

О ПЕРЕМЕННОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЯДЕР  
СЕЙФЕРТОВСКИХ ГАЛАКТИК

М. К. БАБАДЖАНИЯНЦ, В. А. ГАГЕН-ТОРН, В. М. ЛЮТЫЙ

Поступила 1 сентября 1972

Сопоставление результатов спектральных, фотометрических и поляризационных наблюдений ядер сейфертовских галактик позволяет заключить, что в ядрах этих галактик имеются малого размера источники синхротронного излучения, ответственные за наблюдаемую переменность оптического излучения и его поляризацию. Причиной переменности, по всей вероятности, является изменение максимальной энергии релятивистских электронов. Эти источники не имеют непосредственного отношения к инфракрасным избыткам, и из-за очень малого размера их излучение испытывает самопоглощение уже на коротких сантиметровых волнах.

В последнее время вопросы нестационарности внегалактических объектов привлекают к себе все большее и больше внимание астрофизиков. У целого ряда квазаров, N-галактик и ядер сейфертовских галактик найдены изменения потока излучения в оптическом, инфракрасном и радиодиапазонах. Однако многие детали этих изменений и причины их еще не вполне ясны. В связи с этим нами и было предпринято изучение переменности ядер сейфертовских галактик в оптической области спектра. В основу анализа положены результаты фотометрических наблюдений, полученных в Ленинградском университете (поляризационные данные) и на Южной станции ГАИШ (фотометрические данные).

Известно, что большинство ядер сейфертовских галактик изменяет свой блеск в оптической области спектра [1—3]. Наиболее полные UVV-данные о фотометрической переменности их собраны в работе Лютого [4], который отмечает следующее: а) амплитуда изменений больше при наблюдениях с меньшей диафрагмой, что свидетельствует о переменности именно ядер галактик: б) изменения блеска

сопровождаются изменениями цвета, причем на двуцветной диаграмме точки, соответствующие цветам в максимуме, располагаются в районе прямой, дающей цвета для синхротронных спектров с разными спектральными индексами.

Результаты первых поляриметрических наблюдений ядер сейфертовских галактик [5—7] были обсуждены Домбровским и Гаген-Торном [8], которые связали найденную поляризацию с синхротронным излучением источников малого размера, проявляющих себя в видимой и инфракрасной областях спектра и в коротковолновом радиодиапазоне, но испытывающих самопоглощение на длинных и средних радиоволнах. В дальнейшем Гаген-Торн и Бабаджанянц [9] обнаружили переменность параметров поляризации у галактик NGC 1275, NGC 4151 и, возможно, NGC 1068; для NGC 4151 переменность поляризации была подтверждена Крушевским [10].

Сопоставление переменности поляризации и блеска может дать новые сведения о природе переменных источников в ядрах сейфертовских галактик. Мы начнем рассмотрение с галактики NGC 4151, для которой имеются наиболее полные данные, позволяющие детально изучить свойства переменного источника, вносящего дополнительный вклад в излучение ядра.

*NGC 4151.* Прежде всего отметим, что согласно спектральным данным [11] переменный источник дает, в основном, непрерывное излучение. Для выяснения его природы представляет несомненный интерес проверить, существует ли корреляция между переменностью поляризации и блеска. Поскольку большая часть имеющихся поляризационных данных получена в цвете В, сопоставление проводилось для этого цвета. Однако, учитывая наблюдаемую в 1966 г. [7] малую зависимость параметров поляризации от длины волны, мы сочли возможным привлечь к сопоставлению и поляризационные данные, полученные без фильтра и в цвете V. Необходимые сведения собраны в табл. 1. Первый столбец дает период наблюдений, на который были усреднены поляризационные и фотометрические данные. Второй и третий — средние значения параметров поляризации согласно работам [7, 12] (при усреднении менее уверенным наблюдениям 10.VI.69 и 17.VII.69 был придан меньший вес). В четвертом столбце приводятся величины В. Для 1967—69 гг. они выведены по данным работ [4, 12]. Для 1966 г. оценка блеска получена косвенным путем. В ночи 15 и 17 июня 1966 г. непосредственно после проведения поляризационных наблюдений ядра для совершенно других целей были получены оценки яркости ночного неба привязкой к стандартной звезде. Поскольку

наблюдение ядра галактики сопровождалось наблюдением фона неба, мы после введения необходимых поправок смогли получить оценки блеска ядра в цвете В. Из полученных таким образом значений  $11^m.14$  и  $11^m.49$  и выведено среднее значение  $11^m.3$ , приведенное в таблице.

Таблица 1

| Период наблюдений | $p$ (%) | $\theta_0$ | В        | $F$ , отв. ед. | $F_p$ , отв. ед. |
|-------------------|---------|------------|----------|----------------|------------------|
| 8—17/VI.1966      | 1.6     | 93°        | $11^m.3$ | 4.03           | 0.0648           |
| 4—5/VI.1967       | 1.2     | 94         | 11.90    | 2.33           | 0.0280           |
| 5/II.1968         | 1.1     | 86         | 12.25    | 1.69           | 0.0186           |
| 10—11/VI.1969     | 0.4     | 102        | 12.39    | 1.48           | 0.0059           |
| 14—17/VII.1969    | 0.8     | 95         | 12.37    | 1.51           | 0.0121           |
| 12/VI.1968        | —       | —          | 12.82    | 1.00           | —                |

Из рассмотрения табл. 1 видно, что направление преимущественных колебаний электрического вектора остается неизменным и увеличение блеска сопровождается возрастанием степени поляризации. Это позволяет заключить, что *дополнительное излучение поляризовано* и найти степень его поляризации. Перейдем от звездных величин В к потокам  $F$ , приняв за единицу поток, соответствующий минимальному наблюдавшемуся согласно [4] значению блеска  $В = 12^m.82$  (разумеется, эта единица выбрана произвольно), и по степени поляризации найдем поток поляризованного излучения  $F_p$ . Результаты приведены в пятом и шестом столбцах табл. 1 и графически представлены на рис. 1. Вертикальные штрихи соответствуют ошибкам в определении степени поляризации. Видно, что точки вполне удовлетворительно ложатся на прямую, проведение которой способом наименьших квадратов дает

$$F_p = 0.0214 F - 0.0213.$$

Полученное соотношение между  $F_p$  и  $F$  позволяет сделать два важных заключения. Во-первых, для  $F_p = 0$  получаем  $F = 1.00$ , что соответствует  $В = 12^m.82$ . Иными словами степень поляризации равна 0 как раз при минимальном значении блеска. Во-вторых, то обстоятельство, что точки лежат на прямой линии, означает, что *степень поляризации дополнительного излучения постоянна*. Ясно, что она дается угловым коэффициентом прямой и, следовательно, составляет 2.1 %.

Изучим теперь колориметрические характеристики источника дополнительного излучения, для чего воспользуемся данными работы [4]. Поскольку случайные ошибки в определении блеска могут до-

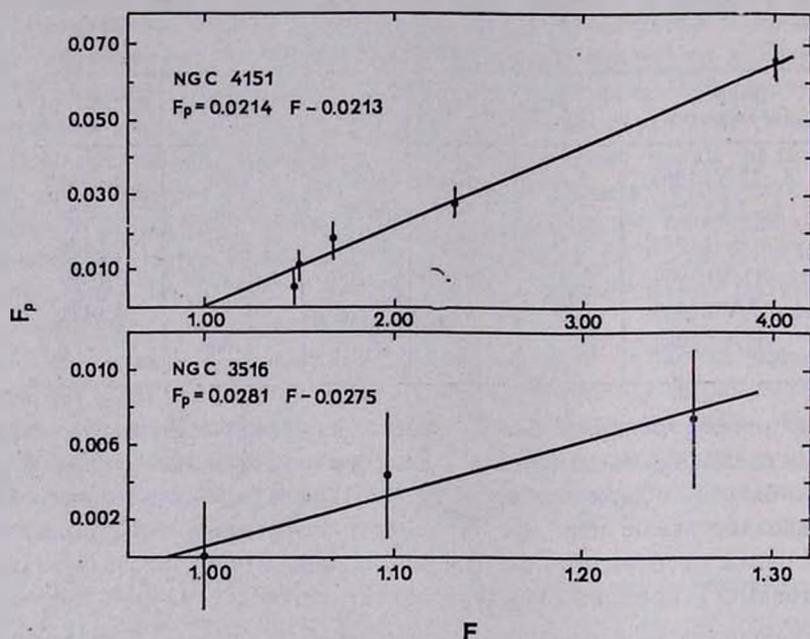


Рис. 1. Корреляция между блеском и степенью поляризации для NGC 4151 и NGC 3516.

вольно сильно повлиять на окончательный результат, мы сочли более разумным использовать не непосредственно наблюдаемые значения, а данные, снятые со сглаженных кривых блеска.

Таблица 2

|           | $m$   | $F_{\nu}$ , $вт/м^2 \cdot \mu$ | $(\lg F_{\nu}) + 29$ | $F_{\nu}^{пол}$ , $вт/м^2 \cdot \mu$ | $(\lg F_{\nu}^{пол}) + 29$ | $\lg \nu$ |
|-----------|-------|--------------------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------------------|-----------|
| $U_{max}$ | 11.23 | $0.606 \cdot 10^{-27}$         | 1.783                | $0.439 \cdot 10^{-26}$               | 1.642                      | 14.920    |
| $U_{min}$ | 12.63 | 0.167                          | 1.223                |                                      |                            |           |
| $V_{max}$ | 11.95 | 0.771                          | 1.888                | $0.425 \cdot 10^{-27}$               | 1.629                      | 14.834    |
| $V_{min}$ | 12.82 | 0.346                          | 1.539                |                                      |                            |           |
| $B_{max}$ | 11.41 | 1.078                          | 2.032                | $0.475 \cdot 10^{-27}$               | 1.677                      | 14.737    |
| $B_{min}$ | 12.04 | $0.603 \cdot 10^{-27}$         | 1.780                |                                      |                            |           |

Трехцветные наблюдения позволяют детально изучить распределение энергии в спектре дополнительного излучения. В табл. 2 при-

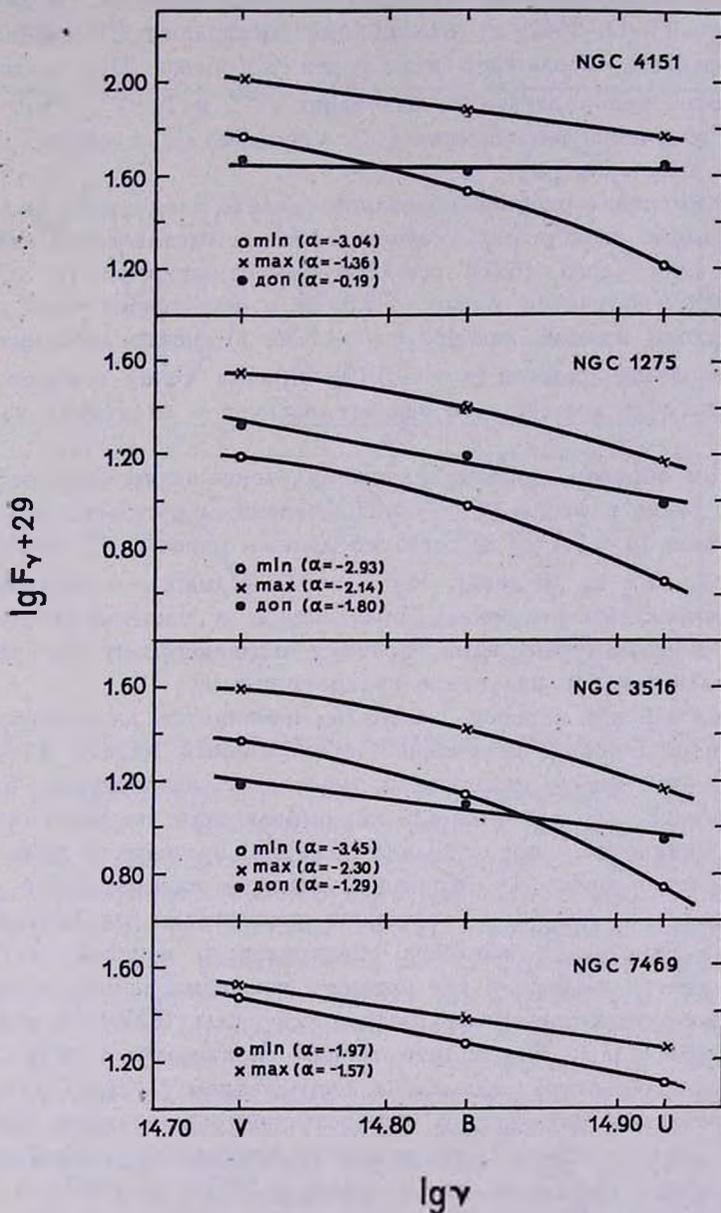


Рис. 2. Спектры ядер галактик в минимуме и максимуме блеска и спектр дополнительного излучения.

водятся значения потоков  $F_v$ ,  $вт/м^2 \cdot \mu$  в минимуме (J. D. 2440020) и максимуме (J. D. 2440972) блеска для диафрагмы 27", найденные с использованием абсолютной калибровки Джонсона [13]; далее  $\lg F_v$ , затем поток дополнительного излучения  $F_v^{дон}$  и  $\lg F_v^{дон}$ . Рис. 2 дает спектры излучения в максимуме ( $\times$ ), минимуме ( $\circ$ ) и спектр дополнительного излучения ( $\bullet$ ).

Рассмотрение рисунка позволяет сделать следующие заключения: а) в минимуме спектр недостаточно хорошо представляется степенным законом; если через точки все-таки провести прямую, то спектральный индекс получится около  $-3.0$ ; б) в максимуме точки располагаются вдоль прямой, дающей  $\alpha = -1.36$ ; в) спектр дополнительного излучения очень плоский ( $\alpha = -0.19$ ), причем точки ложатся на прямую достаточно хорошо, что свидетельствует о степенном характере спектра.

Таким образом, дополнительное излучение является непрерывным, обладает очень плоским ( $\alpha = -0.19$ ) степенным спектром, показывает поляризацию ( $p = 2.1\%$ ) и, согласно данным работы [4], быструю переменность ( $0^m 6$  за 10 дней). Из известных лишь синхротронный механизм может дать излучение, обладающее в оптическом диапазоне подобными характеристиками, поэтому в дальнейшем мы будем считать дополнительное излучение синхротронным.

Представляет интерес выяснить, изменяется ли основной параметр синхротронного излучения — спектральный индекс  $\alpha$  — со временем. С этой целью мы провели вычисления, аналогичные приведенным в табл. 2, для всех наблюдений, выполненных на Южной станции ГАИШ. Результаты представлены на рис. 3 вместе с кривой изменения блеска в цвете U. Кривая изменения спектрального индекса синхротронного источника повторяет практически все детали кривой изменения блеска. Зависимость спектрального индекса от блеска в свете U дается на рис. 4, где разными значками нанесены значения, полученные по наблюдениям разных лет (для 1967 г. использованы данные работы [1]). Видно, что всегда спектральный индекс уменьшается (по абсолютной величине) с возрастанием блеска. Однако свойства источников оптического синхротронного излучения, наблюдавшихся в разные периоды, оказываются несколько различными. Наиболее мощные источники наблюдались в 1967 г. и в 1971 г. В обоих случаях наименьший спектральный индекс составляет около  $-0.20$ . В 1968 г. при меньшем блеске спектральный индекс достиг минимального значения  $-0.08$ . Данные 1968 г. (в минимуме блеска), 1969 и 1970 гг., в общем, систематически не отличаются друг от

друга. Кривая на рис. 4 дает общий ход изменений спектрального индекса с блеском для этих периодов.

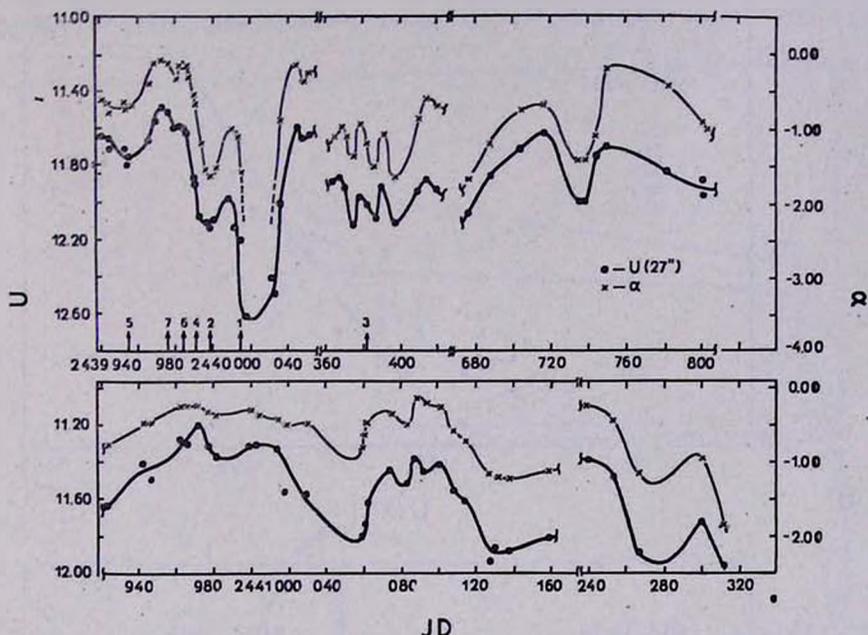


Рис. 3. Изменения спектрального индекса со временем у NGC 4151.

Для выяснения причины указанной переменности нам придется привлечь данные о наблюдениях в радио и инфракрасной областях спектра. Рис. 5 дает радиоспектр ядра галактики в сантиметровом диапазоне длин волн согласно [15] и инфракрасный избыток по [15]. В оптической области нанесены точки, относящиеся к синхротронному излучению для указанных на рис. 3 стрелками моментов времени, соответствующих J. D. 2440015 (1), 2439999 (2), 2440382 (3), 2439991 (4), 2439955 (5), 2439984 (6), 2439976 (7) (1968—69 гг.) и для момента J. D. 2439648 (8) (1967 г.). Мы используем данные для 1968—69 гг., так как для этого периода кривые изменения блеска строятся наиболее уверенно. Данные эти выбраны таким образом, чтобы весь интервал изменения блеска был более или менее равномерно заполнен и чтобы уклонение соответствующих точек от средней кривой на рис. 4 было незначительно. Пунктирная прямая дает экстраполяцию наблюдаемого в сантиметровом диапазоне радиоизлучения на оптическую область. Совершенно очевидно, что, как и для других сейфертовских галактик [8], излучение, наблюдаемое в санти-

метровом диапазоне, не имеет отношения к источнику оптического синхротронного излучения, ответственного за поляризацию.

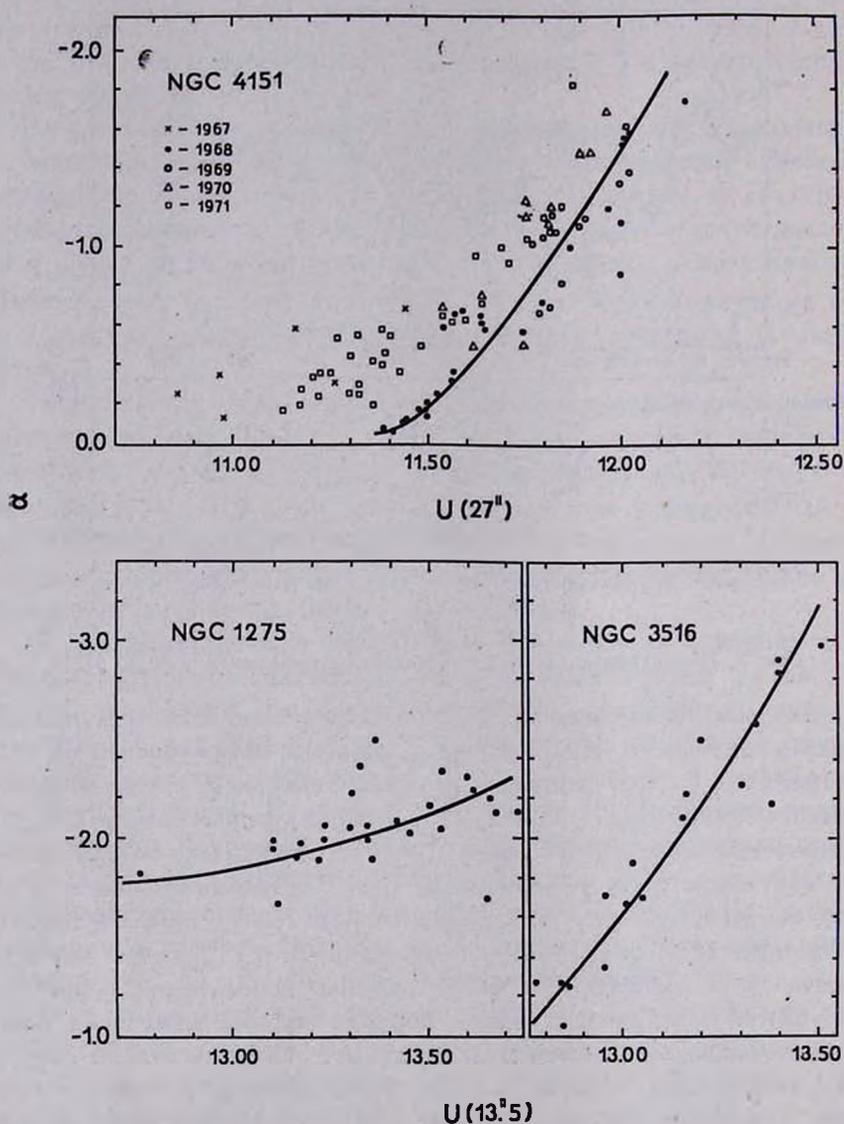


Рис. 4. Зависимость спектрального индекса дополнительного излучения от блеска в цвете U.

Нам понадобятся еще некоторые сведения из теории синхротронного излучения. Мы не будем давать здесь расчет синхротронного спектра, а воспользуемся результатами такого расчета, проведенного

Линдсом и Сандейджем [16]. На рис. 6, взятом из [16], представлены три рассчитанных синхротронных спектра, соответствующих трем значениям критической частоты  $\nu_c$  ( $3 \cdot 10^{14}$  эц,  $6 \cdot 10^{14}$  эц,  $10^{15}$  эц) и показателю в распределении электронов по энергиям  $\gamma$ , равному 1.46.

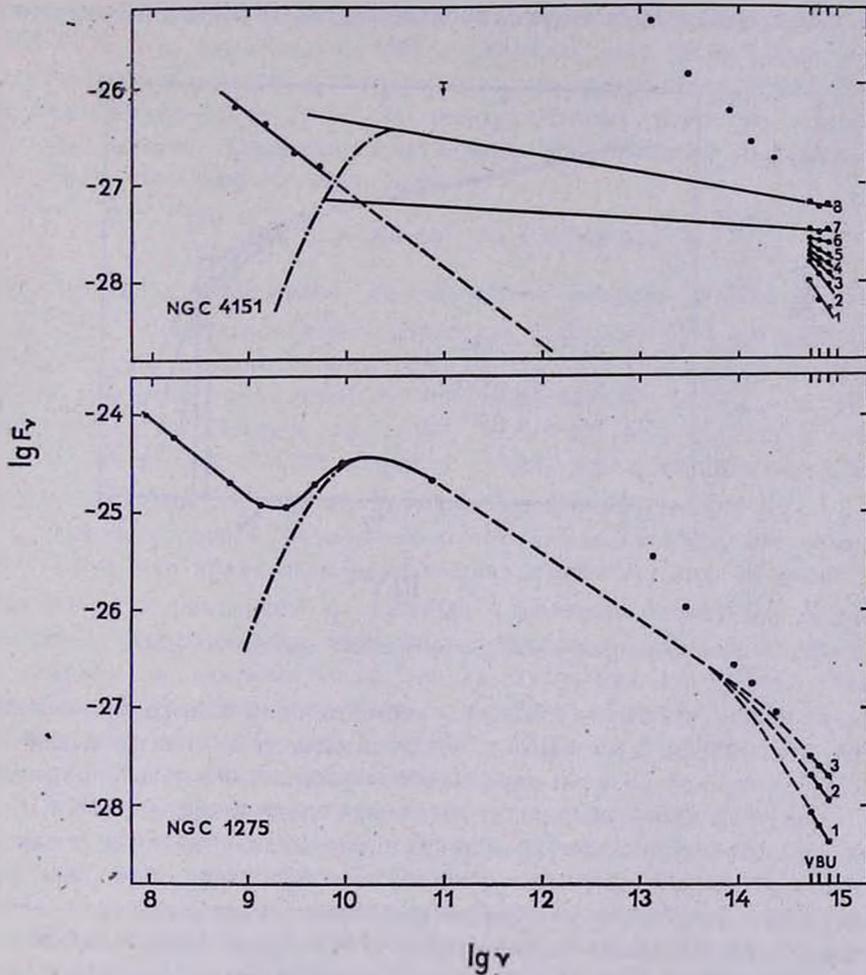


Рис. 5. Радиооптические спектры галактик NGC 4151 и NGC 1275.

$\nu_c$  определяется максимальной энергией, доставляемой ансамблем электронов,  $\nu_c = \text{const} \cdot H_{\perp} \cdot E_m^2$ . Для частот  $\nu \ll \nu_c$  наклон спектра определяется только показателем  $\gamma$  и равен  $\alpha = -(\gamma - 1)/2 = -0.23$ . Для частот же  $\nu$  одного порядка с  $\nu_c$ , подбирая значение  $\nu_c$ , можно получить в интервале частот, соответствующих оптической области, са-

мые разные значения наклона. Сравнивая рис. 5 и 6, мы приходим к выводу, что найденные нами изменения спектрального индекса могут быть объяснены изменением критической частоты  $\nu_c$  и, в конечном счете, изменением максимальной энергии электронов  $E_m$ . В противном случае мы вынуждены будем считать, что за очень короткое время происходит перераспределение электронов по энергиям,

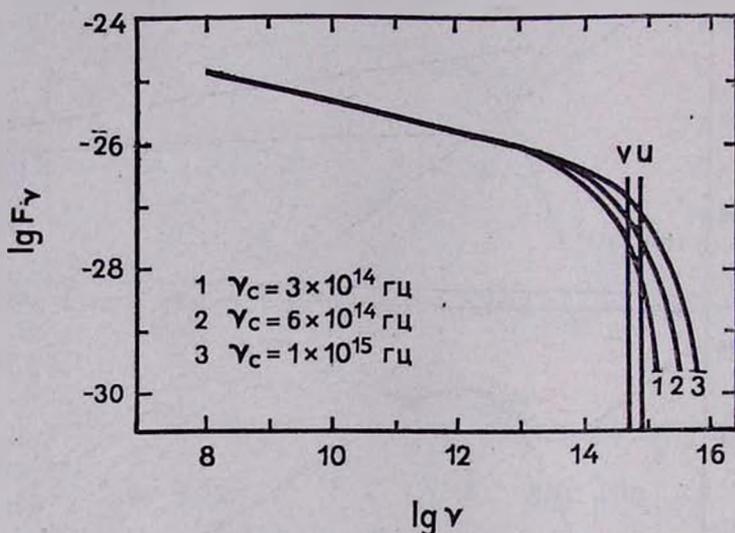


Рис. 6. Теоретические синхротронные спектры по [16].

причем около минимума блеска энергетический спектр оказывается очень крутым (для  $\alpha < -1.6$   $\gamma > 4.2$ ). Далее, если спектральный индекс в оптической области определяется показателем  $\gamma$ , это означает, что  $\nu_c$  значительно превосходит частоты оптического спектра, и мы должны экстраполировать спектр на более низкие частоты с тем же наклоном, который имеет место в оптической области. Это дает фантастические переменные потоки в области радиочастот, которые должны были бы быть зафиксированы. Нетрудно показать, что отсутствие подобного излучения в радиочастотах нельзя объяснить синхротронным самопоглощением.

Коль скоро изменения спектрального индекса объясняются изменением критической частоты  $\nu_c$ , мы должны экстраполировать оптическое синхротронное излучение на радиодиапазон с минимальным по абсолютной величине наклоном, наблюдаемым в максимуме блеска. Причем полученные экстраполяцией значения потока будут представлять собой верхнюю границу. Сплошные прямые на рис. 5 дают экс-

траполяцию наблюдаемого в максимумах 1967 и 1968 гг. синхротронного излучения на более низкие частоты. Совершенно очевидно, что изучаемое нами синхротронное излучение не имеет отношения к наблюдаемому у NGC 4151 инфракрасному избытку.

Рассмотрение рис. 5 показывает, с другой стороны, что источники оптического синхротронного излучения, наблюдавшиеся в 1968—69 гг. и, особенно, в 1967 г. должны были бы наблюдаться на сантиметровых волнах. По-видимому, они испытывают самопоглощение, что свидетельствует об их малых угловых размерах. Действительно, оценка размеров, полученная по скорости переменности ( $\tau = 10$  суток  $= 8.64 \cdot 10^5$  сек), дает

$$R \leq c\tau = 2.5 \cdot 10^{16} \text{ см} = 0.008 \text{ пс},$$

или, принимая расстояние до галактики равным 10 Мпс [17],  $6'' \leq \leq 3.2 \cdot 10^{-4}$ . Воспользовавшись известной формулой [18], дающей угловые размеры синхротронного источника, испытывающего самопоглощение, и считая, что источник, наблюдавшийся в 1967 г., не будет наблюдаться на частоте  $\lg \nu = 9.7$ , если  $\tau(\nu_1) = 1$  для  $\lg \nu_1 = 10.0$ , получаем  $\lg H/\nu_1^5 \leq -50.04$  и  $\lg H \leq -0.04$ , что дает правдоподобную оценку величины напряженности магнитного поля  $H \leq 0.9$  гс.

Знание углового размера источника позволяет оценить величину  $H/\nu_1^5$ . Ясно, что полученная величина напряженности поля  $H$  очень чувствительна к изменению  $\nu_1$ . Отсюда становится понятным наше замечание о невозможности объяснения синхротронным самопоглощением отсутствия на сантиметровых волнах излучения источников оптического синхротронного излучения с крутым спектром. Для них  $\lg \nu_1$  должен быть много больше, чем 10.0, что дает неприемлемые значения для напряженности магнитного поля.

В заключение рассмотрения данных о ядре галактики NGC 4151 сделаем несколько замечаний относительно конфигурации источника синхротронного излучения. Результаты поляриметрических наблюдений показывают, что на протяжении трех лет параметры поляризации излучения синхротронного источника не претерпели существенных изменений ( $p \approx 2.1\%$ ,  $\theta_0 \approx 95^\circ$ ). Поскольку параметры поляризации определяются геометрией источника (направлением скорости электронов и направлением магнитного поля), это означает, что геометрические характеристики источника остались неизменными, что может быть, если мы имеем дело либо с более или менее симметричным выбросом релятивистских частиц, либо с выбросом в каком-то одном определенном направлении. Для того, чтобы выяснить, какой из этих двух

механизмов более вероятно, обратимся к величине степени поляризации. Степень поляризации излучения, даваемого потоком электронов, движущихся в однородном магнитном поле, должна быть почти полной. Наблюдения же дают для значения степени поляризации всего 2%. В случае, если электроны выбрасываются в одном направлении, для появления такой значительной деполяризации необходимо, чтобы они двигались в весьма нерегулярном магнитном поле. Поскольку источник синхротронного излучения имеет малые размеры, возможность переменности этого поля на протяжении трех лет не кажется невероятной. Это могло бы привести к изменениям параметров поляризации.

С другой стороны, если имеет место симметричный выброс, деполяризация может возникать при движении электронов с самыми разными направлениями скоростей в регулярном поле. Например, в случае поля диполя деполяризация будет полной, если ось диполя расположена по лучу зрения. В случае, если поле не обладает центральной симметрией, получается остаточная поляризация, не изменяющаяся со временем. Мы считаем, что эта схема лучше соответствует результатам наблюдений ядра галактики NGC 4151.

*NGC 1275.* У ядра галактики NGC 1275 так же, как и у NGC 4151, отмечены изменения и блеска, и поляризации, поэтому естественно попытаться выяснить, связаны ли они друг с другом. Все необходимые данные приведены в табл. 3, второй и третий столбцы которой дают параметры поляризации, полученные при наблюдениях с диафрагмой 27" (по [7, 12]), а четвертый — блеск в цвете В для той же диафрагмы [4, 12]. Однако, прежде чем приступить к сопоставлению, необходимо исправить поляризационные данные за эффект межзвездной поляризации, составляющей, согласно [8], 1.1% при позиционном угле 143° (NGC 1275 — единственная из рассматриваемых галактик, расположенная поблизости от Млечного Пути, — галактическая широта ее равняется —12°). Полученные после учета межзвездной поляризации параметры поляризации приведены в пятом и шестом столбцах табл. 3.

Рассмотрение табл. 3 показывает, что направление собственной поляризации излучения ядра изменяется очень сильно, так что трудно ожидать существования корреляции между блеском и степенью поляризации, как это имело место для NGC 4151. Можно отметить, однако, что максимальная степень поляризации достигается при максимальном блеске. Это может служить аргументом в пользу того, что и у галактики NGC 1275 дополнительное излучение поляризовано. Тем

не менее поляризационные данные не позволяют получить независимую оценку минимального блеска, как это было сделано для галактики NGC 4151.

Таблица 3

| Дата наблюдения | $p$ (%) | $\theta_0$ | $B$                 | $P_{\text{собств.}}$ (%) | $\theta_{\text{собств.}}$ |
|-----------------|---------|------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|
| 4.10.67         | 2.3     | 140°       | 13 <sup>m</sup> .45 | 1.2                      | 137°                      |
| 28. 9.68        | 1.4     | 155        | 13.13               | 0.6                      | 179                       |
| 14.10.68        | 2.1     | 120        | 12.84               | 1.5                      | 106                       |
| 9.10.69         | 2.1     | 150        | 13.12               | 1.1                      | 157                       |
| 17.10.69        | 2.1     | 140        | 13.09               | 1.0                      | 137                       |
| 13.11.69        | 2.1     | 138        | 13.13               | 1.0                      | 133                       |
| 1.11.70         | 1.6     | 128        | 13.20               | 0.8                      | 108                       |

Обратимся теперь к колориметрическим данным. Табл. 4 и рис. 2 дают спектры ядра галактики NGC 1275 для диафрагмы 13.5 в минимуме и максимуме блеска и спектр дополнительного излучения при максимальном блеске, а рис. 4— зависимость спектрального индекса дополнительного излучения от блеска в цвете  $U$ . Вычисления показали, что потоки дополнительного излучения, найденные по наблюдениям с диафрагмами 13.5 и 27", систематически друг от друга не отличаются, повтому везде, где это возможно, принималось среднее из двух значений. Независимость потока дополнительного излучения от размера диафрагмы еще раз подчеркивает, что источник переменного излучения локализован в ядре (во всяком случае, размеры его меньше 13.5).

Таблица 4

|                  | $m$   | $F_{\nu}$ , $\text{вт/м}^2 \cdot \mu$ | $(\lg F_{\nu}) + 29$ | $F_{\nu}^{\text{доп}}$ , $\text{вт/м}^2 \cdot \mu$ | $(\lg F_{\nu}^{\text{доп}}) + 29$ |
|------------------|-------|---------------------------------------|----------------------|--|-----------------------------------|
| $U_{\text{max}}$ | 12.76 | $1.48 \times 10^{-28}$                | 1.170                | $1.01 \times 10^{-28}$                             | 1.004                             |
| $U_{\text{min}}$ | 14.04 | 0.457                                 | 0.660                |  |                                   |
| $B_{\text{max}}$ | 13.18 | 2.48                                  | 1.394                | $1.58 \cdot 10^{-28}$                              | 1.199                             |
| $B_{\text{min}}$ | 14.19 | 0.978                                 | 0.990                |  |                                   |
| $V_{\text{max}}$ | 12.59 | 3.63                                  | 1.560                | $2.16 \cdot 10^{-28}$                              | 1.334                             |
| $V_{\text{min}}$ | 13.50 | $1.57 \times 10^{-28}$                | 1.196                |  |                                   |

Рассмотрение рис. 2 и 4 показывает, что общий характер изменности ядра галактики NGC 1275 оказывается таким же, как у га-

лактики NGC 4151. Разница состоит в том, что изменения спектрального индекса дополнительного излучения здесь меньше, а абсолютная величина его много больше. Надо иметь в виду, однако, что приведенные нами данные не учитывают возможного существования межзвездного покраснения. Никакими прямыми сведениями о его существовании мы не располагаем, но малая галактическая широта галактики и наличие межзвездной поляризации свидетельствуют о том, что оно имеется.

Поляриметрические данные позволяют, впрочем, получить нижнюю границу для величины межзвездного поглощения. Действительно, учитывая, что максимальное значение отношения степени межзвездной поляризации к визуальному поглощению  $p_M/A_V$  равняется 0.06 [19], получаем для  $p_M = 1.1\%$ ,  $A_V \geq 0^m.4$ . Можно думать, что, приняв для  $A_V$  значение  $0^m.4$ , мы не ошибемся слишком сильно, поскольку именно в Персее, где находится NGC 1275, отношение степени межзвездной поляризации к поглощению максимально. Для нормального закона покраснения значению  $A_V = 0^m.4$  соответствует  $A_B = 0^m.53$  и  $A_U = 0^m.63$ . Ясно, что

$$\lg F'_v = \lg F_v + 0.4 A_v,$$

где  $\lg F'_v$  — поток после учета поглощения, и

$$\alpha' \approx \alpha + \frac{0.4(A_U - A_V)}{\lg v_U - \lg v_V} = \alpha + 0.50.$$

Учет межзвездного покраснения приводит к уменьшению абсолютной величины спектрального индекса на 0.5, так что в максимуме он оказывается равным  $-1.6$ , в минимуме  $-2.4$ , а для дополнительного излучения изменяется от  $-1.3$  до  $-1.8$ .

Таким образом, установлены следующие свойства источника дополнительного излучения в ядре галактики NGC 1275: а) он показывает быструю переменность — в цвете U  $0^m.9$  за 12 дней для диафрагмы 13.5 [4]; б) излучение его, по всей вероятности, поляризовано; в) он обладает не слишком крутым степенным спектром. Мы считаем, что, как и в случае NGC 4151, эти свойства источника позволяют сделать заключение о его синхротронной природе.

Однако конфигурация этого источника существенно отличается от той, которую мы имели для галактики NGC 4151. У NGC 1275 наблюдаются изменения плоскости преимущественных колебаний за время порядка двух недель (см. табл. 3). Причиной этих изменений может служить либо изменение направления движения электронов,

либо переменность магнитного поля. Несомненно, изменение направления движения электронов более вероятно. Поляриметрические наблюдения, следовательно, позволяют заключить, что в ядре галактики NGC 1275 происходят выбросы релятивистских частиц в разных направлениях. Эта схема подтверждается и спектральными наблюдениями Бербидж [20], нашедшей, что истечение газа из ядра NGC 1275 происходит в виде струй, направленных в разные стороны.

Теперь становится ясным, почему у NGC 1275 нельзя ожидать полного соответствия между изменениями блеска и степени поляризации. В случае одновременных выбросов, направленных в разные стороны, увеличение блеска может и не сопровождаться увеличением степени поляризации. Что же касается изменений, происшедших за две недели в октябре 1968 г., то легко найти, что они могут быть вызваны появлением дополнительного источника, излучение которого при изменении блеска на  $0^m29$  должно быть поляризовано на 8.1% при угле преимущественных колебаний  $102^\circ$ .

Сопоставим теперь результаты оптических наблюдений с данными радио и инфракрасных наблюдений. Радиоспектр галактики NGC 1275 представлен на рис. 5. Данные для сантиметровых волн взяты из [14], для  $\lambda = 3.4$  мм из [21]. Здесь же нанесены результаты инфракрасных наблюдений согласно [15] и исправленные за межзвездное покраснение данные для оптического синхротронного излучения, соответствующие моментам J. D. 2440237 (1), 2440540 (2) и 2440145 (3), для которых точки на рис. 4 расположены поблизости от кривой. Рис. 5 позволяет сделать следующие выводы: а) как и для галактики NGC 4151, оптическое синхротронное излучение вряд ли связано с инфракрасным избытком; б) источник, наблюдаемый на коротких сантиметровых и миллиметровых волнах (и также не связанный с источником инфракрасного излучения), вполне может обусловить оптическое синхротронное излучение (пунктирные линии); как и в случае NGC 4151, переменность оптического излучения может быть объяснена изменением максимальной энергии электронов источника.

Источник синхротронного излучения, наблюдаемый на миллиметровых и коротких сантиметровых волнах, испытывает самопоглощение. Это позволяет оценить величину напряженности магнитного поля в источнике, если есть оценка его угловых размеров. Если оптическое синхротронное излучение связывать с тем же самым источником, его размеры можно оценить по скорости переменности в оптической области спектра.

Можно считать, что характерное время переменности, как и в случае NGC 4151, составляет 10 суток ( $\tau = 8.64 \cdot 10^5$  сек). Это дает

$R \leq 0.008$  пс, что для гораздо более удаленной галактики NGC 1275 дает оценку углового размера  $\theta \leq 6.4 \cdot 10^{-5}$ . Снимая с графика рис. 5 необходимые данные ( $\alpha = -0.58$ ,  $\lg v_1 = 10.0$  и  $\lg F(v_1) = -24.54$ ), получаем

$$H \leq 10^{-5} \text{ зс.}$$

Столь малая напряженность магнитного поля в ядре галактики кажется маловероятной. По-видимому, источник, наблюдаемый в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн, не имеет непосредственного отношения к источнику оптического синхротронного излучения, который при наличии магнитного поля на миллиметровых волнах не должен быть замечен из-за самопоглощения.

*NGC 3516.* У галактики NGC 3516 зарегистрированы значительные изменения блеска (в диафрагме  $13.5''$  в цвете U) [4], изменения же поляризации невелики [7, 12] и лишь незначительно превышают ошибки наблюдений. Данные, необходимые для сопоставления изменений параметров поляризации и блеска, приводятся в табл. 5. Видно, что степень поляризации возрастает с увеличением блеска, направление же преимущественных колебаний изменяется мало. Это позволяет построить такой же график зависимости  $F_p$  от  $F$ , как и для галактики NGC 4151 (см. рис. 1), и найти степень поляризации дополнительного излучения, которая оказывается равной 2.8%.

Таблица 5

| Дата наблюдений | $p$ (%) | $\theta_0$  | $B$       | $F$ , отн. ед. | $F_p$ , отн. ед. |
|-----------------|---------|-------------|-----------|----------------|------------------|
| 5-13.6.67       | 0.0     | —           | $13^m 26$ | 1.000          | 0.000            |
| 8.6.69          | 0.4     | $150^\circ$ | 13.16     | 1.097          | 0.00439          |
| 5.2.70          | 0.6     | 176         | 13.01     | 1.259          | 0.00755          |

Как видно из рис. 1, точность полученного значения невелика, но по порядку величины оно хорошо совпадает с результатами, полученными для галактики NGC 4151.

Табл. 6 и рис. 2 дают спектры ядра галактики с диафрагмой  $13.5''$  для минимального и максимального наблюдаемого в [4] блеска и спектр дополнительного излучения при максимальном блеске. Как и для NGC 1275, поток дополнительного излучения не зависит от размера диафрагмы, поэтому здесь, а также при построении рис. 4, дающего зависимость спектрального индекса дополнительного излучения от величины U, принято среднее для диафрагм  $13.5''$  и  $27''$  значение потока.

Результаты колориметрических наблюдений также показывают, что характер переменности NGC 3516 не отличается от того, что было ранее получено для NGC 4151 и NGC 1275; поэтому можно считать, что и здесь переменность обусловлена изменением максимальной энергии электронов синхротронного источника, локализованного в ядре. Отметим еще, что у ядра NGC 3516 отмечены изменения в эмиссионном спектре, причем для объяснения некоторых деталей приходится допустить существование в ядре источника оптического синхротронного излучения [22].

Таблица 6

|                  | $m$   | $F_{\nu}$ , $\text{вт/м}^2 \cdot \mu\text{ц}$ | $(\lg F_{\nu}) + 29$ | $F_{\nu}^{\text{доп}}$ , $\text{вт/м}^2 \cdot \mu\text{ц}$ | $(\lg F_{\nu}^{\text{доп}}) + 29$ |
|------------------|-------|---|----------------------|--|-----------------------------------|
| $U_{\text{max}}$ | 12.77 | $0.147 \times 10^{-27}$                       | 1.168                | $0.089 \times 10^{-27}$                                    | 0.950                             |
| $U_{\text{min}}$ | 13.82 | 0.056   | 0.740                |  |                                   |
| $V_{\text{max}}$ | 13.13 | 0.259   | 1.414                | $0.125 \times 10^{-27}$                                    | 1.098                             |
| $V_{\text{min}}$ | 13.83 | 0.136   | 1.134                |  |                                   |
| $V_{\text{max}}$ | 12.51 | 0.392   | 1.593                | $0.153 \times 10^{-27}$                                    | 1.185                             |
| $V_{\text{min}}$ | 13.07 | $0.254 \times 10^{-27}$                       | 1.370                |  |                                   |

NGC 1068. У этой галактики отмечены лишь незначительные изменения блеска [4], изменения же степени поляризации устанавливаются более уверенно ( $p = 1.25\%$ ,  $\theta_0 = 98^\circ$  в октябре 1968 г. и  $p = 0.5\%$ ,  $\theta_0 = 104^\circ$  в октябре 1969 г.). Соответствующие значения блеска, согласно [4], составляют  $B = 11^{\text{m}}07$  и  $B = 11^{\text{m}}16$ . Поскольку направление преимущественных колебаний не изменилось, можно попробовать оценить степень поляризации дополнительного излучения. Получаем  $p = (\Delta F_p / \Delta F) \cdot 100\% = 9.5\%$ . Эта оценка, разумеется, не претендует на точность, однако она удовлетворительно согласуется с результатами Висванатана и Оука [23], которые из сопоставления зависимости поляризации от длины волны с распределением энергии в спектре ядра NGC 1068 нашли  $p = 8.1\%$ . Поэтому весьма вероятно, что отмеченные в [4] изменения блеска, лишь незначительно превышающие ошибки наблюдений, все-таки реальны.

Наличие выделенного Висванатаном и Оуком [23] нетеплового компонента излучения в ядре галактики NGC 1068 не вызывает сомнения, причем анализ поляризационных данных для инфракрасной области спектра [24, 25] позволяет утверждать, что здесь имеются два отдельных источника. На источник с плоским ( $\alpha \approx -0.3$ ) степенным спектром, наблюдаемый в видимой и ближней инфракрасной области и

показывающий поляризацию около 8%, накладывается дополнительный источник инфракрасного излучения с крутым спектром, ответственный за инфракрасный избыток. Первый источник, по всей вероятности, имеет синхротронную природу и аналогичен источникам, существование которых было нами установлено для рассмотренных ранее галактик. Высокая степень поляризации его излучения, совпадающая по порядку величины с поляризацией излучения источника, вспыхнувшего в октябре 1968 г. в NGC 1275, указывает, возможно, на то, что здесь мы имеем дело с выбросом релятивистских частиц в одном определенном направлении.

NGC 7469. Наблюдения этой галактики несколько отрывочны, но тем не менее некоторые заключения удается сделать. Согласно [4], максимальное изменение блеска ядра составляет около  $0^m5$  в цвете U для диафрагмы 13.5, и изменения блеска сопровождаются изменениями цвета. В табл. 7 и на рис. 2 приводятся спектры при максимальном и минимальном наблюдавшемся блеске. В обоих случаях спектр оказывается степенным, причем спектральный индекс уменьшается с увеличением блеска.

Таблица 7

|            | $m$   | $F_{\nu}$ , $\text{вт}/\text{м}^2 \cdot \text{ц}$ | $(\lg F_{\nu}) + 29$ |
|------------|-------|---|----------------------|
| $U_{\max}$ | 12.56 | $0.178 \times 10^{-27}$                           | 1.250                |
| $U_{\min}$ | 12.91 | 0.129   | 1.111                |
| $B_{\max}$ | 13.15 | 0.254   | 1.405                |
| $B_{\min}$ | 13.43 | 0.196   | 1.293                |
| $V_{\max}$ | 12.65 | 0.343   | 1.535                |
| $V_{\min}$ | 12.81 | $0.296 \times 10^{-27}$                           | 1.472                |

И степенной характер спектров, и значения спектральных индексов ( $-1.97$  и  $-1.56$ ) — все это очень похоже на то, что было получено для галактики NGC 4151 в максимуме блеска. Если учесть еще, что излучение ядра галактики поляризовано ( $p = 0.8\%$ ,  $\theta_0 = 0^\circ$  в октябре 1967 г. и  $p = 0.9\%$ ,  $\theta^\circ = 38^\circ$  в сентябре 1968 г. [7, 12]), то, по-видимому, можно считать, что и здесь в ядре галактики имеется источник синхротронного излучения, с переменностью которого и связаны изменения блеска.

Сопоставление поляризационных наблюдений с блеском показывает, что они получены как раз при наименьшем и наибольшем блеске, так что мы вправе ожидать изменений параметров поляризации. Поэтому весьма возможно, что полученное изменение направления пре-

имущественных колебаний реально. В этом случае конфигурация источника синхротронного излучения подобна той, которая установлена для NGC 1275, то есть в ядре NGC 7469 происходят выбросы релятивистских частиц в разных направлениях.

Проведенное здесь рассмотрение с несомненностью устанавливает, что в ядрах сейфертовских галактик действительно имеются небольшие по размерам источники синхротронного излучения, ответственные за наблюдаемую поляризацию оптического излучения и его переменность. Конфигурация этих источников может быть различной (симметричный выброс релятивистских частиц, выброс в одном или разных направлениях), а наиболее вероятный механизм переменности — изменение максимальной энергии электронов. Источники эти, по-видимому, не имеют непосредственного отношения к наблюдаемым у сейфертовских галактик инфракрасным избыткам, и из-за очень малых размеров излучение их испытывает самопоглощение на коротких сантиметровых, а возможно, и на миллиметровых волнах.

Ленинградский государственный  
университет  
Южная станция ГАИШ

## ON THE VARIABILITY OF THE OPTICAL RADIATION OF THE NUCLEI OF SEYFERT GALAXIES

M. K. BABADZHANJANTS, V. A. HAGEN-THORN, V. M. LJUTIJ

The data of spectral, photometric and polarimetric observations of the nuclei of Seyfert galaxies lead to the conclusion that in the nuclei of these galaxies there are sources of synchrotron radiation of small sizes. They are responsible for the observed variability of the optical radiation and its polarization. The variability is most probably caused by the changes of maximum energy of relativistic electrons. These sources have no immediate relation to the well-known infrared excesses. Because of the small sizes of the sources their radiation is influenced by self-absorption already in the short *cm* region.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. W. S. Fitch, A. G. Pacholczyk, R. J. Weymann, Ap. J., 150, L67, 1967.
2. T. G. Barnes, Ap. Lett., 1, 171, 1968.
3. В. М. Лютый, Астрон. цирк., № 620, 1, 1971.
4. В. М. Лютый, Астрон. ж., 49, 930, 1972.
5. M. F. Walker, A. J., 69, 684, 1964.

6. Э. А. Дибай, Н. М. Шаховской, *Астрон. цирку.*, № 375, 1966.
7. В. А. Гаген-Торн, В. А. Домбровский, *Астрон. цирку.*, № 454, 1967.
8. В. А. Домбровский, В. А. Гаген-Торн, *Астрофизика*, 4, 409, 1968.
9. В. А. Гаген-Торн, М. К. Бабаджаниянц, *Астрон. цирку.*, № 526, 1, 1969.
10. A. Kruszcwski, *Acta Astronomica*, 21, 311, 1971.
11. H. Smyth, D. Weedman, W. W. Morgan, *A. J.*, 73, 857, 1968.
12. В. А. Домбровский, М. К. Бабаджаниянц, В. А. Гаген-Торн, С. М. Гуткевич, *Астрофизика*, 7, 417, 1971.
13. H. L. Johnson, *Com. LPL*, 3, 73, 1965.
14. K. I. Kellermann, I. Pauliny-Toth, *A. J.*, 73, 874, 1963.
15. F. J. Low, D. B. Kleinmann, *Ap. J.*, 159, L165, 1970.
16. C. R. Lynds, A. R. Sandage, *Ap. J.*, 137, 1005, 1963.
17. J. B. Oke, W. L. W. Sargent, *Ap. J.*, 151, 807, 1968.
18. W. A. Dent, F. T. Haddock, *Ap. J.*, 144, 568, 1966.
19. W. A. Hiltner, *Ap. J.*, Suppl. ser., 1, 389, 1956.
20. М. Е. Бербидж, Нестационарные явления в галактиках. Симпозиум МАС № 29, Изд. АН АрмССР, 1968, стр. 140.
21. E. E. Epstein, W. G. Fogarty, *A. J.*, 73, 879, 1968.
22. S. Souffrin, *A. J.*, 73, 897, 1968.
23. N. Visvanathan, J. B. Oke, *A. J.*, 73, 853, 1968.
24. F. J. Low, D. E. Kleinmann, *A. J.*, 73, 868, 1968.
25. A. Kruszcwski, *A. J.*, 73, 852, 1968.