

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 4

ФЕВРАЛЬ, 1968

ВЫПУСК 1

ДЕТАЛЬНАЯ ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИМЕТРИЯ ГАЛАКТИК М 82

В. А. ГАГЕН-ТОРН

Поступила 24 июля 1967

В статье приводятся результаты фотографической поляриметрии галактики М 82. Отмечается, что наблюдаемая поляризация не может быть объяснена присутствием синхротронного излучения, но легко объясняется рассеянием света ярких частей галактики пылью, расположенной в гало. Показано, что заметную роль играет рассеяние на свободных электронах.

Введение. Иррегулярная галактика М 82 привлекает пристальное внимание астрономов. Это объясняется многочисленными ее особенностями, а именно: неразрешенностью на звезды (хотя расположенная поблизости галактика М 81 разрешается), несоответствием цвета галактики ее спектру, наличием хаотически расположенных пылевых облаков, проектирующихся на яркие области галактики, существованием тонкой волокнистой структуры на периферии галактики, радиоизлучением, значительно превышающим радиоизлучение нормальных галактик. Изучению М 82 в последние годы посвящено большое количество работ. В 1956 г. В. А. Домбровский [1] обнаружил поляризацию света ярких участков галактики, достигающую 3%, с электрическим вектором приблизительно параллельным ее большой оси. Затем Линдс [2] отождествил радиоисточник 3С 231 с галактикой М 82 и построил ее спектр в интервале $0.158 \div 3.2 \text{ м}\mu$. В 1962 г. Эльвиус [3] обнаружила сильную поляризацию излучения в периферийных частях галактики, расположенных вдоль малой оси. Эту поляризацию она объяснила рассеянием света ярких центральных частей галактики в пылевых облаках, находящихся в гало галактики. В 1963 г. появилась важная работа Линдса и Сандейджа [4], в которой приведены результаты спектральных наблюдений, устанавливающих, что в центре галактики М 82 произошел взрыв и в направлении полюсов (считается, что М 82—галактика, видимая в ребро) была выброшена материя. Излуче-

ние поляризованного света было приписано релятивистским электронам, возникшим при взрыве и движущимся в магнитном поле, на существование которого, по-видимому, указывает наличие волокнистой структуры во внешних частях М 82. Было показано, что интенсивность излучения в голубой части спектра может быть получена продолжением радиоспектра в видимую область.

Вскоре после появления этой статьи вышла работа Сандейджа и Миллера [5], которые установили существование почти полной поляризации в непрерывном спектре наиболее удаленных от галактики волокон, что, по мнению авторов, является неоспоримым доказательством свечения их в непрерывном спектре за счет синхротронного излучения. Наличие взрыва в центральной части галактики подтвердило также детальное изучение поля скоростей, проведенное Бэрбиджами и Рубин [6].

Однако результаты радионаблюдений на частоте 8 мГц , полученные Дентом и Хаддоком [7] поставили под сомнение существование оптического синхротронного излучения в М 82, поскольку спектр в районе 8 мГц загибается вниз. В самое последнее время радионаблюдения с высоким разрешением с достоверностью установили (см. дискуссию по докладу Эльвиус [8]), что большая часть радиоизлучения М 82 приходит от центральных частей. (Указания на существование центрального источника в М 82 были и раньше, см. например [9]). Это еще более усилило сомнения в правильности заключения Линдса и Сандейджа.

Для выяснения всех обстоятельств дела важное значение имеет детальное изучение поляризации света в М 82. Поскольку наблюдения Эльвиус сделаны с большой диафрагмой, а работа Сандейджа и Миллера дает только качественные результаты, относящиеся к наиболее удаленным волокнам, мы решили провести детальное поляриметрическое исследование М 82 фотографическим путем.

Наблюдения и обработка. Фотографии М 82 с поляроидом в трех положениях, отличающихся на 60° , были получены нами осенью 1965 г. на Бюраканской Астрофизической Станции Ленинградского Университета в прямом фокусе телескопа АСТ—453 (1:4.6; $D = 450 \text{ мм}$) на пластинках ORWO Astro Spezial. Кривая реакции, определяемая чувствительностью эмульсии и пропусканием поляроида и линз коррекционной системы, простиралась приблизительно от 3700 до 5100 Å. Сведения о полученных пластинках приводятся в табл. 1.

Методика наблюдений и обработки изложена нами ранее [10]. Здесь мы отметим лишь некоторые особенности. Измерения производились с диафрагмой $8'' \times 8''$. При обработке снимков М 82

мы не строили фотометрические разрезы, поскольку галактика имеет сложную структуру и в ней наблюдаются скачкообразные изменения яркости. После приведения с помощью внефокальных дисков звезд.

Таблица 1

№ пласт.	Дата	Выдержка	Положение поляроида
1	1965 4 X	1 ^h	28 ⁰ .5
6	29 X	1 ^h	28 ⁰ .5
7	29 X	2 ^h 10 ^m	28 ⁰ .5
10	30 X	55 ^m	88 ⁰ .5
12	31 X	1 ^h	148 ⁰ .5
14	1 XI	2 ^h 30 ^m	88 ⁰ .5
16	2 XI	2 ^h 10 ^m	148 ⁰ .5

яркостей, полученных по всем пластинкам, в одну систему мы усреднили яркости, полученные на пластинках с одним и тем же положением поляроида. Затем для исключения систематических ошибок была

Таблица 2

№ площадки	p (°/°)		θ ₀ °	
	ф. э.	фотогр.	ф. э.	фотогр.
1	14.0	16.1	80	77
2	10.7	11.8	82	85
3	16.1	13.4	46	53
4	1.9	3.3	154	161
5	5.8	4.4	128	164
6	6.8	8.2	91	85
7	4.8	2.2	46	44
8	3.8	4.7	23	12
9	1.3	2.0	4	48
10	0.0	0.3	—	45
11	0.7	1.3	20	19
12	1.1	1.4	58	68
13	2.7	1.6	65	51
14	0.6	1.3	52	61
15	1.1	2.0	171	144

осуществлена привязка к фотовольтрическим наблюдениям. Мы воспользовались данными Эльвиус [3]. Яркости были проинтегрированы для 15 измеренных ею площадок и были найдены поправочные множители (0.943 и 1.035), после введения которых согласие поляризационных данных оказалось удовлетворительным (см. табл. 2). Полу-

чения по формулам Фесенкова значения p и θ_0 представлены графически на рис. 1. Длина отрезков соответствует степени поляризации, а направление дает положение электрического вектора. Там же отмечены площадки, использованные для привязки, и нанесены изофоты, соответствующие яркостям $(J_{\text{гв.}} + J_{\text{фон}})/J_{\text{фон}}$, равным 1.3, 1.5 и 2.0. Звездочки указывают для ориентировки положение ярких звезд, окружающих галактику.

Результаты поляриметрических наблюдений. Прежде всего отметим, что наши результаты относятся в основном к непрерывному спектру. Действительно, эмиссионные линии $\lambda 3727$, N_1 и N_2 находятся на краях полосы пропускания, где чувствительность аппаратуры мала, и их влиянием можно пренебречь. Оценим возможный вклад линии H_β . Согласно [3] интенсивность линии H_β в интересующих нас периферийных частях галактики приблизительно равна интенсивности участка непрерывного спектра шириной в $200 \text{ \AA}$ (в центральных областях она много меньше). Полоса пропускания аппаратуры составляет $\approx 1400 \text{ \AA}$, причем H_β находится в области, где чувствительность составляет 0.4 от максимальной. Таким образом, вклад линии H_β не превышает 0.07 от интенсивности непрерывного спектра, и можно считать, что вклад всех эмиссионных линий составляет примерно 0.1 от интенсивности непрерывного спектра. Тогда, считая, что излучение в линиях не поляризовано, степень поляризации в непрерывном спектре можно получить из данных рис. 1 умножением на коэффициент 1.1.

Данные табл. 2 показывают, что систематические ошибки в определении степени поляризации не превышают 3%. Что касается случайных ошибок, то они, естественно, зависят от яркости соответствующих участков галактики. По-видимому, можно считать, что в районах, ограниченных изофотой 2.0 они составляют 3–5%, увеличиваются до 10% в слабо светящихся районах и достигают 15%–20% в самых внешних измеренных областях галактики.

Рассмотрение рис. 1 позволяет сделать следующие выводы. Степень поляризации в центральных районах галактики лишь незначительно превышает возможные ошибки наблюдений. В западной части она равна в среднем нулю; а в восточной оказывается чуть больше, причем наблюдается некоторая корреляция между направлением электрического вектора и расположением пылевой поглощающей свет материи. Степень поляризации возрастает с удалением от центра галактики, а направление электрического вектора в среднем совпадает с изофотами для близлежащих более ярких частей галактики. Особенно сильное увеличение степени поляризации наблюдается в направлении

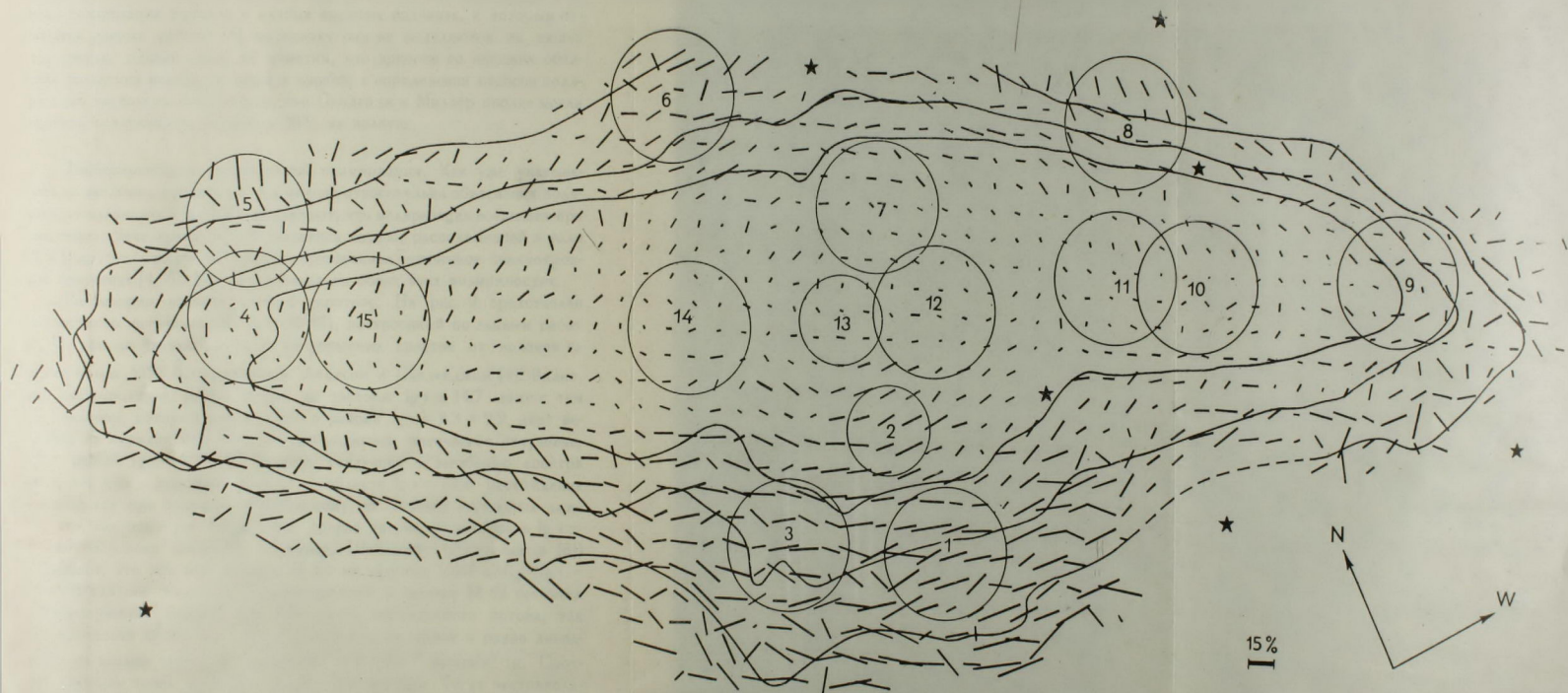


Рис. 1. Результаты поляриметрических наблюдений

К статье В. А. Гаген-Торна

малой оси. Однако нигде степень поляризации не превышает 30—35%. Наши измерения, сделанные с 8"-ной диафрагмой, не показывают резкого увеличения степени поляризации в отдельных волокнах, заметных на наших снимках. Мы не можем утверждать, что нет увеличения степени поляризации также и в слабых внешних волокнах, к которым относятся данные работы [5], поскольку они не выделяются на наших пластинках, однако сразу же отметим, что яркости во внешних областях галактики настолько малы и ошибки в определении степени поляризации настолько значительны, что Сандейдж и Миллер вполне могли принять поляризацию, скажем в 50% за полную.

Интерпретация наблюдаемой поляризации. Как уже указывалось во введении, существует два мнения относительно объяснения поляризации излучения в М 82. Одни считают, что поляризация возникает при рассеянии света ярких частей галактики пылью, расположенной в гало [3, 8], другие, что существует поляризованное оптическое синхротронное излучение [4, 5]. Мы остановимся на обеих этих возможностях.

Рассмотрим вначале вторую гипотезу. На рис. 2 представлен радиоспектр источника 3С 231 (М 82), построенный по данным работ [7, 9], там же указан поток в непрерывном спектре от волокон на длине волны 5550 Å, полученный Линдсом и Сандейджем [4]. Видно, что экстраполяция радиоспектра до частоты $\lg \nu = 14.7$ даже с тем же наклоном, который имеет место в районе $\lg \nu = 9.3 \div 9.9$, дает величину на порядок меньшую, чем наблюдаемое оптическое излучение. Но в районе $\lg \nu = 9.3 \div 9.9$ заметна тенденция к загибанию спектра вниз, так что в действительности в области $\lg \nu = 14.7$ расхождение оказывается еще большим. По-видимому, не спасает положения даже то, что, как отмечает Линдс, его оценка потока от волокон в $\lg \nu = 14.7$ несколько завышена. Наконец, Шейкшафт (дискуссия в [8]) указывает, что при наблюдениях М 82 на частоте 1.407 кМГц ($\lg \nu = 9.15$) удалось выделить локализованный в центре М 82 источник радиоизлучения, дающий большую часть наблюдаемого потока, так что плотность потока от волокон (если они излучают в радио диапазоне) во всяком случае не превышает 0.8×10^{-26} ватт/м²·ц. Соответствующая точка нанесена на рис. 2 (крестик). Тогда экстраполяция с тем же наклоном в район $\lg \nu = 14.7$ даст величину, отличающуюся минимум на два порядка от значения, полученного в [4], и даже полная поляризация синхротронного излучения даст поляризацию всего в 1% в суммарном излучении в непрерывном спектре, приходящем от волокнистой структуры. Таким образом, наблюдаемую поляризацию невозможно объяснить синхротронным излучением.

Гипотеза о возникновении поляризации при рассеянии на пыли не встречает столь явных трудностей. Она подтверждается и полученным нами распределением поляризации. Особенно следует отметить то обстоятельство, что направление преимущественных колебаний электрического вектора в общем совпадает с изофотами близле-

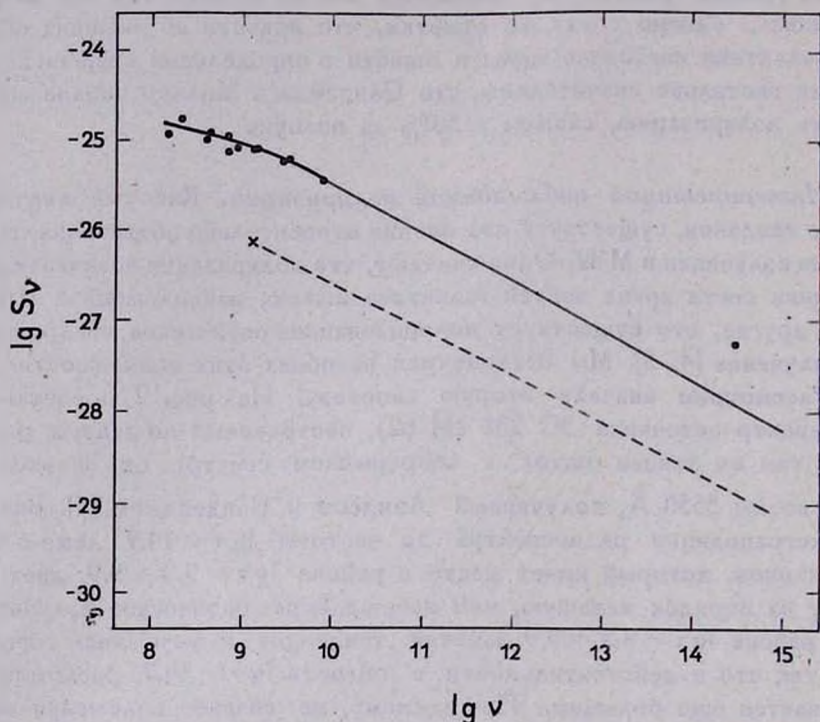


Рис. 2. Радиоспектр М 82.

жащих ярких областей галактики. При рассеянии должна наблюдаться именно такая картина, поскольку наибольший вклад в рассеянный свет будут вносить области, расположенные в непосредственной близости от рассеивающих пылевых облаков. Мощные пылевые облака, проектирующиеся на яркие области галактики, непосредственно видны на прямых фотографиях. Доказательство присутствия больших количеств пыли можно усмотреть также в несоответствии спектрального типа галактики (А 5) и показателя цвета в ней, превышающего в центральных частях значение $B - V = +1.^m2$ согласно данным работ [3, 8, 11].

Пылевые облака, вызывающие столь значительное покраснение проходящего через них света, будучи расположены в периферийных частях, должны рассеивать в направлении наблюдателя более интенсивно коротковолновое излучение, так что области, светящиеся за счет рассеянного света должны быть голубее. Однако слабо светящиеся области, дающие сильно поляризованное излучение, имеют согласно [3] $B - V$ такого же порядка, что и расположенные на западе области галактики, где на прямых фотографиях почти не заметно пыли, и показатель цвета которых мы будем считать „нормальным“ показателем цвета галактики. Это несоответствие можно объяснить тем, что до этих облаков доходит свет, уже покрасневший в облаках, расположенных в теле галактики, хотя М 82-галактика, видимая в ребро, и покраснение в направлении малой оси (полюсов) должно быть значительно меньше, чем то, которое наблюдается нами в центральных частях. Кроме того на рассеянное пылью излучение может накладываться какое-то излучение более позднего спектрального состава. В дальнейшем мы покажем, что в областях, светящихся в H_α и совпадающих с районами с повышенной поляризацией, заметную роль играет излучение, рассеянное на свободных электронах, распределение энергии которого совпадает с распределением энергии падающего покрасневшего при прохождении пылевых облаков света. Возможно также, что в периферийных районах имеются звезды более поздних спектральных типов, чем в теле галактики, вносящие больший вклад в длинноволновое излучение. Наличие таких звезд, излучение которых не поляризовано, позволяет объяснить, как это отметила Эльвиус [8], полученное ею незначительное уменьшение степени поляризации с увеличением длины волны.

Некоторой трудностью гипотезы возникновения поляризации при рассеянии на пыли является наблюдающаяся довольно высокая степень поляризации. Мы покажем сейчас, что учет поляризации, возникающей при рассеянии на свободных электронах, позволяет преодолеть эту трудность.

Прямые фотографии в H_α , полученные с интерференционным фильтром, показывают, что зона НП имеет вид двух конусов, оси которых совпадают с малой осью галактики. Концентрация свободных электронов в этих областях, согласно [4], составляет в среднем $n_e = 10 \text{ эл/см}^3$.

Точное решение задачи о рассеянии света ярких частей галактики свободными электронами включает три интегрирования (два по диску галактики и одно по лучу зрения) и требует знания распределения яркости по диску галактики и знания пространственного рас-

пределения свободных электронов. Поскольку ни то, ни другое нам не известно с достаточной точностью, а вычисления различных моделей очень громоздки, мы дадим здесь только оценку, уподобив области, богатые свободными электронами, и освещающую их галактику солнечной короне и освещающему ее Солнцу. На рис. 3 галактика схематически представлена сегментом ABC некоторой звезды радиуса $XC = R_{эф}$, области, рассеивающие свет галактики, представляют собой конус CDEF. Падение яркости галактики с удалением от центра, вероятно, не слишком сильно отличается от падения яркости в звездном диске из-за потемнения к краю.

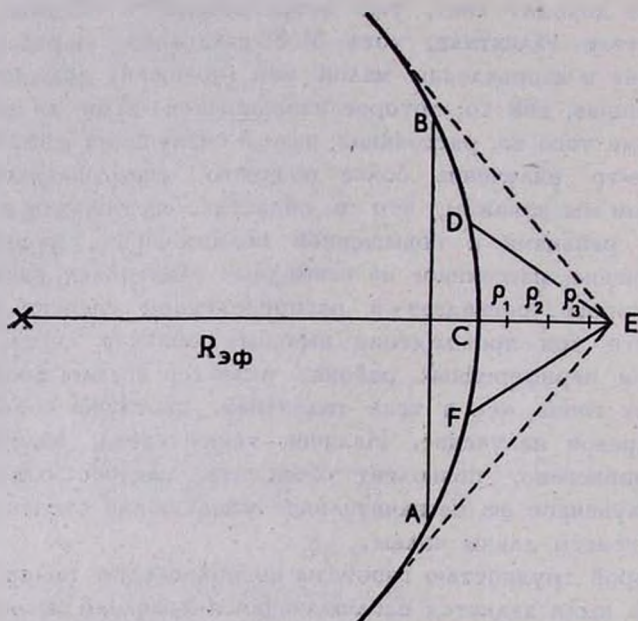


Рис. 3. К объяснению поляризации рассеянием на свободных электронах.

Теоретическая степень поляризации в короне была вычислена Баумбахом (см. [12]) и составляет около 30% для $p_1 = 1.05$, 37% для $p_2 = 1.15$ и 43% для $p_3 = 1.25$ (p — расстояние от центра звезды в картинной плоскости, выраженное в долях радиуса). Найдем теперь вклад, вносимый излучением, рассеянным на свободных электронах, в общую интенсивность, наблюдаемую в соответствующих точках.

Интенсивность излучения, рассеиваемого единичным объемом в единичном телесном угле, есть [13]:

$$\frac{3}{4} (1 + \cos^2 \gamma) \sigma_e n_e \int \frac{d\omega}{4\pi},$$

где $d\omega$ — телесный угол для падающего излучения интенсивности J ,
 γ — угол рассеяния, $\sigma_e = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 = 6.6 \times 10^{-25}$.

Полная интенсивность, рассеиваемая единичным объемом, будет

$$i(\rho, y) = \frac{3}{4} \sigma_e n_e \frac{1}{4\pi} \int J(1 + \cos^2 \gamma) d\omega =$$

$$= 0.4 \cdot 10^{-25} n_e \int J(1 + \cos^2 \gamma) d\omega,$$

где y — координаты вдоль луча зрения, связанная с ρ и r (пространственным расстоянием объема от центра звезды) соотношением $r^2 = \rho^2 + y^2$; r , ρ и y в единицах $R_{\text{эф}}$.

Тогда интенсивность в точке на оси конуса на расстоянии ρ от центра будет

$$J(\rho) = 2R_{\text{эф}} \int_0^{y_0} i(\rho, y) dy = 2R_{\text{эф}} \cdot n_e \cdot 0.4 \cdot 10^{-25} J_0 \int_0^{y_0} f(\rho, y) dy. \quad (*)$$

Значения $M\rho = 1.05, 1.15, 1.25$ соответствуют значения $y_0 = 0.165, 0.091$ и 0.034 . Интеграл $I = \int_0^{y_0} f(\rho, y) dy$ был найден численно с помощью формул, приведенных в [12] (стр. 26—30) для случая полного потемнения диска к краю и оказался равным соответственно 0.58; 0.31 и 0.11. Если принять расстояние до галактики равным 9.76×10^{24} см [4], то $R_{\text{эф}} = 5300 \text{ пс} = 16.4 \times 10^{21} \text{ см}$. Подставляя в (*) значения $R_{\text{эф}}$, n_e и I , получим:

$$J(1.05) = 0.0076 J_0,$$

$$J(1.15) = 0.0040 J_0,$$

$$J(1.25) = 0.0014 J_0.$$

Яркость центральной части галактики в принятых нами относительных единицах составляет 60. Значит

$$J(1.05) = 0.46,$$

$$J(1.15) = 0.24,$$

$$J(1.25) = 0.08.$$

Яркость фона неба равна 2.00 и яркость соответствующих областей, согласно рис. 1 оказывается равной

$$J(1.05) = 2.00,$$

$$J(1.15) = 0.80,$$

$$J(1.25) = 0.30.$$

Таким образом, рассеянный электронами свет вносит заметный вклад в общую яркость, наблюдаемую в периферийных областях галактики. Степень поляризации его, согласно [12] составляет 30%, 37% и 43% соответственно, что дает 6.5%, 11% и 12% в суммарном излучении в случае, если остальной свет является неполяризованным. Однако, как указывалось выше, значительный вклад в суммарное излучение вносит свет, рассеянный пылью. Он поляризован в том же направлении и степень его поляризации, особенно для продолговатых частиц, ориентированных крупномасштабным магнитным полем галактики, значительна. Суммарное действие света, рассеянного пылью и свободными электронами может, таким образом, непринужденно объяснить наблюдаемую в галактике поляризацию порядка 30—35% в районе $\rho = 1.3$ и вероятно также поляризацию в 50% для более удаленных от центра областей.

В заключение заметим, что если данные работы [5] все-таки верны и поляризация в самых удаленных волокнах оказывается почти полной, то объяснить ее рассеянием не представляется возможным,

Ленинградский государственный
университет

THE DETAILED PHOTOGRAPHIC POLARIMETRY OF THE GALAXY M 82

V. A. HAGEN-THORN

The results of the photographic polarimetry of the galaxy M 82 are given. It is pointed out, that observed polarization cannot be explained by synchrotron radiation, but is easily explained by scattering of the light of the bright regions of galaxy by dust, located in the halo. It is shown, that the scattering by the free electrons is of importance here.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В. А. Домбровский, Астрон. цирк., № 176, 1956.
2. С. R. Lynds, Ap. J., 134, 659, 1961.
3. A. Elvius, Low. Obs. Bull., № 119, 281, 1962.
4. C. R. Lynds, A. R. Sandage, Ap. J., 137, 1005, 1963.
5. A. R. Sandage, W. C. Miller, Science, 144, 405, 1964.
6. E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, V. C. Rubin, Ap. J., 140, 942, 1964.
7. W. A. Dent, F. T. Haddock, Quasi-Stellar Sources and Gravitational Collapse, The University of Chicago Press, 1965.
8. А. Эльвиус, Труды симпозиума МАС, № 29, Бюракан, 1966.
9. В. Н. Курильчик, Астрон. ж., 42, 1138, 1965.
10. В. А. Гаген-Торн, Труды АО ЛГУ, 24, 54, 1967.
11. Б. Е. Маркарян, Э. Я. Оганесян, С. И. Аракелян, Сообщ. Бюр. обс., 30, 3, 1962.
12. И. С. Шкловский, Физика солнечной короны, М., 1962, стр. 37.
13. В. В. Соболев, Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет, М., 1956, стр. 159.