

УДК 520.85

Дифференциальная поляриметрия протяженных астрономических объектов

И.А. Маслов^{1,2}, С.В. Крutchков³, И.В. Николенко⁴, В.А. Муницын¹, О.С. Угольников¹

¹ ФГБУН “Институт космических исследований РАН”, ул. Профсоюзная 84/32, Москва, Россия, 117997
imaslov@iki.rssi.ru

² Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Университетский проспект 13, Москва, Россия, 119991
iam49@yandex.ru

³ ФГБУН “Институт астрономии РАН”, ул. Пятницкая 48, Москва, Россия, 119017
skruch@inasan.ru

⁴ НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, Научный, 298409
niki63@yandex.ua

Поступила в редакцию 1 ноября 2014 г.

Аннотация. Разработан и изготовлен широкоугольный поляриметр на область спектра 400–700 нм, предназначенный для исследования распределения линейной поляризации в протяженных источниках (галактиках, отражательных туманностях, кометах). Проведены наблюдения на телескопе “Цейсс-1000” (п. Симеиз, Крым). Предложена методика определения дифференциальных параметров линейной поляризации, основанная на выравнивании средних значений и средних квадратичных отклонений яркости в кадрах, снятых при различных атмосферных условиях. Кроме того, в качестве параметра, описывающего поляризацию наблюдаемого объекта, предложено использовать коэффициент корреляции между яркостным и поляризационным сигналами в разных частях объекта.

DIFFERENTIAL POLARIMETRY OF EXTENDED ASTRONOMICAL OBJECTS, *by I.A. Maslov, S.V. Kruchkov, I.V. Nikolenko, V.A. Munitsyn, O.S. Ugolnikov.* The wide-angle polarimeter for the range of 400–700 nm is developed for studying the distribution of the linear polarization in extended sources (galaxies, reflection nebulae, comets). Observations were carried out with the telescope Zeiss-1000 (Simeiz, Crimea). The technique for defining differential parameters of linear polarization is proposed based on the alignment of mean values and mean square deviations of brightness in the frames taken under various atmospheric conditions. It is proposed to use the correlation coefficient between brightness and polarization signals as the parameter describing the polarization of the observed object.

Ключевые слова: поляриметр, галактики, кометы, методика измерений

1 Введение

При наблюдении протяженных астрономических объектов, например галактик, и исследовании поляризации их излучения возникают проблемы, делающие невозможным использование методов, применяемых при поляриметрии звезд и других “точечных” источников. Главные из этих проблем:

- 1) поверхностная яркость галактик сравнима с фоном неба;
- 2) во многих случаях изображение галактики имеет размер, сравнимый или больший, чем поле зрения прибора, что не позволяет одновременно измерять галактику и фон за ее пределами;
- 3) для получения значимого сигнала требуются большие экспозиции;
- 4) излучение галактик имеет малую величину поляризации.

Обычная ситуация состоит в том, что для исследуемого объекта изображения с различными направлениями оси поляроида-анализатора получены при существенно разных уровнях фона и пропускания атмосферы. В этом случае имеет смысл отказаться от измерения абсолютного значения поляризации и искать параметры, описывающие дифференциальные поляризационные характеристики, используя неравномерность распределения яркости по объекту.

2 Аппаратура, телескоп и наблюдения

Для проведения наблюдений нами был разработан поляриметр (рис. 1а) с вращающимся поляроидом-анализатором, работающим в спектральной области 400–700 нм (ниже приводятся результаты, полученные с узкополосным светофильтром 512 нм). В качестве фотоприемного устройства использовалась камера ST-6 (242 × 375 элементов, 6 × 8 мм) фирмы Santa Barbara Instrument Group. Наблюдения проводились на телескопе “Цейсс-1000” в п. Симеиз (Крым). Оптика обеспечивала уменьшение эквивалентного фокусного расстояния до 1.5 м.

Телескоп “Цейсс-1000” представляет собой оптическую систему Ричи – Кретьена – кудэ с диаметром зеркала 1016 мм и фокусным расстоянием 13.3 м. Он смонтирован на английской монтировке, оснащенной приводами, позволяющими вращать телескоп по часовому углу и склонению с четырьмя дискретными скоростями, от 1 угл. мин/мин до 120 градусов/мин. Движение телескопа вокруг часовой оси и оси склонения осуществляется прецизионным механизмом, обеспечивающим вращательное движение без мертвого хода. Отдельный двигатель используется для часового ведения. С главными червяками приводов часовой оси и оси склонения связаны 24-разрядные абсолютные угловые датчики. Разрядность датчика – 25 бит, что позволяет вводить координаты в компьютер с точностью не хуже 1 угл. сек. (реальная точность позиционирования ниже из-за механических характеристик телескопа). Система управления базировалась на специализированной ЭВМ “Vilati” (Венгрия). В 2000 году она была заменена на новую, разработанную в Институте астрономии РАН. В настоящее время система управления телескопом “Цейсс-1000” включает в себя релейный шкаф от “Vilati”, персональный компьютер с блоком интерфейсных плат и комплекс управляющих программ. Для синхронизации времени используется GPS-приемник Trimble Lassen. Для управления телескопом написана программа на языке Delphi. Программа работает под Windows 9X, 2000, XP и имеет удобный пользовательский интерфейс. Система управления постоянно улучшается и в настоящее время превосходит по своим сервисным возможностям старую оригинальную систему. В частности, реализованы ведение журнала наблюдений с фиксацией времени и координат телескопа в файл, автоматическое позиционирование телескопа по координатам, ведение объекта по эфемериде (из файла). Купол движется синхронно с телескопом. Все это позволяет автоматически вести съемку интересующего объекта в течение нескольких часов.

Обычно за одну ночь мы получали несколько десятков изображений с экспозициями 60–600 с при разных положениях поляроида-анализатора или поворота прибора по позиционному углу (рис. 1б).

3 Обработка наблюдений

Первая часть обработки снимков была традиционной – учет “плоского поля” и астрометрическая привязка. После этого мы приводили все снимки к единой сетке на небесной сфере, используя метод, применявшийся в эксперименте COBE/DIRBE (Хаусер и др., 1998), в котором небесная сфера разбивается на $6 \times 4^{r-1}$ ячеек, где r – выбранное разрешение. В нашем случае при $r = 15$ размер ячеек составлял примерно 20 угл. сек. и в такую ячейку попадало около 45 пикселей снимка (рис. 1б). Для

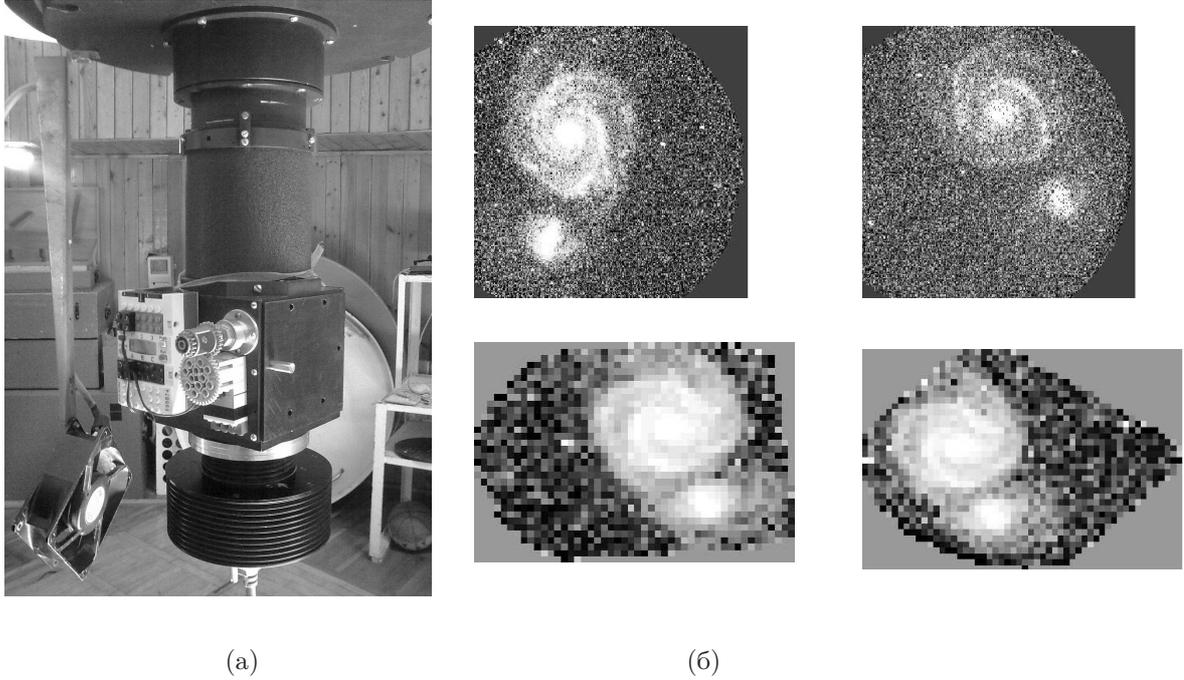


Рис. 1. (а) Поляриметр на телескопе “Цейсс-1000”. (б) Вверху: изображения галактики М 51, полученные с экспозициями 300 секунд, правый снимок сделан при повороте прибора по позиционному углу на 45 градусов, а условия наблюдения ухудшились; внизу: те же снимки, приведенные к единой сетке

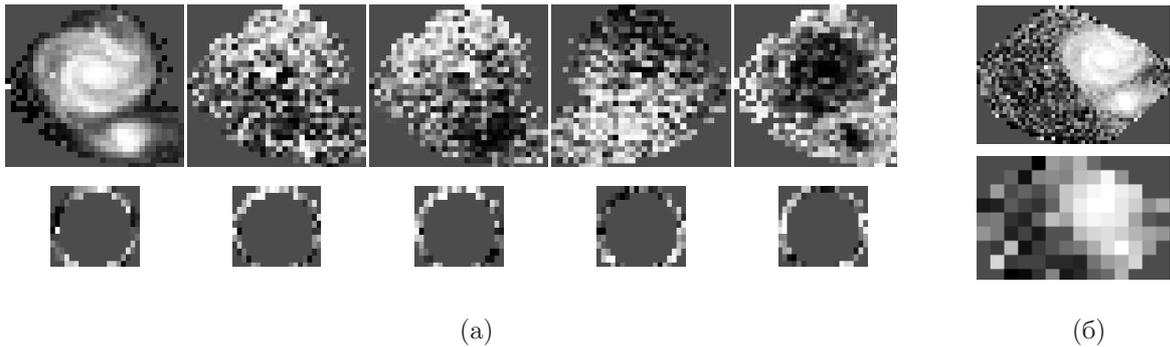


Рис. 2. (а) Вверху: левое изображение – яркостный сигнал, далее – поляризационные сигналы для четырех положений поляроида-анализатора; внизу: вырезанные из этих изображений кольца. (б) Вверху: изображение галактики, использованное для оценки атмосферного фона; внизу: изображение, сглаженное до разрешения ~ 80 угл. сек. после подгонки к яркостному кадру (верхний левый кадр), при использовании в качестве параметров яркости фона и пропускания атмосферы

каждого из углов поворота поляроида-анализатора вычислялись усредненные по всем имеющимся данным изображения с различным (и неизвестным) уровнем фона и пропускания атмосферы. Учитывая тот факт, что поляризация самой галактики мала, мы оценивали фон и пропускание для этих изображений путем вычисления среднего по всем кадрам и минимизировали среднеквадратичное отклонение кадров от полученного среднего, используя значения фона и пропускания атмосферы как параметры. Результирующие разностные кадры (поляризационный сигнал) несут информацию о неоднородности поляризации по наблюдаемому полю (рис. 2а).

4 Сравнение с ранее полученными результатами

Для сравнения получаемых данных с результатами работы Шоломицкого и др. (1999) мы разбили разностные изображения (рис. 2а) на кольца вокруг центра NGC 5194 шириной 0.5 угл. мин. и построили зависимости поляризационного сигнала от величины удвоенного угла между направлением от центра к месту на изображении и главной оптической осью поляроида-анализатора (рис. 2а верхний). Большие выбросы, возникающие из-за наличия “точечных” источников, исключались по критерию 5σ и данные аппроксимировались средним значением и гармониками Фурье первого порядка (рис. 2а нижний). Амплитуды гармоник представляют искомые величины радиально- (косинус), тангенциально- (минус косинус) и спирально- (синус) ориентированных поляризационных сигналов. Поляризационные сигналы для колец разных радиусов представлены в табл. 1. Кроме того, в этой таблице представлена величина яркостного сигнала (средняя яркость для кольца), но она не может быть использована для расчета величины поляризации, поскольку имеется значительная фоновая составляющая.

Таблица 1. Тангенциально- и спирально-ориентированные составляющие линейной поляризации галактики NGC 5194 по измерениям с узкополосным светофильтром 512 нм

Внутренний и внешний радиусы кольца угл.мин.	Яркостный сигнал с фоном единицы АЦП	Яркостный сигнал без фона единицы АЦП	Тангенциально поляризован- ный сигнал единицы АЦП	Спирально поляризован- ный сигнал единицы АЦП	DTP проценты	DSP
0.5–1.0	83	38	+0.121	-0.126	+0.32	-0.33
1.0–1.5	72	27	+0.014	-0.159	+0.05	-0.59
1.5–2.0	70	25	+0.004	-0.055	+0.02	-0.22
2.0–2.5	61	16	+0.001	-0.138	+0.01	-0.86
2.5–3.0	53	8	+0.007	-0.054	+0.09	-0.68
3.0–3.5	49	4	+0.017	-0.086	+0.42	-2.15
3.5–4.0	49	4	+0.115	+0.147	+2.88	+3.68
1.0–3.0	63	18	+0.006	-0.094	+0.03	-0.52

Для оценки атмосферного фона использовалось изображение (рис. 2б верхний), содержащее галактику и далекие участки неба, которые можно принять за фон. После подгонки параметров фона и пропускания атмосферы, минимизирующих разность этого кадра и кадра яркостного сигнала (рис. 2а), изображение было сглажено до разрешения ($r = 13$) ~ 80 угл. сек. (рис. 2б нижний) и использовано для оценки величины фона, которая составила 45 ед. АЦП. Откорректированные значения яркостного сигнала представлены в табл. 1. Отношение поляризационных сигналов к откорректированному яркостному сигналу равно соответствующим составляющим поляризации DTP и DSP из работы Шоломицкого и др. (1999). Полученные оценки не противоречат данным этой работы (рис. 3б).

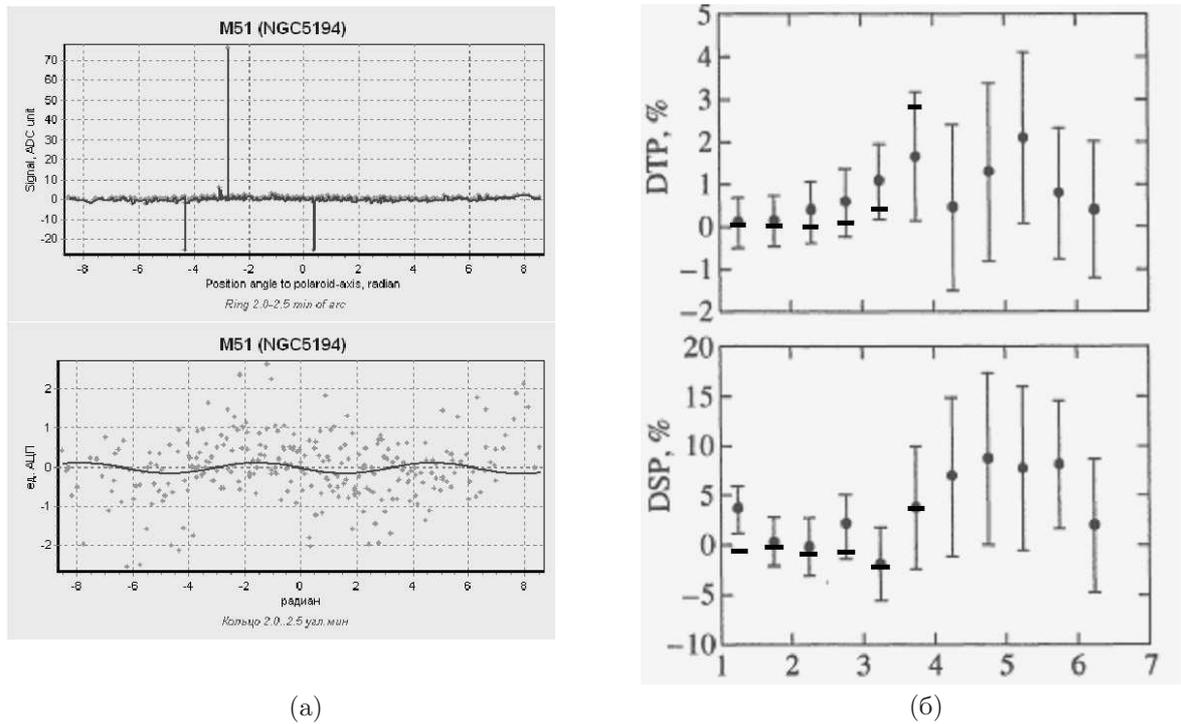


Рис. 3. (а) Зависимость поляризационного сигнала в кольце с внутренним и внешним диаметрами 4 и 5 угловых минут соответственно вокруг центра галактики NGC 5194 от величины удвоенного угла между направлением от точки к центру и главной оптической осью поляроида-анализатора. Вверху – до исключения выбросов, внизу – после исключения выбросов и аппроксимацией (сплошная линия) средним значением и гармониками Фурье первого порядка. (б) Сравнение распределений по радиусу степени поляризации галактики М 51 (NGC 5194), полученных в работе Шоломицкого и др. (1999) (точки с указанием погрешностей), и нашей работы (горизонтальные штрихи)

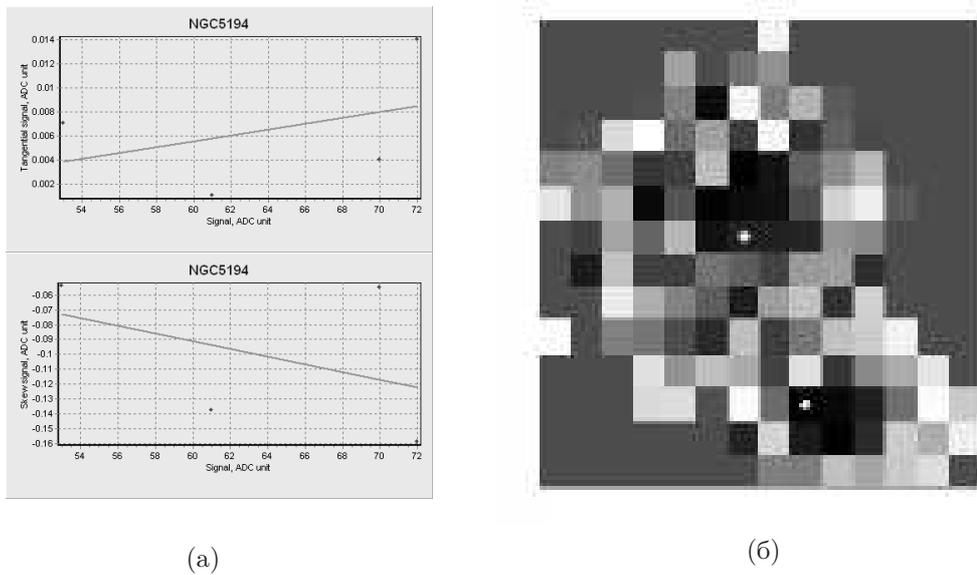


Рис. 4. (а) Зависимости тангенциального (вверху) и спирального (внизу) сигналов от яркостного сигнала для галактики NGC 5194 в пределах колец радиусом от 1 до 3 угл. мин. (б) Карта амплитуды корреляционной поляризации галактики М 51 с разрешением ~ 40 угл. сек. Точками отмечены положения центров яркости галактик NGC 5194 и NGC 5195

5 Корреляционная поляризация

В описанном выше случае удалось оценить величину фона, но не всегда это возможно. Учитывая, что галактика весьма неоднородна, можно, не имея информации об уровне фона, использовать взаимную зависимость поляризационного и яркостного сигналов. В некоторых случаях можно ожидать наличие линейной зависимости между этими сигналами, причем коэффициент пропорциональности (корреляционная поляризация) будет иметь величину, равную степени поляризации. Например, если степень поляризации не зависит от яркости.

Для вычисления корреляционной поляризации можно использовать фрагменты изображения, например кольца вокруг центра галактики (рис. 4а). В нашем случае получаем наклон для тангенциального сигнала – плюс 0.0002, для спирального – минус 0.0026, что сравнимо со степенями поляризации для кольца 1.0–3.0 (табл. 1): плюс 0.0003 для тангенциальной и минус 0.0052 для спиральной составляющих. А то, что величина “корреляционной поляризации” оказалась меньше средней величины поляризации, объясняется тем фактом, что центральные яркие части галактики обладают меньшей поляризацией, чем их темная периферия.

Можно также построить карты распределения корреляционной поляризации, уменьшая разрешение в 2 или 4 раза и вычисляя соответствующие коэффициенты для укрупненных ячеек (по 4 или 16 сигналам исходного разрешения). На рис. 4б мы приводим такую карту – амплитуду корреляционной поляризации (т. е. не учитывающей направление вектора поляризации) для объекта М 51. Хорошо видно, что периферии галактик NGC 5194 и NGC 5195 имеют большую поляризацию по сравнению с их центральными частями. Следует учитывать, что это не абсолютные, а дифференциальные данные, и смысл имеет только разность сигналов в пределах карты.

6 Заключение

Проведенные наблюдения на телескопе “Цейсс-1000” (п. Симеиз, Крым) с разработанным нами широкоугольным поляриметром показали возможность измерять поляризационные параметры протяженных астрономических объектов до уровней в сотые доли процента. Предложена методика определения дифференциальных параметров линейной поляризации, основанная на выравнивании

средних значений и средних квадратичных отклонений яркости в кадрах, снятых при различных атмосферных условиях. Предложен метод привязки всех снимков к единой сетке на небесной сфере на основе метода, применявшегося в космическом эксперименте COBE/DIRBE. В качестве параметра, описывающего поляризацию протяженного объекта, предложено использовать коэффициент корреляции между яркостным и поляризационным сигналами в разных частях объекта, что позволяет исследовать объекты, занимающие все поле зрения, для которых невозможно одновременно измерить величину атмосферного фона.

Литература

- Хаусер и др. // COBE Ref. Pub. No 98-A. / Eds Hauser M.G., Kelsall T., Leisawitz D. and Weiland J. Greenbelt, MD: NASA/GSFC. 1998. Available in electronic form from the NSSDC.
- Шоломицкий Г.Б., Маслов И.А., Витриченко Э.А. // Письма в Астрон. журн. 1999. Т. 25. С. 803.