., 2006б). Особенно активной комета была в ноябре–декабре, несмотря на то, что она находилась на расстоянии от Солнца большем чем 2 а. е. Вспышки доходили до 1.5 зв. вел., например, 7–9 декабря 2003 г. Таким образом, на основании имеющихся данных можно заключить, что резкие колебания поляризации, зарегистрированные нами 21–25 ноября, вызваны, по-видимому, изменением физических свойств пыли, выброшенной из ядра во время активности кометы.

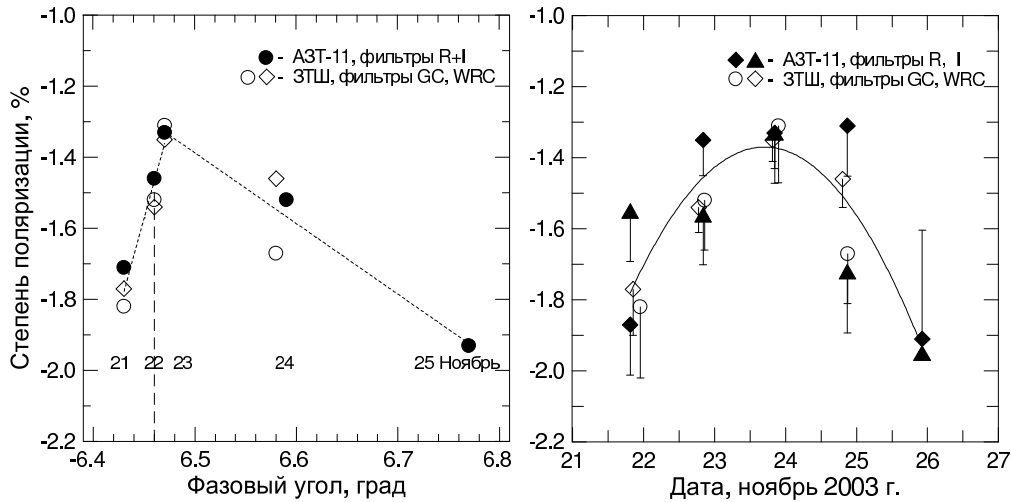


Рис. 8. Изменение степени поляризации излучения кометы Т7 (LINEAR) на небольшом интервале фазовых углов (а) и времени (б). Заполненные значки представляют среднюю степень поляризации в фильтрах R и I, измеренной на телескопе АЗТ-11, а открытые – данные в фильтрах GC и WRC, полученные на телескопе ЗТШ. Внизу указаны даты наблюдений

Комета 9P/Темпель 1. Обычно наземные наблюдения комет позволяют получать данные о газовой и пылевой компонентах их атмосфер и, следовательно, практически только косвенно исследовать свойства поверхности ядер. Вещество поверхности кометных ядер долгое время подвергается воздействию солнечного и космического излучения. В результате свойства поверхностных слоев трансформируются. Эпизодическая возможность изучения свойств реликтового вещества Солнечной системы, содержащегося внутри кометных ядер, может быть реализована во время наблюдений частичной или полной дезинтеграции их ядер.

13 января 2005 г. к периодической комете Темпеля 1 был запущен космический аппарат. Основная цель миссии “DEEP IMPACT” заключалась в получении данных о свойствах вещества внутренних слоев ядра кометы. Для этого 4 июля 2005 г. из КА был сброшен зонд. В результате столкновения зонда с ядром кометы образовался искусственный кратер, и произошел выброс “свежей” материи. Важная роль в осуществлении этого эксперимента отводилась наземным наблюдениям, которые проводили мониторинг кометы до и после столкновения зонда с кометой. В связи с этим 2–3 июля 2005 г. на 2.6-м телескопе КраО были проведены поляриметрические наблюдения кометы Темпеля 1 с целью выявления возможных изменений поляриметрических свойств пыли, вызванных выбросом в атмосферу “свежих” пылинок. Комета наблюдалась в фильтре R и с диафрагмой 15". Результаты наблюдений показывают, что степень поляризации излучения кометы Темпеля 1 ($5.5 \pm 0.5\%$) была несколько ниже типичной степени поляризации других пылевых комет ($\sim 7\%$) на фазовых углах $\sim 40^\circ$. К сожалению, из-за отсутствия погоды получить данные о степени поляризации излучения кометы после столкновения с зондом не удалось. Однако результаты наших наблюдений дополняют сведения о комете и могут быть использованы для сравнения с результатами других авторов, полученных как до, так и после столкновения ядра кометы с зондом.

3 Заключение

Исследования линейной и круговой поляризации излучения комет в Крымской астрофизической обсерватории внесли существенный вклад в понимание процессов рассеяния на кометных пылинках.

Обнаружены новые свойства и закономерности поляризованного излучения комет: отрицательная поляризация, пространственное распределение круговой поляризации, фазовая зависимость круговой поляризации, прямые и косвенные свидетельства несферических ориентированных пылевых частиц в кометных атмосферах.

Благодарности. Авторы благодарны сотрудникам КрАО Д.Н. Шаховскому, К.А. Антониюку и сотруднику Одесской астрономической обсерватории С. Колесникову за помощь в подготовке аппаратуры и наблюдениях. Мы также благодарны дирекции КрАО и лично Р.Е. Гершбергу, С.И. Плачинде, В.П. Тарашук, В.В. Румянцеву и Е.П. Павленко за помощь в выделении наблюдательного времени на 2.6-м и 1.25-м телескопах.

Литература

- Бокели-Морван (Bockelee-Morvan D., and 11 colleagues) // *Science*. 2001. V. 292. 1339.
- Добровольский О.В., Киселев Н.Н., Чернова Г.П. // Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел / Ред. Мороженко А.В.: Наук. думка. 1985. С. 3.
- Добровольский и др. (Dobrovolyky O., Kiselev N., Chernova G.) // *Earth, Moon, and Planets*. 1986. V. 34. P. 189.
- Дольфюс (Dollfus A.) // *Astron. Astrophys.* 1989. V. 213. P. 469.
- Йокерс и др. (Jockers K., Rosenbush V.K., Bonev T., Credner T.) // *Earth, Moon, and Planets*. 1997. V. 78. №. 1-3. P. 373.
- Йокерс и Киселев (Jockers K., Kiselev N.N.) // *Proceedings of Asteroids, Comets, Meteors (ACM 2002)*. / Ed. Warmbein B. Berlin: Berlin Technical University Berlin. ESA SP-500. 2002. P. 567.
- Йокерс и др. (Jockers K., Kiselev N., Bonev T., Rosenbush V., Shakhovskoy N., Kolesnikov S., Efimov Yu, Shakhovskoy D., Antonyuk K.) // *Astron. Astrophys.* 2005. V. 441. P. 773.
- Керола, Ларсон (Kerola D.X., Larson S.M.) // *Icarus*. 2001. V. 149. P. 351.
- Киджер (Kidger M.) // *Circ. IAU*. 2000. № 7467.
- Кикучи (Kikuchi S.) // *Proc. 16th Lunar and Planetary Symp. Inst. Science and Aeronautical Science.* / 1983. V. 16. P. 36.
- Киселев Н.Н. // Дис. ...канд. физ.-мат. наук. Душанбе. 1981.
- Киселев Н.Н. // Дис. ...докт. физ.-мат. наук. Харьков. 2003.
- Киселев Н.Н., Чернова Г.П. // *Астрон. циркуляр*. 1976. №. 931. С. 5.
- Киселев, Величко (Kiselev N.N., Velichko F.P.) // *Earth, Moon, and Planets*. 1997. V. 78. №. 1-3. P. 347.
- Киселев и др. (Kiselev N.N., Shakhovskoy N.M., Efimov Yu.S.) // *Icarus*. 1996. V. 120. P. 408.
- Киселев и др. (Kiselev N., Jockers K., Rosenbush K.) // *Earth, Moon, and Planets*. 2000. V. 82-83. P. 141.
- Киселев Н.Н., Йокерс К., Розенбуш В.К., Корсун П.П. // *Астрон. вестн.* 2001. Т. 35. №. 6. С. 531.
- Колоколова и др. (Kolokolova L., Kimura H., Kiselev N., Rosenbush V.) // *Astron. Astrophys.* 2006. (in press).
- Ксинг, Ханнер (Xing Z., Hanner M.) // *Astron. Astrophys.* 1997. V. 324. P. 805.
- Левассер-Рего и др. (Levasseur-Regourd A.-C., Hadamcik E., Renard J.B.) // *Astron. Astrophys.* 1996. V. 313. P. 327.
- Люмме, Муйнонен (Lumme K., Muinonen K.) // *Asteroids, Comets, Meteors. IAU Symp. №. 160.* / Houston (USA): LPI 810. 1993. P. 194.
- Люмме, Рахола (Lumme K., Rahola J.) // *Astrophys. J.* 1994. V. 425. P. 653.
- Люмме и др. (Lumme K., Rahola J., Havenier J.) // *Icarus*. 1997. V. 126. P. 455.
- Макинен и др. (Mäkinen J.T., Bertaux J.-L., Combi M.R., Quemerais, E.) // *Science*. 2001. V. 292. P. 1326.
- Марсден (Marsden B.G.) // *Minor Planet Electronic Circ.* 2003. 2003-R06.
- Мейсон и др. (Mason C.G., Gehrz R.D., Jones T.J., et al.) // *Astrophys. J.* 2001. V. 549. P. 635.
- Мищенко и др. (Mishenko M.I., Rosenbush V.K., Kiselev N.N.) // *Appl. Optics*. 2006. (in press).
- Мукай и др. (Mukai T., Mukai S., Kikuchi S.) // *Astron. Astrophys.* 1987. V. 187. P. 650.

- Нарижная Н.В., Шаховской Н.М., Ефимов Ю.С. // Астрон. циркуляр. 1977. №. 963. С. 1.
- Перин, Лами (Perin J.M., Lamy P.L.) // Diversity and similarity of comets / Eds: Rolfe E.J., Battrock V. Brussels: ESA SP-278. 1987. P. 411.
- Петрова Е.В., Йокерс К., Киселев Н.Н. // Астрон. вестн. 2001. Т.35. №. 1. С. 63.
- Петрова Е., Тишковец В., Йокерс К. // Астрон. вестн. 2004. Т. 38. №. 1. С. 1.
- Розенбуш и Киселев (Rosenbush V., Kiselev N.) // Icarus. 2005. V. 179. P. 490.
- Розенбуш и др. (Rosenbush V.K., Rosenbush A.E., Dement'ev M.S.) // Icarus. 1994. V. 108. P. 81.
- Розенбуш и др. (Rosenbush V.K., Shakhovskoj N.M., Rosenbush A.E.) // Earth, Moon, and Planets. 1997. V. 78. №. 1-3. P. 381.
- Розенбуш и др. (Розенбуш В.К., Шаховской Н.Н., Розенбуш А.Э.) // Астрон. вестн. 1999. Т. 33. №. 6. С. 567-576.
- Розенбуш и др. (Rosenbush V., Kiselev N., Shevchenko V., Jockers K., Shakhovskoy N., Efimov Yu.) // Icarus. 2005. V. 178. P. 222.
- Розенбуш и др. (Rosenbush V., Kolokolova L., Lazarian A., Shakhovskoy N., Kiselev N.) // Icarus. 2006a. (in press).
- Розенбуш В.К., Величко Ф.П., Киселев Н.Н., Величко С.Ф., Шаховской Н.М., Ефимов Ю.С., Антонюк К.А., Колесников С.В., Шаховской Д.Н. // Астрон. вестн. 2006б. (в печати).
- Фарнхам и др. (Farnham T., Schleicher D., Woodney L., Birch P., Eberhardy C., Levy L.) // Science. 2001. V. 292. P. 1348.
- Чернова и др. (Chernova G.P., Kiselev N.N., Jockers K.) // Icarus. 1993. V. 103. №. 1. P. 144.
- Эман (Ohman Y.) // Stockholm Obs. Ann. 1941. V. 13. №. 11. P. 3.