

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 10

ФЕВРАЛЬ, 1974

ВЫПУСК 1

ОБЗОРЫ

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В. А. ГАГЕН-ТОРН

1. *Введение.* Первые поляризационные наблюдения спиральных туманностей были выполнены еще до установления их внегалактической природы и имели целью проверить, не является ли их излучение рассеянным излучением ядра (в этом случае должна наблюдаться радиальная поляризация). В 1912 г. Рейнольдс [1], проведя фотографические наблюдения в ньютоновском фокусе 26" рефлектора, нашел, что излучение спиральной туманности NGC 4826 поляризовано. Этот результат, однако, вызывал сомнения, поскольку не был произведен учет инструментальной поляризации, которая должна была появиться при отражении от диагонального зеркала. И действительно, дальнейшие более тщательные наблюдения Грина [2] его не подтвердили. Отсутствие поляризации было использовано Кёртисом [3] в качестве одного из аргументов в пользу внегалактической природы спиральных туманностей. Результаты Грина были подтверждены Мейером [4], который в 1920 г. опубликовал результаты поисков поляризации излучения в туманностях разных типов. Ни у одной из шести исследовавшихся им спиральных туманностей не было найдено поляризации, превышавшей ошибки наблюдений (которые составляли около 10 %). Аналогичный результат был получен для эллиптической туманности M 32.

В 1924—1925 гг. Хаббл [5], разложив на звезды спиральные рукава нескольких туманностей, окончательно доказал их внегалактическую природу, в связи с чем интерес к поляризационным на-

блюдениям спиральных туманностей заметно уменьшился. Следующая работа, посвященная этому вопросу, появилась лишь в 1935 г. Многочисленные неудачные попытки разложить на звезды эллиптические галактики побудили Смита [6] повторить поиски радиальной поляризации в М 32, улучшив методику наблюдений. Так же, как и Мейер, Смит получил отрицательный результат — в пределах точности его наблюдений (около 2%) поляризации не было найдено.

Таким образом, к началу 40-х годов, по существу, не было никаких данных о присутствии поляризации в излучении внегалактических объектов. Что же касается объектов нашей Галактики, то их поляризационные исследования, выполненные в конце 30-х — начале 40-х годов и, в особенности (в связи с внедрением в поляризационные наблюдения высокоточной фотоэлектрической методики), в конце 40-х — начале 50-х годов, дали интересные результаты. Это во многом способствовало развитию поляризационных исследований внегалактических объектов.

2. Основные направления поляризационных исследований.

а) В конце 30-х годов у нескольких светлых туманностей с непрерывным спектром была найдена радиальная поляризация, подтверждающая их отражательный характер. В целом ряде галактик имеются пылевые облака, в которых может происходить рассеяние света. Поляризационное излучение областей, содержащих эти облака, представляет несомненный интерес для сопоставления свойств пылевой материи этих галактик с пылевой составляющей нашей Галактики.

Поиски поляризации в области темных заливов в туманности Андромеды были предприняты в 1934 г. Эманом [7], сконструировавшим для этой цели специальный поляриграф. В северо-западной части туманности в районах пылевых включений была найдена заметная поляризация излучения. В двух областях, удаленных от ядра на 5.3 и 2.7, степень поляризации p оказалась равной 6.2 и 1.3%, соответственно, а направление преимущественных колебаний электрического вектора совпало с направлением на ядро галактики („отрицательная“ поляризация). В области, расположенной в 15" от ядра, была найдена противоположно направленная, „положительная“ поляризация ($p = 3.3\%$). Эман считал, что поляризация возникает при рассеянии излучения ядра в пылевых облаках. Ему удалось подобрать такое пространственное расположение облаков, что и положительная, и отрицательная поляризации оказались объясненными. При этом использовалась фазовая кривая для сферических частиц диаметром 0.2 μ .

б) В конце 40-х годов было обнаружено явление межзвездной поляризации, заключающееся в том, что пылевые облака, которые состоят из асимметричных ориентированных частиц, вносят поляризацию в проходящее излучение. Это вызвано более сильным поглощением излучения с электрическим вектором, направленным вдоль больших осей частиц. Поэтому прошедший свет оказывается линейно поляризованным с направлением электрического вектора, параллельным их малым осям. Наиболее вероятным механизмом ориентации сейчас признается механизм Дейвиса-Григштейна, согласно которому вращающиеся парамагнитные частицы выстраиваются магнитным полем так, что их малые оси располагаются вдоль магнитных силовых линий. Наблюдаемое направление электрического вектора дает, следовательно, направление магнитного поля. Мерой поляризующей способности пылевых облаков может служить отношение p/A_V , где A_V — полное визуальное поглощение. Поляризующая способность определяется, в частности, степенью ориентации частиц, которая, в свою очередь, зависит от напряженности магнитного поля. На основании поляризационных наблюдений звезд нашей Галактики было установлено, что в спиральных рукавах имеются крупномасштабные магнитные поля напряженностью 10^{-5} — 10^{-6} гс, направленные вдоль рукавов.

Открытие межзвездной поляризации повысило интерес к поляризационному изучению галактик, где этот эффект также мог быть обнаружен. Его поискам и изучению посвящено довольно много работ, которые мы обсудим в следующем разделе. Здесь отметим еще, что существование межзвездной поляризации усложняет исследование собственной поляризации излучения небесных объектов, поскольку наблюдаемая поляризация оказывается суммой собственной и межзвездной. Межзвездная поляризация особенно велика в зоне Млечного Пути и быстро уменьшается с удалением от плоскости Галактики. Внегалактические объекты, как известно, избегают зоны Млечного Пути, однако для галактик, расположенных на низких галактических широтах, учет межзвездной поляризации необходим.

в) В 1953 г. была выдвинута гипотеза о синхротронной природе оптического непрерывного излучения Крабовидной туманности. В случае однородного магнитного поля синхротронное излучение почти полностью поляризовано с направлением электрического вектора, перпендикулярным направлению магнитного поля. Выполненные с целью проверки этой гипотезы поляризационные наблюдения Крабовидной туманности показали, что в отдельных её участках степень поляризации в непрерывном спектре превышает 50 %, и подтвердили тем самым его синхротронную природу.

Существование подобных объектов в других галактиках вполне возможно. Поэтому, когда радиисточник Дева А был отождествлен с эллиптической галактикой М 87, в которой было найдено несколько голубых конденсаций, Шкловский [8] интерпретировал их как выброс из ядра галактики и указал на возможную синхротронную природу их излучения. Бааде [9] получил снимки галактики в поляризованном свете. В трех конденсациях была обнаружена сильная поляризация, причем направление электрического вектора у разных конденсаций оказалось различным. Пластинки не фотометрировались, но, согласно глазомерным оценкам Бааде, степень поляризации достигала 30%. Фотоэлектрические наблюдения струи в М 87 были выполнены Хильтнером [10] с двухканальным поляриметром. Было подтверждено различное направление магнитного поля в разных конденсациях, но степень поляризации при усреднении по площадкам диаметром 2" получилась около 12%.

Поскольку синхротронное излучение поляризовано (очень сильно, даже небольшой вклад его в суммарное излучение дает ощутимую поляризацию). Поэтому поляриметрические наблюдения оказываются очень ценными при поисках синхротронного излучения, присутствие которого весьма вероятно, например, в ядрах некоторых галактик. Не всегда, конечно, найденная поляризация свидетельствует о существовании оптического синхротронного излучения, но если её удастся связать с ним, это позволяет сразу же сделать некоторые заключения о физических условиях в объекте — о присутствии высокоэнергичных электронов, о наличии магнитного поля и его направлении.

3. Поляризационное изучение пылевой материи в галактиках. Уже вскоре после обнаружения межзвездной поляризации были сделаны попытки наблюдения аналогичного эффекта в других галактиках. Наиболее удобными объектами для этого несомненно являются видимые с ребра галактики, которые пересечены полосами темной материи. В 1951 г. Пейдж [11] фотоэлектрически наблюдал одну из таких галактик — NGC 4594. Из-за несовершенства аппаратуры точность наблюдений была невысокой, и Пейджу удалось установить только, что степень поляризации в темной полосе не превышает 4%.

В том же году Эльвиус [12] опубликовала результаты фотографических поляризационных наблюдений спиральной галактики NGC 5055, выполненных с поляриграфом Эмана. В темных заливах по обе стороны от ядра (плоскость галактики значительно наклонена к лучу зрения) была найдена поляризация с электрическим вектором, направленным вдоль темных полос. Степень поляризации составляла от 3.5% до 7.5%. Рассмотрев две возможности возникновения поляризации — при рассеянии на пыли излучения ярких центральных частей и при селек-

тивном по отношению к плоскости колебаний поглощения света, Эльвиус пришла к заключению, что в NGC 5055 наблюдается эффект, аналогичный эффекту межзвездной поляризации в нашей Галактике.

Несколько иные результаты были получены Эльвиус [13] для спиральной галактики NGC 7331, наблюдавшейся также с помощью поляриграфа. Если поляризация излучения на слабой стороне ничем не отличалась от того, что было получено для NGC 5055, то на яркой стороне была обнаружена противоположно направленная поляризация, степень которой составляла в среднем 2%. Эльвиус интерпретировала её как возникающую при рассеянии излучения ядра пылевыми частицами. При малых углах рассеяния в случае вытянутой индикатрисы количество рассеянного света может оказаться значительным и обусловить увеличение яркости более близкой стороны галактики. Если частицы асимметричны и ориентированы магнитным полем так же, как на удаленной стороне галактики, направление поляризации рассеянного света будет совпадать с наблюдаемым.

Почти все дальнейшие работы, связанные с изучением поляризации во внегалактических объектах, выполнены фотозлектрически. Это вполне понятно, так как поляризационные эффекты, как правило, невелики, а результаты фотографических наблюдений могут быть искажены трудно учитываемыми систематическими ошибками. Печального упоминания достойны, например, работы Вашакидзе [14—16], который, используя несовершенную фотографическую методику, нашел в ряде галактик поляризацию, достигающую 30%. Работы Эмана и Эльвиус, выполненные очень тщательно и использующие обширный наблюдательный материал, по-видимому, также не свободны от систематических ошибок, связанных с отсутствием учета поляризации фона неба. Во всяком случае, Хильтнер [17], наблюдавший фотозлектрически, не подтвердил существования „отрицательной“ поляризации в темных облаках к северо-западу от ядра туманности Андромеды.

Первые фотозлектрические наблюдения внегалактических туманностей (если не считать неудачной попытки Пейджа [11]) были выполнены Домбровским [18] в 1956 г. Размер диафрагмы составлял 2' и ошибка в определении степени поляризации не превосходила 1%. Из всех наблюдавшихся галактик лишь у NGC 3034 была найдена поляризация около 2% с электрическим вектором, параллельным большой оси галактики. Результаты Домбровского определенно не подтвердили результатов работ [14—16]. Большой размер диафрагмы не позволил, однако, изучить отдельные детали в галактиках.

В 1964 г. Эльвиус и Холл [19] опубликовали для целого ряда галактик результаты электрополяриметрических наблюдений, выполненных с сравнительно малыми диафрагмами (27" и 40"). Ошибка в оп-

ределении степени поляризации составляла около 0.5%. Значительная поляризация была обнаружена в районе темной полосы, пересекающей эллиптическую галактику NGC 5128 (Сен А). После учета галактической межзвездной поляризации, найденной по наблюдениям далеких звезд нашей Галактики, оказалось, что степень собственной поляризации в районе полосы достигает 4%, а направление электрического вектора совпадает с направлением полосы. В областях, расположенных вне полосы, поляризации найдено не было. Таким образом, связь поляризации с пылевой материей не вызвала сомнений, и Эльвиус и Холл, приняв во внимание направление поляризации, заключили, что в NGC 5128 присутствует явление, аналогичное явлению межзвездной поляризации в нашей Галактике. Высокая степень поляризации говорит о весьма регулярном характере магнитного поля, направленного вдоль пылевых облаков, образующих темную полосу.

Поляризация, имеющая такое же происхождение, была найдена и в отдельных областях нескольких других галактик (NGC 224, NGC 3031, NGC 5195), хотя степень поляризации там оказалась меньше (1.0 — 2.5%). В спиральной галактике NGC 4565, видимой почти точно с ребра, в районе темной полосы поляризации найдено не было, что может указывать, например, на отсутствие регулярного магнитного поля.

В дальнейшем появились ещё две работы, посвященные поляризации. Аппенцеллер [20] провел электрополяриметрические наблюдения темных областей в галактиках NGC 3031 и NGC 5194, видимых под большим углом, и в исследовавшейся ранее Пейджем галактике NGC 4594, видимой с ребра. В первых двух галактиках в ряде областей была найдена поляризация около 1%, но направление её далеко не всегда совпадало с направлением темных полос. Поэтому Аппенцеллер считает, что эта поляризация объясняется присутствием в пылевых облаках рассеянного света ядра. В NGC 4594 на сей раз в полосе была обнаружена поляризация около 1% с электрическим вектором, направленным вдоль полосы. Ясно, что она вполне аналогична галактической межзвездной.

Такой же эффект был обнаружен Гаген-Торном [21] у наблюдаемой с ребра галактики NGC 7814. Фотоэлектрические наблюдения показали, что в районе полосы имеется заметная поляризация (от 1.7 до 2.6%) с направлением, совпадающим с направлением полосы. Было установлено, что степень поляризации уменьшается вдоль полосы с удалением от центра галактики. Именно такая картина должна наблюдаться, если частицы ориентированы в соответствии с механизмом Дейвиса-Гринштейна, поскольку в центре галактики луч зрения перпендикулярен силовым линиям магнитного поля, а на краях скользит вдоль них. Из рассмотрения давних работы [19] следует, что в темной полосе галактики

NGC 5128 также наблюдается уменьшение степени поляризации с удалением от центра галактики.

Таким образом, в результате поляризационных наблюдений отдельных областей галактик, выполненных в площадках размером в несколько десятков секунд дуги, было надежно установлено существование в других галактиках собственной межзвездной поляризации.

Для близких галактик, в которых удается выделить отдельные объекты, изучение собственной межзвездной поляризации может быть проведено более подробно с использованием всего хорошо разработанного аппарата исследования галактической межзвездной поляризации. Весьма подходящими для этой цели объектами являются шаровые скопления, излучение которых само по себе не должно быть поляризованным, а светимости заметно превышают светимости отдельных звезд. Электрополяриметрические наблюдения шаровых скоплений в М 31, достаточно хорошо изученных фотометрически, были проведены Хильтнером [17]. У нескольких из них была найдена поляризация. После внесения исправлений за незначительную галактическую межзвездную поляризацию, оказалось, что направление электрического вектора почти во всех случаях параллельно направлению расположенных поблизости темных заливов, а среднее значение отношения степени поляризации к поглощению, p/A_V составляет 0.03 в хорошем согласии с данными для удаленных ОВ-звезд нашей Галактики ($\overline{p/A_V} = 0.028$). Поскольку поляризующая способность пылевых облаков в М 31 не отличается от найденной для нашей Галактики, можно считать, что и свойства пылевых частиц и характер магнитного поля в спиральных рукавах М 31 аналогичны галактическим.

В ближайших к нам галактиках, Магеллановых Облаках, без особого труда удастся выделить отдельные звезды-гиганты и сверхгиганты. Для 30 звезд Большого Магелланового Облака (БМО) результаты поляризационных наблюдений были опубликованы в 1966 г. Висванатаном [22]. Галактическая межзвездная поляризация в направлении БМО, определенная по наблюдениям 5 далеких звезд нашей Галактики, оказалась малой. Было найдено, что у звезд БМО направление поляризации следует деталям БМО, представляющего собой пересеченную спираль, наблюдаемую анфас. У звезд, расположенных в области перемычки, электрический вектор параллелен ей; в области же рукавов — их направлению. Зависимость поляризации от длины волны и максимальное значение p/A_V оказались такими же, как для галактической межзвездной поляризации. Поэтому поляризация излучения звезд БМО была сочтена собственной межзвездной поляризацией БМО, и направление её было отождествлено с направлением магнитного поля. Среднее

значение $\overline{p/A_V}$ оказалось равным 0.05 — больше, чем в нашей Галактике (0.028). Это легко понять, потому что БМО расположено таким образом, что луч зрения всегда перпендикулярен направлению магнитного поля. Напряженность поля была оценена в $3 \cdot 10^{-5}$ гс.

Висванатан выполнил также несколько наблюдений протяженных областей БМО диаметром 20" и не нашел в них поляризации, превышающей 1%. Это совершенно определено не подтвердило результатов вышедшей в 1962 г. работы Уолстенкрофта [23], который, наблюдая фотоэлектрически, нашел, что интегральное излучение БМО поляризовано примерно на 30% (!). Результат этот говорит только о том, что не следует вести поляризационные наблюдения с экспедиционным оборудованием, как это делал Уолстенкрофт.

В 1970 г. одновременно появились работы Мэтьюсона и Форда [24, 25] и Шмидта [26], посвященные поляризационному исследованию Магеллановых Облаков. Мэтьюсон и Форд получили наблюдения большого числа отдельных звезд, Шмидт же, уделив наблюдениям звезд меньше внимания, сделал упор на поверхностную электрополяриметрию. Им было найдено, что при усреднении по площадке диаметром 10', степень поляризации нигде не превосходит 2%. Выводы, сделанные в обеих работах, полностью совпадают. Для БМО подтверждены результаты Висванатана; найдено, что Магеллановы Облака связаны крупномасштабным магнитным полем; в области эмиссионного комплекса 30 Dor в БМО имеется локальное магнитное поле большей напряженности.

В заключение раздела перечислим основные достижения поляризационных исследований пылевой составляющей галактик:

а) Обнаружены пылевые облака, которые, подобно галактическим отражательным туманностям, светятся, рассеивая излучение ядерных областей галактик.

б) Установлено существование собственной межзвездной поляризации в других галактиках.

в) Найдено почти полное сходство её с галактической межзвездной поляризацией, из чего следует, что свойства пылевых частиц, а также напряженность магнитных полей в галактиках и их направление относительно спиральных рукавов примерно такие же, как в нашей Галактике.

г) Доказано существование межгалактического магнитного поля, связывающего Магеллановы Облака.

4. *Поляризационное изучение пекулярной галактики М 82.* Пекулярная галактика М 82 (NGC 3034) во многих отношениях представляет собой уникальный объект, в частности по своим поляриза-

ционными характеристикам. В разделе 3 уже указывалось, что существование поляризации в её излучении удалось обнаружить даже при наблюдениях с диафрагмой диаметром 2' [18]. Этот результат был подтвержден дополнительными наблюдениями [27], однако никаких определенных заключений из-за ограниченности наблюдательного материала сделано не было. Работы [18, 27] остались, по-видимому, незамеченными.

В 1961 г. Линдс [28], построив в интервале 0.158—3.2 Гц радиоспектр источника 3С 231, отождествленного им с галактикой М 82, нашел, что он такой же плоский (спектральный индекс $\alpha = -0.23$), как у Крабовидной туманности. Линдс указал на возможное присутствие в М 82 оптического синхротронного излучения и подчеркнул, что обнаружение поляризации оптического излучения М 82 могло бы подтвердить это его предположение.

В 1962 г. Эльвиус [29], выполнив фотоэлектрические наблюдения с диафрагмами 27" и 40", нашла, что излучение периферийных областей М 82 очень сильно поляризовано. Степень поляризации возрастает с удалением от центра галактики и особенно велика (до 16%) в направлении малой оси. Электрический вектор примерно перпендикулярен направлению на центр галактики. Эльвиус отвергла возможность объяснения найденной ею поляризации присутствием оптического синхротронного излучения на том основании, что радиопоток от М 82 на два порядка меньше, чем от Крабовидной туманности и, следовательно, поток оптического синхротронного излучения должен быть тоже меньше в 100 раз. Но в оптическом диапазоне потоки от обоих объектов примерно равны, и синхротронное излучение, даже если оно полностью поляризовано, не может дать в интегральном излучении галактики поляризации больше 1%. Из результатов же наблюдений следует, что интегральное излучение М 82 поляризовано не меньше, чем на 3% (обращает на себя внимание согласие этой оценки с результатами работы [27]). Эльвиус объяснила найденную ею поляризацию рассеянием излучения ярких центральных частей галактики в пылевых облаках, составляющих гало галактики. Она отметила, что существование волокон в периферийных областях, возможно, свидетельствует о наличии общего магнитного поля галактики типа диполя. В этом случае асимметричные пылевые частицы должны ориентироваться этим полем так, что их малые оси будут направлены на центр галактики. Излучение, рассеиваемое такими частицами, должно быть сильно поляризовано с направлением электрического вектора, совпадающим с наблюдаемым.

Иной точки зрения на объяснение найденной Эльвиус поляризации придерживались Линдс и Сандейдж [30]. Основанием для этого послужили их спектральные и фотометрические наблюдения, резуль-

таты которых мы коротко изложим. На спектрограммах, полученных с щелью, расположенной вдоль малой оси галактики, в области, где наблюдается высокая степень поляризации, были обнаружены эмиссионные линии (H_{α} , [N II] и др.), не перпендикулярные к направлению дисперсии. Поскольку ранее по изучению абсорбционного спектра галактики было установлено, что она вращается вокруг малой оси, существование наклона линий было объяснено движением газовых масс от центра галактики со скоростями порядка 1000 км/сек . Иными словами было сделано заключение о взрыве в ядре M 82. Прямые снимки с интерференционным H_{α} фильтром показали, что волокнистая структура простирается на большие расстояния от плоскости галактики. Было найдено, что волокна дают также непрерывное излучение, и получена оценка потока этого излучения в оптической области.

Линдс и Сандейдж считали, что волокна связаны с магнитными полями, а их непрерывное излучение имеет синхротронную природу, причем обусловлено релятивистскими электронами, выброшенными при взрыве и движущимися в этих полях. Экстраполяция радиоспектра на оптическую область дала значение потока, согласующееся с их оценкой. Поляризация приписывалась синхротронному излучению волокон. Поскольку волокна в большинстве своем направлены радиально, направление электрического вектора, которое должно быть перпендикулярно направлению поля, оказывается как раз таким, какое было найдено Эльвиус.

В 1964 г. Сандейдж и Миллер [31] опубликовали полученные с помощью суммирования негативов фотографии M 82, на которых были выявлены самые удаленные волокна. Сравнение фотографий, снятых в лучах H_{α} и в непрерывном спектре, показало, что в галактике имеются волокна, излучающие только в непрерывном спектре. Сопоставление же снимков, полученных с поляридом, плоскость пропускания которого в одном случае совпадала с направлением малой оси, а в другом — была ей перпендикулярна, привело Сандейджа и Миллера к заключению о присутствии во внешних волокнах почти полной поляризации в непрерывном спектре, поскольку на первом снимке волокна были практически незаметны. Естественно, что почти полная поляризация была использована в качестве аргумента в пользу синхротронной природы излучения волокон.

Вскоре, однако, были выполнены новые наблюдения в радиодиапазоне, поставившие под сомнение существование оптического синхротронного излучения в волокнах. Дент и Хаддок [32] нашли, что в области 8 Гц радиоспектр 3C 231 становится более крутым. В 1966 г. Эльвиус в докладе на симпозиуме МАС № 29 [33] отметила, что

теперь уже экстраполяция радиоспектра на оптическую область дает поток, недостаточный для объяснения наблюдаемой поляризации. В докладе Шейкшфта [34] было указано, что радиисточник 3С 231, вообще, локализован в центральной части М 82, так что радиоизлучение от волокнистой структуры должно быть уменьшено еще как минимум на порядок. Таким образом, один из основных аргументов Линдса и Сандейджа — возможность экстраполяции радиоспектра на оптическую область — оказался несостоятельным. Эльвиус отметила также, что в одном из участков волокнистой структуры, где волокна направлены, грубо говоря, перпендикулярно малой оси, направление колебаний электрического вектора совпадает с направлением волокон. Этого не должно быть, если волокна следуют направлению магнитного поля и светятся за счет синхротронного излучения. В случае же рассеяния должно наблюдаться как раз такое направление колебаний. Эльвиус, по-прежнему, настаивала на возникновении поляризации при рассеянии на пыли.

В 1968 г. Гаген-Торн [35] опубликовал результаты фотографических поляризационных наблюдений М 82. Была осуществлена привязка к фотовольтрическим данным Эльвиус [29], так что систематические ошибки в определении степени поляризации не превышали 3%, случайные же могли достигать в области слабосветящихся волокон 15—20%. Внешние волокна не были изучены, но в измеренных участках, включающих внутреннюю часть волокнистой структуры, степень поляризации нигде не превышала 30—35%. Было отмечено, что из-за крайней слабости внешних волокон Сандейдж и Миллер вполне могли принять поляризацию порядка 50% за полную. В области отдельных волокон не было замечено увеличения степени поляризации, как это должно было бы быть, если бы они светились за счет синхротронного излучения. Автор пришел к заключению, что поляризация возникает при рассеянии и указал, что наряду с рассеянием на пыли, некоторую роль может играть рассеяние на свободных электронах, которые должны присутствовать в области волокон, светящихся в H_α .

В 1969 г. появились еще три работы, посвященные поляризационному изучению М 82. Золингер [36] пришел к заключению, что одно лишь рассеяние света ядра свободными электронами (независимо от присутствия пыли) может объяснить наблюдаемую поляризацию. Появление свободных электронов он связал с прохождением ударной волны, возникшей при взрыве в ядре галактики. Эльвиус [37], наблюдая со сканирующим фотовольтрическим поляриметром, не нашла увеличения степени поляризации в сильном волокне, расположенном

в северной части галактики. Сандейдж и Висванатан [38] привели результаты фотоэлектрических поляризационных наблюдений весьма удаленных волокон. Не зная о результатах новых радионаблюдений, они по-прежнему считали излучение волокон синхротронным и использовали свои наблюдения для получения картины распределения магнитных полей во внешних частях М 82. В примечании при корректуре они указали, правда, что их наблюдения не противоречат гипотезе о возникновении поляризации при рассеянии на свободных электронах. Появление этого примечания было вызвано тем, что они ознакомились с работой Золингера [36], который использовал данные работ [32, 34].

Абсолютно неожиданный результат был получен Висванатаном в 1970 г. В предварительном сообщении [39] он указал, что при выполнении поляризационных наблюдений в H_{α} , в области волокон была найдена поляризация, не отличающаяся от поляризации в непрерывном спектре. Это сразу же поставило крест на гипотезе о синхротронной природе излучения волокон. В [39] Висванатан соглашается с тем, что поляризация во внешних областях М 82 объясняется рассеянием.

Обнаружение поляризации H_{α} -излучения волокнистой структуры имеет, однако, гораздо более глубокие последствия и, возможно, заставит пересмотреть представление об М 82 как о взрывающейся галактике. Равенство степени поляризации излучения в непрерывном спектре и в H_{α} указывает на отсутствие собственного H_{α} -излучения волокнистой структуры. В связи с этим возникают очень серьезные трудности с объяснением поля скоростей в М 82 [40—42]. Если бы вещество волокон было выброшено при взрыве и двигалось от ядра, то на спектрограммах, полученных при положении щели спектрографа вдоль малой оси галактики, был бы замечен излом линии H_{α} , тогда как наблюдается ее наклон. Наклон этот в свете поляризационных наблюдений уже нельзя интерпретировать как следствие движения вещества от ядра галактики. Сандерс и Баламор [40] считают, что в М 82, возможно, имеют место движения, аналогичные движению газовых облаков, наблюдаемых в нашей Галактике в высоких галактических широтах (выброс под углом к плоскости галактики и последующее падение вещества в область галактического диска); Хеккаторн [41] пытается объяснить наклон линии вращением рассеивающего вещества; Эльвиус [42] делает довольно искусственное, на наш взгляд, предположение о том, что М 82 при своем движении встретилась с гигантским пылевым облаком и частично вовлекла его в движение. Авторы [40, 41] так же, как и Эльвиус, считают, что рассеивающим веществом является пыль, а не свободные электроны. Основанием для этого служит узость линии H_{α} . Если бы рассеяние про-

исходило на свободных электронах, так или иначе выброшенных из ядра галактики, то дисперсия скоростей в электронном облаке была бы значительной, что привело бы к расширению линии H_2 .

В 1972 г. Висванатан и Сандейдж [43] опубликовали работу, в которой сообщаются результаты новых поляризационных и фотометрических наблюдений М 82 и подводятся некоторые итоги ее исследования. В прямом фокусе 200" телескопа были получены дополнительные поляризационные наблюдения нескольких областей, выбранных таким образом, чтобы направление волокон в них возможно больше отличалось от радиального. Ранее мы отмечали, что Эльвиус [33] уже нашла для одной из областей во внутренней части волокнистой структуры поляризацию, направленную вдоль волокон. Новые наблюдения Висванатана и Сандейджа, относящиеся к самым внешним волокнам, также показали, что направление колебаний не перпендикулярно направлению волокон (как это должно быть в случае присутствия синхротронного излучения), но вполне согласуется с гипотезой о возникновении поляризации в непрерывном спектре при рассеянии.

Висванатан и Сандейдж приводят далее результаты поляризационных наблюдений в H_2 , выполненных в 1970 г. для одного из волокон с помощью многоканального спектрометра в касегреновском фокусе 200" телескопа. В канале, центрированном на H_2 , было получено $p = 27 \pm 3\%$, $\theta_0 = 50 \pm 3^\circ$; значения же параметров поляризации в непрерывном спектре, найденные как среднее для двух соседних каналов, оказались $p = 25 \pm 5\%$, $\theta_0 = 50 \pm 5^\circ$ (в хорошем согласии с результатами наблюдений этой области, полученными в прямом фокусе 200" телескопа). Излучение H_2 составляло около 85% общего излучения, регистрируемого в канале, центрированном на H_2 . На основании этих данных делается естественное заключение о свечении волокон и в H_2 , и в непрерывном спектре за счет рассеяния излучения ядерных областей.

Авторы указывают еще на два обстоятельства, подтверждающие этот вывод. Первое — это хорошее согласие эквивалентной ширины H_2 , найденной ими для области волокон ($W = 220 \text{ \AA}$), с эквивалентной шириной ее в центральной части М 82 по оценке Пеймберта и Спинрада [44] ($W = 270 \text{ \AA}$). Второе — неизменность отношения интенсивностей $I_{H_2}/I_{[III]}$ в разных участках волокнистой структуры (1.80 ± 0.4) и совпадение его с соответствующим отношением для центра М 82 (1.86 [44]). Отмечается также, что противоречащий гипотезе о рассеянии результат работы Сандейджа и Миллера [31] о существовании волокон, светящихся только в непрерывном спектре, как удалось установить при повторном тщательном просмотре пластинок, неверен — в непрерывном спектре и в H_2 светятся одни и те же волокна.

Для выяснения, что же именно рассеивает излучение ядра — пыль или свободные электроны — была изучена зависимость $p(\lambda)$ в интервале $3585 \text{ \AA} < \lambda < 8000 \text{ \AA}$. Были найдены параметры поляризации по данным всех 13 каналов, использовавшихся при наблюдениях с многоканальным спектрометром. Оказалось, что в пределах ошибок ни степень поляризации, ни ее направление не зависят от длины волны. Поскольку у галактических отражательных туманностей степень поляризации возрастает с увеличением λ , Висванатан и Сандейдж заключают, что рассеивающие частицы не могут быть пылевыми (либо они должны быть очень крупными). Распределение энергии в двух волокнах, найденное авторами [43], очень хорошо согласуется с предсказанным О'Коннеллом [45] по абсорбционному спектру центральной части М 82, а также с полученным из наблюдений для центра М 82 после внесения поправки за поглощение $A_V = 2.78$. Это указывает на нейтральность рассеяния света в волокнах. Висванатан и Сандейдж считают поэтому, что рассеяние происходит на свободных электронах. Массу их в гало они оценивают в $2 \cdot 10^4 M_\odot$.

Висванатан и Сандейдж заканчивают статью перечислением трудностей, с которыми встречается гипотеза о рассеянии излучения ядра свободными электронами. Основная из них состоит в том, что неясно, как попали в гало свободные электроны, поскольку поле скоростей не подтверждает движения рассеивающих частиц от центра галактики. Узость линии H_α ($\sim 6 \text{ \AA}$) указывает на дисперсию скоростей, равную 300 км/сек , что соответствует электронной температуре $T_e < 6000 \text{ }^\circ\text{K}$. Отсутствие рекомбинационного излучения в волокнах, которое должно было бы быть при таких температурах, говорит о том, что в них нет протонов. Совершенно непонятно, как могла сложиться такая ситуация.

Трудности эти настолько серьезны, что, на наш взгляд, преждевременно отказываться от возможности объяснения свечения волокон рассеянием на пыли, тем более, что сейчас, по-видимому, нет наблюдательных фактов, свидетельствующих против рассеяния на крупных пылинках. Проблему свечения волокнистой структуры в М 82 никоим образом нельзя считать решенной.

В самое последнее время появилась работа [46], авторы которой указывают, что поляризованное H_α -излучение может испускаться самими волокнами (что снимает трудности, связанные с полем скоростей) в результате возбуждения водородных атомов направленным L_α -излучением ядра. В случае М 82 геометрия такова, что степень поляризации может достигнуть приблизительно 30%, а направление колебаний будет совпадать с наблюдаемым. Недостатком предложен-

ной модели является необходимость привлечения какого-то иного механизма для объяснения точно такой же по величине и направлению поляризации в непрерывном спектре.

5. *Поляризационное изучение компактных внегалактических объектов.* В этом разделе мы обсудим результаты поляризационного исследования компактных внегалактических объектов, под которыми мы будем понимать ядерные области нормальных и сейфертовских галактик, радиогалактики типа N и квазизвездные объекты (КЗО). Несмотря на то, что Шкловский [47] еще в 1965 г. указал на сходство между ядрами сейфертовских галактик и КЗО (сейчас с этим соглашается большая часть астрофизиков), исследование этих объектов долгое время проводилось по отдельности и разными наблюдателями. Мы для удобства изложения сохраним это разделение, но будем иметь в виду, что оно чисто условно хотя бы потому, что имеются объекты, которые разные авторы относят к разным группам: 3С 120, например, относят и к сейфертовским и к N-галактикам, В 264 и к КЗО и к N-галактикам и т. д.

Все наблюдения компактных внегалактических объектов выполнялись фотозлектрически, поскольку степень поляризации их излучения, как правило, невелика и для получения уверенных результатов необходима высокая точность наблюдений.

а) *Ядерные области нормальных галактик.* Еще совсем недавно существование поляризации излучения ядер нормальных галактик казалось настолько невероятным, что ядерные области некоторых спиральных и эллиптических галактик использовались в качестве стандартных объектов с нулевой собственной поляризацией при внесении поправок за галактическую межзвездную поляризацию и инструментальные эффекты [17, 29, 48]. В дальнейшем выяснилось, однако, что в излучении ядерных областей некоторых нормальных галактик имеется небольшая собственная поляризация ($p \leq 1\%$), вполне обнаружимая при тщательных фотозлектрических измерениях.

В ходе первых наблюдений, выполненных в 1956 г. Домбровским [18] с диафрагмой $2'$, поляризации излучения ядерных областей найдено не было, что вполне понятно, так как вклад собственно ядер в общее излучение, регистрируемое с такой большой диафрагмой, невелик; ошибки же в определении степени поляризации составляли около 1% . Эльвиус и Холл [19] провели более точные ($\sigma_p \approx 0.5\%$) наблюдения, используя значительно меньшие диафрагмы. Им удалось обнаружить поляризацию излучения ядерных областей ряда галактик, в частности, для М 31 и ее спутников была найдена поляризация

около 1% при позиционном угле, близком к направлению галактического экватора. Эльвиус и Холл сочли поэтому найденную ими поляризацию галактической межзвездной.

Это объяснение вряд ли можно считать состоятельным, поскольку на галактической широте М 31 ($b \approx -20^\circ$) не должно быть такой большой межзвездной поляризации. Существование же собственной поляризации ядер может иметь далеко идущие последствия, в связи с чем Домбровский и Гаген-Торн [49] провели повторные наблюдения М 31 и ее спутников. Результаты работы [19] не были подтверждены. Было найдено, что степень поляризации не превышает 0.3%. Такую поляризацию уже можно считать галактической межзвездной, тем более, что направление ее почти в точности совпадает с направлением галактического экватора, а степень поляризации не зависит от размера использованных при наблюдениях диафрагм (13, 26, 52").

В работе [49], а также в продолжающей ее работе [50] приводятся результаты поляризационных наблюдений ядерных областей еще нескольких нормальных галактик, и для части из них найдена поляризация порядка 1%. Результаты работ [19, 49, 50] показывают, что поляризация излучения ядерных областей обнаруживается у нормальных галактик лишь в тех случаях, когда имеются указания на существование в околоядерных областях большого количества пыли. Она либо видна непосредственно (NGC 4565, NGC 7814), либо проявляет себя, вызывая аномальное покраснение ядер (М 33, NGC 5195, NGC 7331). Выполненные к настоящему времени оптические поляризационные наблюдения не дают никаких свидетельств существования в ядрах нормальных галактик нетеплового излучения.

б) *Ядра сейфертовских галактик.* Поиски поляризации оптического излучения в ядрах сейфертовских галактик были начаты в 1964 г. Уокером [51], который обнаружил значительный избыток ультрафиолетового излучения в ядре галактики NGC 1068. Тогда уже было известно, что эта галактика является радиогалактикой, дающей синхротронное излучение на метровых и длинных сантиметровых волнах, и Уокер предположил, что это излучение может простирается и на оптическую область спектра. Наблюдения выполнялись с диафрагмой диаметром 10". В ультрафиолетовой области спектра была найдена очень сильная поляризация — $p_U = 13\%$, $\theta_0 = 90^\circ$; в визуальной области поляризация оказалась гораздо более слабой ($p_V = 3\%$). У четырех других сейфертовских галактик поляризации обнаружено не было. В 1966 г. в докладе на симпозиуме МАС № 29 [52] Уокер привел уточненные данные для NGC 1068 ($p_U = 8.8\%$,

$\theta_0 = 98^\circ$; $p_V < 0.5\%$). В качестве подтверждения были приведены результаты наблюдений Эльвиус и Холла ($p_U = 5.5\%$, $\theta_0 = 99^\circ$; $p_V = 2\%$), о которых они сообщали в [53], Уокер доложил о существовании поляризации и у другой сейфертовской галактики, NGC 1275 и обратил внимание на то, что она так же, как NGC 1068, является радиогалактикой. В 1966 г. на присутствие поляризации в излучении ядер галактик NGC 1068 и NGC 1275 указали также Дибай и Шаховской [54], однако найденная ими степень поляризации была заметно меньше, чем у Уокера.

В 1967 г. Гаген-Торн и Домбровский [55], выполнив поляризационные наблюдения ядерных областей семи из восьми известных тогда сейфертовских галактик, нашли, что излучение шести из них поляризовано (не наблюдалась NGC 5548 и не было найдено поляризации у NGC 3516). Для NGC 1068 и NGC 1275 данные [55] достаточно хорошо согласовались с данными [54], хотя направление поляризации для NGC 1275 и отличалось примерно на 40° . У галактик NGC 3227, 4051, 7469 степень поляризации оказалась в пределах $0.5 - 1.0\%$ (при ошибке определения 0.3%). Совершенно уверенно было установлено существование поляризации излучения ядерной области галактики NGC 4151 ($p \approx 1.5\%$, $\theta_0 \approx 95^\circ$), не являющейся радиогалактикой (слабое радиоизлучение ее на длинных и средних радиоволнах тогда еще не было зарегистрировано).

Имевшиеся к концу 1967 г. поляризационные данные о ядерных областях сейфертовских галактик были обсуждены Домбровским и Гаген-Торном [49]. Было отмечено, что найденная поляризация не может быть межзвездной, поскольку почти все галактики расположены в высоких галактических широтах. Даже для NGC 1275 ($b = -12^\circ$) наблюдаемая поляризация более чем вдвое превышает ожидаемую межзвездную. Против межзвездного происхождения свидетельствует также существование зависимости степени поляризации от размера использовавшейся при наблюдениях диафрагмы. Характер этой зависимости (уменьшение степени поляризации с увеличением диафрагмы) указывает на то, что поляризованным является излучение собственно ядер. Было показано, что экстраполяция на оптическую область радиоспектра, наблюдаемого у радиогалактик (NGC 1068 и NGC 1275) в области $\lg \nu < 9.5$, дает поток, недостаточный для объяснения наблюдаемой поляризации. Возможность возникновения поляризации в результате рассеяния света ядра как пылевыми облаками, расположенными в околоядерных областях, так и свободными электронами газовых облаков также была отвергнута. Авторы связали наблюдаемую поляризацию с синхротронным излучением локализованных в ядрах

источников малого размера, проявляющих себя в видимой и инфракрасной областях спектра и в коротковолновом радиодиапазоне, но испытывающих самопоглощение на длинных и средних радиоволнах. В связи с малым размером источников, ответственных за наблюдаемую поляризацию, было сделано предположение о возможной ее переменности.

В том же 1968 году появились работы Висванатана и Оука [56] и Крушевского [57], посвященные поляризационному изучению галактики NGC 1068. В них было проведено исчерпывающее исследование зависимости параметров поляризации от длины волны и изменения степени поляризации с изменением размера используемой диафрагмы. Результаты наблюдений Висванатана и Оука, приведенные на рис. 1, были использованы авторами для выделения нетеплового компонента в излучении ядра NGC 1068. Предполагалось, что степень поляризации нетеплового излучения не зависит от длины волны, а распределение энергии окооядерных областей галактики совпадает с таковым для M 31. Было найдено, что в оптической области спектр нетеплового источника степенной, причем степень поляризации составляет около 8%.

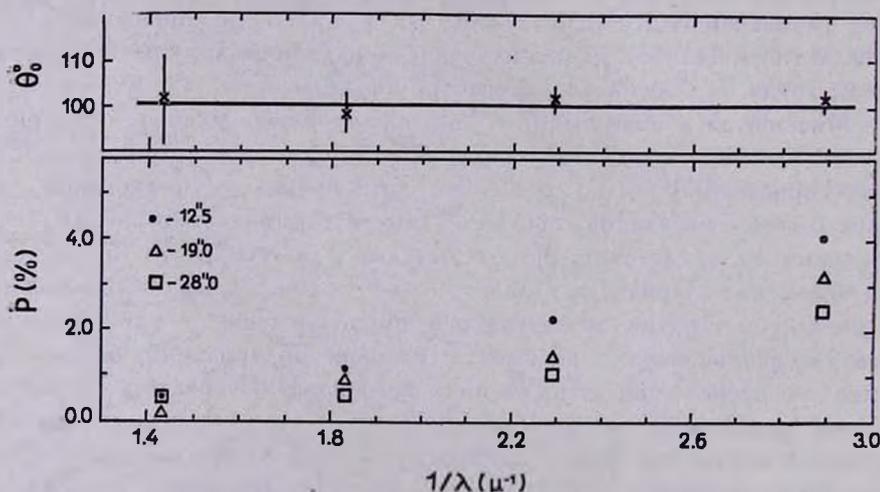


Рис. 1. Зависимость параметров поляризации от длины волны для NGC 1068 по данным [56] ($\sigma_p \approx 0.3\%$).

Крушевский [57] выполнил шестичетные поляризационные наблюдения, сопровождаемые фотометрическими оценками. Наблюдения с разными диафрагмами показали, что поток поляризованного излучения F_p не зависит от диаметра диафрагмы, то есть размер источника, дающего это излучение, меньше наименьшей использовавшейся

диафрагмы (6.2). Была найдена зависимость $F_p(\lambda)$ в интервале $0.36 + 0.94 \mu$. Она оказалась гладкой, без заметного увеличения в области 0.94μ . Это позволило сделать заключение, что оптическая поляризация и найденное у NGC 1068 избыточное инфракрасное излучение, вклад которого на 1μ уже должен быть заметен, непосредственно друг с другом не связаны. Крушевски нашел, что направление поляризации почти не зависит от длины волны. Если считать, что при прохождении света ядра через околоядерные газовые облака происходит фарадеевское вращение плоскости поляризации, наблюдаемое значение угла будет даваться выражением

$$\theta_0 = \theta_0^{\text{мст}} + R_M \lambda^2,$$

где R_M — мера вращения — есть:

$$R_M = \text{const} \cdot \int N_e B_L dL.$$

Здесь N_e — электронная плотность, B_L — продольная составляющая магнитного поля, L — путь луча в электронном облаке. Из наблюдений методом наименьших квадратов было получено $R_M = (1.2 \pm 9.8)^\circ/\mu^2$. Считая, что истинное значение R_M во всяком случае не превышает утроенной ошибки, Крушевский, используя имеющиеся в литературе данные об N_e и L , оценил продольную составляющую магнитного поля в ядерной области NGC 1068 ($B_L < 30 \text{ гс}$).

Поиски переменности поляризации в излучении ядер сейфертовских галактик, предсказанной в [49], увенчались успехом. В 1969 г. Гаген-Торн и Бабаджанияц [58] сообщили об ее обнаружении у галактик NGC 1275, NGC 4151 и, возможно, NGC 1068. Существенно, что все наблюдения, на основании которых было сделано заключение о переменности, были выполнены с использованием одной и той же аппаратуры и методики наблюдений. Увеличение степени поляризации согласно [58] совпадает с увеличением блеска, что вполне соответствует представлению о синхротронной природе излучения, ответственного за оптическую переменность и поляризацию. В предварительной заметке [59], появившейся в 1970 г., были сообщены результаты сопоставления изменений поляризации и блеска для NGC 4151 — было найдено, что степень поляризации дополнительного излучения составляет около 2%.

В том же 1970 г. вышла статья Нэнди и Уолстенкрофта [60], в которой ставилось под сомнение существование оптического синхротронного излучения в ядре галактики NGC 1068. Из сопоставления поляризационных данных Васванатана и Оука [56] и результатов фо-

тографической фотометрии центральной части NGC 1068 ван Хоутена [61] авторы [60] нашли, что степень поляризации собственно ядерного излучения составляет в цвете U около 85%. Они считают, что столь высокую степень поляризации нельзя объяснить синхротронным излучением. Не вдаваясь в детали их обсуждения, отметим, что вряд ли результат, полученный Нэнди и Уолстенкрофтом, правилен (как уже указывалось, сами авторы [56] получили $p_0 \approx 8\%$). По нашему мнению, это вызвано незаконным использованием фотографических данных. Как известно, фотографический эффект различен для точечных объектов (каким является ядро NGC 1068) и протяженных (ядерные области). Определение вклада в общее излучение точечного объекта, наблюдаемого на протяженном фоне, представляет собой задачу, требующую специального исследования, которого не проводил ни ван Хоутен (поскольку ему это не было нужно), ни авторы [60].

В 1971 г. Крушевски [62] опубликовал работу, посвященную поляризационному исследованию ядер галактик NGC 1068 и NGC 4151. Для NGC 1068 в ней приводятся результаты наблюдений, относящихся к 1967—1968 гг. Хотя средние для 1968 г. значения степени поляризации во всех шести цветовых полосах превышают значения, полученные в 1967 г., автор считает, что его данные не позволяют сделать вывод о переменности поляризации у NGC 1068. В остальной части работы, касающейся NGC 1068, повторяет работу [57]. Для NGC 4151 подтверждается обнаруженная в [58] переменность поляризации и связь ее с изменениями блеска. Предположив, что степень поляризации нетеплового компонента p_0 постоянна во времени, автор из сопоставления изменений поляризации и блеска в цветовой полосе В находит $p_0 = 3.5 \pm 0.4\%$ и оценивает блеск галактической подложки в диафрагме диаметром $10''$: $B = 12^m 94 \pm 0^m 06$. В обсуждении говорится, что результаты приведенных наблюдений не противоречат объяснению поляризации существованием синхротронного или обратного комптоновского излучения. Отмечается также возможность объяснения поляризации присутствием собственной межзвездной поляризации в галактиках (при этом не делается никаких попыток объяснить переменность поляризации и существование корреляции между степенью поляризации и блеском у NGC 4151).

В 1972 г. вслед за статьей [50], дающей, в частности, результаты поляризационных наблюдений ядер сейфертовских галактик, полученные в Ленинградском университете в 1968—1970 гг., появилась работа Бабаджанянца, Гаген-Торна и Лютого [63], в которой проведено обсуждение результатов всех поляризационных и фотометриче-

ских наблюдений ядер сейфертовских галактик, выполненных в 1966—1970 гг. в Ленинградском университете и на Южной станции ГАИШ. Мы остановимся здесь лишь на той части работы [63], которая имеет отношение к поляризационному изучению этих объектов.

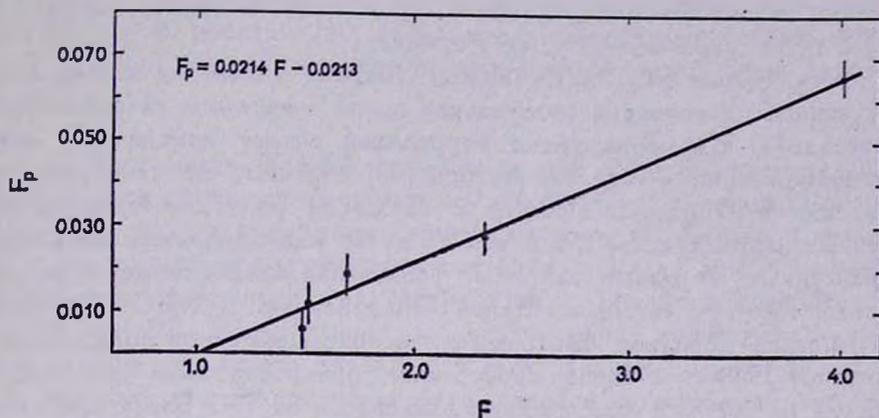


Рис. 2. Зависимость потока поляризованного излучения от полного потока для NGC 4151 [63].

Наиболее детально изучено поведение галактик NGC 4151 и NGC 1275, показывающих наибольшие изменения блеска и поляризации. На рис. 2, взятом из [63], приводятся результаты сопоставления изменений степени поляризации и блеска для NGC 4151, направление поляризации у которой на протяжении 1966—1968 гг. оставалось неизменным. Через F обозначен полный поток в цветовой полосе В для диафрагмы диаметром 26" в единицах $0.346 \cdot 10^{-27} \text{ вт/м}^2 \text{ мк}$ (чему соответствует $V=12^{\text{m}}82$); F_p — его поляризованная часть. Авторы отмечают, что точки хорошо ложатся на прямую и указывают, что это свидетельствует о постоянстве степени поляризации дополнительного излучения, ответственного за поляризацию и переменность. Угловой коэффициент прямой (уравнение которой приводится на рис. 2) дает степень поляризации $p_0 = 2.1\%$, а пересечение с осью абсцисс — поток от галактической подложки для диафрагмы диаметром 28". Ему соответствует значение $V = 12^{\text{m}}82^*$. Из сопоставления этих данных с результатами колориметрических наблюдений делается заключение о синхротронной природе дополнительного излу-

* Эти результаты удовлетворительно согласуются с данными работы [62], особенно если учесть, что значение $p_0 = 3.5\%$, полученное в [62], вероятно, завышено, так как явно завышен блеск подложки (из таблицы в [62] видно, что в действительности наблюдался блеск меньший, чем $V = 12^{\text{m}}94$).

чения. Отмечается, что неизменность параметров поляризации излучения синхротронного источника и малость степени поляризации указывают, возможно, на то, что в ядре NGC 4151 имеет место более или менее симметричный выброс релятивистских электронов, движущихся в магнитном поле, которое может быть, например, полем диполя с осью, наклоненной к лучу зрения.

У галактики NGC 1275 найдены сильные изменения направления собственной поляризации (полученной после вычитания галактической межзвездной) и не обнаружено корреляции между изменениями степени поляризации и блеска. Авторы [63] считают, что изменения направления поляризации связаны с выбросом релятивистских частиц в разных направлениях. Ясно, что в случае одновременных выбросов, направленных в разные стороны, увеличение блеска может и не сопровождаться увеличением степени поляризации. У NGC 1275 зарегистрированы довольно быстрые изменения параметров поляризации. В октябре 1968 г. степень собственной поляризации за две недели возросла на 1.0%, а направление изменилось на 73° . Блеск при этом увеличился на $0^m.29$. Эти изменения можно объяснить появлением нового синхротронного источника, излучение которого поляризовано примерно на 8%.

Поляризационные данные для других изученных в [63] сейфертовских галактик (NGC 1068, NGC 3516, NGC 7469) не противоречат двум вышеуказанным моделям.

Результаты поляризационных наблюдений ядер сейфертовских галактик приводятся также в работе Ефимова и Шаховского [64], опубликованной в 1972 г. Авторы [64] утверждают, что у ядер галактик NGC 4051, NGC 4151 и NGC 5548 направление поляризации зависит от длины волны. Для NGC 4151 это совершенно не согласуется с результатами работ [55, 62]. Первоначально (работа была сдана в печать в 1970 г.) авторы объяснили найденную ими зависимость тем, что оптическое излучение, наблюдаемое в разных спектральных областях, возникает в различных объемах пространства с различной ориентацией магнитного поля. Впоследствии они, по-видимому, отказались от этого объяснения и в примечании при корректуре указали, что ее удастся объяснить фарадеевским вращением плоскости поляризации. Независимо от предложенного объяснения вызывает сомнение само существование найденной в [64] зависимости направления поляризации от длины волны. Действительно, для NGC 5548 наблюдения с диафрагмами $5''$ и $10''$, разделенные промежутком времени в 40^m , дают прямо противоположные направления поляризации. Это

обстоятельство никак не обсуждается, но нам кажется, что здесь мы имеем дело просто с ошибками наблюдений.

Для более слабых сейфертовских галактик имеются лишь отдельные поляризационные оценки. Данные о ЗС 120, позволяющие сделать заключение о переменности ее поляризации, содержатся в работах [50, 64, 65]. В работах [50, 64] приводятся результаты наблюдений Mr 9, а в [66] — Mr 78. Степень поляризации излучения обеих галактик невелика.

в) *Квазизвездные объекты.* Уже вскоре после обнаружения КЗО были начаты поиски поляризации их излучения в оптической области спектра в связи с возможным присутствием в их излучении нетеплового компонента. В настоящее время более чем для 30 КЗО имеются сведения о поляризации излучения. Они содержатся в работах [50, 64, 65, 68—80]. Значительная часть этих работ посвящена поискам поляризации у самого яркого КЗО ЗС 273 [50, 67, 69, 70, 72, 74, 78]. Результаты их показывают, что степень поляризации его излучения вряд ли превышает 0.5%. В зависимости от имеющихся поляризационных данных КЗО можно разделить на следующие группы: 1) КЗО, у которых не найдено поляризации, превышающей ошибки наблюдений (таких большинство); 2) КЗО, для которых имеются единичные оценки, из коих следует, что их излучение поляризовано на 3—5%; 3) КЗО с большой переменной поляризацией. Третья группа состоит из четырех квазаров ЗС 279, ЗС 345, ЗС 446 и ЗС 454.3. Все они показывают быструю фотометрическую переменность и относятся к классу оптически активных (OVV). На их поляризационном изучении мы и остановимся. Все эти объекты чрезвычайно слабы: даже во время вспышек их блеск меньше, чем $V = 16^m 0$ (за исключением ЗС 345, который изредка вспыхивает до $V = 15^m 0$). Поэтому для проведения их поляризационных наблюдений необходимо располагать крупным телескопом. Поскольку наблюдательное время на крупных телескопах ограничено, для этих объектов имеются лишь отдельные поляризационные оценки, разделенные значительными промежутками времени.

Первым КЗО, в излучении которого была найдена высокая степень поляризации, был ЗС 446. В 1966 г. Кинман, Ламла и Виртанен [71], фотографировавшие этот КЗО с целью изучения переменности его блеска, обнаружили, что он вспыхнул более чем на $2^m 0$ и достиг блеска $V \approx 16^m 5$. Были выполнены поляризационные наблюдения, показавшие, что излучение ЗС 446 поляризовано примерно на 10%. Повторные наблюдения, проведенные через месяц (при почти таком

же блеске) дали ту же степень поляризации, но заметно отличное ее направление. При наблюдениях использовались фильтры с λ_{eff} 4350 А и 7500 А, и было найдено, что ни степень поляризации, ни ее направление не зависят от длины волны. Последнее означает, что нет заметного фарадеевского вращения плоскости поляризации. Еще четыре поляризационные оценки для этого КЗО, относящиеся к 1968—1969 гг., были получены Висванатаном [80], который подтвердил переменность параметров поляризации (и степени поляризации тоже) и отсутствие зависимости степени поляризации от длины волны. Было установлено, что значительная степень поляризации наблюдается и вне вспышек.

Поляризационные наблюдения ЗС 279 выполнялись Кинманом [65] и Эльвиус [76] во время вспышки 1967 г. Минимальный блеск этого КЗО около $B = 18^{\text{m}0}$. Кинман нашел у него поляризацию $\approx 18\%$ в позиционном угле 175° при блеске $B = 16^{\text{m}1}$, Эльвиус — $\approx 12\%$ и 140° при блеске $B = 17^{\text{m}0}$. В дальнейшем Висванатан [80] получил в 1967—1969 гг. отдельные оценки при блеске в интервале $B = 16^{\text{m}3} - 17^{\text{m}3}$. Степень поляризации оказалась около 8% при сильно переменном направлении.

Результаты поляризационных наблюдений ЗС 454.3 имеются лишь в работе [80]. В 1967—1969 гг. наблюдались изменения как степени поляризации (в пределах $3 - 15\%$), так и ее направления при изменениях блеска от $15^{\text{m}9}$ до $17^{\text{m}3}$. Корреляции между степенью поляризации и блеском нет. Степень поляризации не зависит от длины волны.

Поляризационные данные для ЗС 345 имеются в шести работах. Первые наблюдения были выполнены Кинманом [65] в феврале 1967 г. Было найдено, что степень поляризации достигает 8% , а направление переменное. Результаты дальнейших наблюдений за 1967—1971 гг. содержатся в работах [64, 76, 77, 79, 80]. Из рассмотрения этих данных следует, что у ЗС 345 также нет четкой связи между степенью поляризации и блеском. В работах [77, 79] отмечено уменьшение степени поляризации во время отдельных сильных вспышек, с другой стороны в [64] найдена рекордно высокая поляризация во время вспышки 1969 г. Имеются изменения направления поляризации, и в работе [77] как будто бы обнаружена связь их с плавным увеличением блеска в 1967 г. В спектре ЗС 345 наблюдается очень интенсивная эмиссионная линия $\text{Mg II } \lambda 2798 \text{ А}$. Поляризационные наблюдения, выполненные Висванатаном [80], показали, что излучение ее не поляризовано. Степень поляризации континуума в это время составляла около 4% .

В работе [80] подведены некоторые итоги поляризационных исследований КЗО. Указывается, что в результате наблюдений установлены следующие факты: а) у оптически активных КЗО высокая степень по-

ляризации наблюдается как в моменты вспышек, так и при минимальном блеске; б) степень поляризации и ее направление переменны, причем имеют место довольно быстрые их изменения; в) поляризованным является лишь излучение в непрерывном спектре; г) ни степень поляризации, ни ее направление не зависят от длины волны. Все эти факты, по мнению автора [80], могут быть объяснены одновременным существованием в КЗО нескольких переменных источников синхротронного излучения („горячих пятен“) с разным направлением магнитного поля.

В заключение этого раздела отметим, что для более полного понимания процессов, происходящих в КЗО, необходимо получение непрерывных поляризационных и фотометрических наблюдений, которые, возможно, позволят проследить за *развитием* отдельных источников. Слабость этих КЗО существенно усложняет задачу, так как специально для проведения этой программы должен быть выделен крупный телескоп.

г) *N-галактики*. Поиски поляризации в излучении *N*-галактик, занимающих по целому ряду характеристик промежуточное положение между КЗО и ядрами сейфертовских галактик, были проведены с целью подтверждения их сходства с этими объектами. Наиболее яркими *N*-галактиками являются ЗС 371 и ЗС 390.3, блеск которых колеблется в пределах $V = 14^m.5 + 16^m.0$, и для них и были получены поляризационные оценки.

В октябре 1967 г. Висванатан [81] нашел, что излучение ЗС 371 поляризовано на 5.2%. Он связал эту поляризацию с присутствием в излучении ЗС 371 нетеплового компонента, выделенного Оуком [82]. Существование поляризации излучения ЗС 371 было подтверждено Гаген-Торном и Бабаджанянцем [83] в ходе наблюдений, выполненных в сентябре 1968 г. В [83] сообщено также об обнаружении заметной поляризации излучения ($p \approx 3\%$) и у ЗС 390.3. В следующем году этими же авторами была установлена переменность направления поляризации у ЗС 371 [58].

В связи с найденной переменностью поляризационные наблюдения ЗС 371 и ЗС 390.3 были продолжены. Результаты их опубликованы в работе [50], в которой проводится также сопоставление их с результатами фотометрических наблюдений. У ЗС 371 найдены значительные изменения и степени поляризации и ее направления. Во время наблюдавшейся в сентябре 1970 г. вспышки степень поляризации достигла 10%, причем было заподозрено существование очень быстрых ее изменений с характерным временем порядка 1 часа. Наблюдения, выполненные в цветовых полосах В и V, показали, что нет заметной зависимости параметров поляризации от длины волны.

У ЗС 390.3, изменения блеска которой носили плавный характер, степень поляризации держалась примерно на одном и том же уровне ($p=3\%$), но направление ее заметно изменялось. Параметры поляризации, найденные при наблюдениях в полосах В и V, оказались в пределах точности наблюдений ($\sim 0.7\%$) одинаковыми.

Отметим, что установленное в [50] различие в поведении поляризации ЗС 371 и ЗС 390.3, почти наверное связано с различиями их фотометрического поведения. В [84] указывается, что на протяжении 1970—1972 гг. у ЗС 371 было отмечено несколько вспышек, тогда как у ЗС 390.3, наблюдавшейся не менее тщательно, не было зарегистрировано ни одной. Спектры этих объектов также совершенно различны: ЗС 390.3 имеет сильнейший эмиссионный спектр сейфертовского типа, тогда как у ЗС 371 эмиссионные линии чуть заметны. Объединение же этих объектов в одну группу произведено по морфологическим признакам (к N-галактикам относят радиогалактики с ярким ядром и слабой оболочкой).

Результаты поляризационного изучения N-галактик ЗС 371 и ЗС 390.3 содержатся также в работе Ефимова и Шаховского [64]. Данные их наблюдений 1970 г. удовлетворительно согласуются с результатами [50], наблюдения же 1969 г. показывают крайне сильную зависимость степени поляризации от длины волны. Она велика в цвете В (до 20%), минимальна в цвете V и затем снова увеличивается в цвете R; направление при переходе от цвета В к цвету R также изменяется очень сильно. Авторы связывают появление указанных особенностей со вспышками этих объектов и для зависимости направления поляризации от длины волны дают то же объяснение, что и для ядер сейфертовских галактик (см. пункт б) этого раздела).

Нам кажется, однако, что и в этом случае есть основания для сомнений. Во-первых, сравнение приведенных в [64] результатов, полученных в одну и ту же ночь в цветах В, V, R и без фильтра, показывает, что они не вполне соответствуют друг другу. Во-вторых, как уже говорилось, у ЗС 390.3 за три года не было зарегистрировано ни одной вспышки. Из рассмотрения сводных кривых блеска (см. [84]) следует, что обе N-галактики в 1969 г. находились вблизи минимума блеска. Результаты же работы [85], на которую ссылаются авторы [64], сами по себе сомнительны. В-третьих, трудно поверить, что условия в двух столь различных, как мы видели, и физически не связанных друг с другом объектах в одно и то же время совпали настолько, чтобы дать одинаковую поляризационную картину. Возможно, что аппаратура Ефимова и Шаховского работала в то время недостаточно хорошо. Отметим, что к этому же периоду относятся их наблюдения

ЗС 345, показавшие чрезвычайно высокую степень поляризации ($p = 44\%$).

Имеющиеся поляризационные данные для N-галактик, которые к тому же частично противоречат друг другу, явно недостаточны для вынесения каких-либо заключений. Пожалуй, лишь факт переменности поляризации установлен достаточно надежно. Для N-галактик так же, как для КЗО, необходимо проведение по возможности непрерывных поляризационных наблюдений, сопровождаемых оценками блеска.

д) *Объекты типа BL Lac.* После того, как радиоисточник VRO 42.22.01 был отождествлен с переменной звездой BL Lac, спектр которой оказался непрерывным, без каких бы то ни было деталей, Висванатан [86] провел поляризационные наблюдения этой звезды и нашел, что излучение ее поляризовано примерно на 10% , причем параметры поляризации не зависят от длины волны. Повторные наблюдения, выполненные им же через год, показали, что поляризация переменна [87]. Примерно в это же время было установлено, что BL Lac по целому ряду характеристик напоминает КЗО и, вероятно, является внегалактическим объектом. Переменность поляризации была подтверждена Домбровским [88, 89], который указал, что у BL Lac имеются довольно быстрые изменения параметров поляризации с характерным временем τ порядка нескольких дней. Было заподозрено также существование очень быстрых изменений с $\tau \approx 1^h$. Сопоставление поляризационных данных с фотометрическими [50] показало, что между изменениями степени поляризации и блеска нет видимой связи.

В 1971 г. другой радиоисточник, OJ 287, был отождествлен со звездообразным объектом, имеющим чисто непрерывный спектр. Кинман и Конклин [90] нашли у него большую поляризацию, изменяющуюся с характерным временем порядка 1 суток, и указали на сходство этого объекта с BL Lac. Результаты эти были подтверждены Диком и др. [91]. Гаген-Торн [92] установил существование у OJ 287 изменений параметров поляризации с характерным временем порядка $0^h.5$. Эти изменения сопровождались небольшими изменениями блеска и были объяснены в [92] появлением дополнительного источника, излучение которого поляризовано примерно на 50% . Изменения поляризации у OJ 287, коррелирующие с изменением блеска, были найдены также в [93], где приводятся результаты наблюдений, выполнявшихся регулярно в течение февраля 1972 г. Сходство поляризационных характеристик OJ 287 и BL Lac подтверждается результатами работ [92, 94—96], где указывается, что параметры поляризации OJ 287 не зависят от длины волны, и [97], в которой сообщается о вероятном существовании у BL Lac изменений параметров поляризации в течение ночи.

Помимо BL Lac и OJ 287 ещё несколько радиисточников было отождествлено со звездообразными объектами с чисто непрерывным спектром. Результаты их поляризационных наблюдений, приведенные в [94, 95], показывают, что излучение их сильно поляризовано и параметры поляризации не зависят от длины волны.

Объекты типа BL Lac отличаются от КЗО большей активностью в радио и оптическом диапазонах и отсутствием деталей в спектрах. Это не позволяет определить для них красное смещение, чтобы удостовериться в их внегалактической природе. Возможно, что эти отличия объясняются просто большей мощностью компактных нетепловых источников, находящихся в этих объектах, так что нет необходимости выделять их в отдельную группу. Что же касается поляризационных исследований этих объектов, то можно сказать, что они только начинаются.

6. *Заключение.* Формально тема обзора включает и начатые недавно исследования оптической циркулярной поляризации, и мы остановимся коротко на результатах первых работ в этой области. В 1971 г. в статье Никулина, Кувшинова и Северного [98] было сообщено об обнаружении циркулярной поляризации порядка 1% в излучении ядер сейфертовских галактик NGC 1068 и NGC 4151 и КЗО 3С 273. Присутствие циркулярной поляризации может указывать на существование сильных магнитных полей в этих объектах, в связи с чем результаты работы [98] вызвали большой интерес. Дальнейшие наблюдения [96, 99—101] их, однако, не подтвердили. Авторы [96, 99—101] указывают, что степень циркулярной поляризации в излучении этих, а также и других исследовавшихся ими внегалактических объектов во всяком случае не превышает 0.1%.

Несколько слов следует сказать также о поляризационных наблюдениях Сверхновых звезд в других галактиках. Имеющиеся сейчас данные для трех из них [102—104] позволяют утверждать, что степень линейной поляризации их излучения не превышает нескольких десятых процента, а степень циркулярной поляризации меньше 0.1%.

В настоящей статье дается почти полный обзор работ, посвященных поляризационному изучению внегалактических объектов. Важность результатов этих работ для понимания процессов, происходящих в галактиках и КЗО, не вызывает сомнения. Особенно это касается изучения компактных нетепловых источников в ядрах галактик и КЗО. В некоторых случаях лишь с помощью поляризационных наблюдений удается выделить их на фоне ярких центральных областей галактик. Примером могут служить гигантские эллиптические галактики с компактными радиисточниками в ядрах. В самое последнее время Хишен

[105] нашел поляризацию в ядерном излучении двух таких галактик— NGC 4486, и NGC 5444. Согласно Кинману [106] поляризация в ядре NGC 4486, возможно, переменна. Несомненно, что в ходе дальнейших поляризационных наблюдений будут получены новые интересные результаты.

Ленинградский государственный
университет

Поступила 18 июня 1973

POLARIZATION OF OPTICAL RADIATION OF EXTRAGALACTIC OBJECTS

V. A. HAGEN-THORN

This article renders an almost comprehensive review of the papers which deal with the polarimetric study of extragalactic objects in the optical wavelengths.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *J. H. Reynolds*, M. N., 72, 553, 1912.
2. *W. K. Green*, P. A. S. P., 29, 108, 1917.
3. *H. D. Curtis*, Publ. Lick Obs., 13, 45, 1918.
4. *M. F. Meyer*, P. A. S. P., 31, 194, 1919.
5. *E. Hubble*, Ap. J., 64, 321, 1926.
6. *S. Smith*, Ap. J., 82, 192, 1935.
7. *Y. Ohman*, Stockholms Obs. Ann., 14, No. 4, 1942.
8. *И. С. Шкловский*, Астрон. ж., 32, 215, 1955.
9. *W. Baade*, Ap. J., 123, 550, 1956.
10. *W. A. Hiltner*, Ap. J., 130, 340, 1959.
11. *T. Page*, P. A. S. P., 63, 142, 1951.
12. *A. Elvius*, Stockholms Obs. Ann., 17, No. 4, 1951.
13. *A. Elvius*, Stockholms Obs. Ann., 19, No. 1, 1956.
14. *М. А. Вашакидзе*, Бюлл. Абастуманской обс., № 13, 110, 1953.
15. *М. А. Вашакидзе*, Астрон. циркул. № 147, 11, 1954.
16. *М. А. Вашакидзе*, Бюлл. Абастуманской обс., № 18, 15, 1956.
17. *W. A. Hiltner*, Ap. J., 128, 9, 1958.
18. *В. А. Домбровский*, Вестн. ЛГУ, № 19, 154, 1956.
19. *A. Elvius, J. S. Hall*, Lowell Obs. Bull., 6, 123, 1964.
20. *I. Appenzeller*, P. A. S. P., 79, 600, 1967.
21. *В. А. Гаген-Торн*, Труды АО ЛГУ, 26, 48, 1969.
22. *N. Visvanathan*, M. N., 132, 423, 1966.
23. *R. D. Wolstencroft*, Nature, 194, 1066, 1962.
24. *D. S. Mathewson, V. L. Ford*, Ap. J., 160, L43, 1970.
25. *D. S. Mathewson, V. L. Ford*, A. J., 75, 778, 1970.

26. *T. Schmidt*, *Astron. Astrophys.*, 6, 294, 1970.
27. *В. А. Домбровский*, *Астрон. цирк.*, № 176, 7, 1957.
28. *C. R. Lynds*, *Ap. J.*, 134, 659, 1961.
29. *A. Elvius*, *Lowell Obs. Bull.*, 5, 281, 1962.
30. *C. R. Lynds*, *A. R. Sandage*, *Ap. J.*, 137, 1005, 1963.
31. *A. R. Sandage*, *W. C. Miller*, *Science*, 144, 405, 1964.
32. *W. A. Dent*, *F. T. Haddock*, *Quasi-Stellar Sources and Gravitational Collapse*, The University of Chicago Press, 1965.
33. *А. Эльвиус*, Нестационарные явления в галактиках, Симпозиум МАС № 29, Бюракан, 1966, АН Арм.ССР, 1968, стр. 384.
34. *Дж. Р. Шейкшафт*, там же, стр. 347.
35. *В. А. Гаген-Торн*, *Астрофизика*, 4, 93, 1968.
36. *A. B. Solinger*, *Ap. J.*, 155, 403, 1969.
37. *A. Elvius*, *Lowell Obs. Bull.*, 7, 117, 1969.
38. *A. R. Sandage*, *N. Visvanathan*, *Ap. J.*, 157, 1065, 1969.
39. *N. Visvanathan*, *Sky and Telescope*, 40, 142, 1970.
40. *R. H. Sanders*, *D. S. Balamore*, *Ap. J.*, 166, 7, 1971.
41. *H. M. Heckathorn*, *Ap. J.*, 173, 501, 1972.
42. *A. Elvius*, *Astron. Astrophys.*, 19, 193, 1972.
43. *N. Visvanathan*, *A. Sandage*, *Ap. J.*, 176, 57, 1972.
44. *M. Petmbert*, *H. Spitzrad*, *Ap. J.*, 160, 429, 1970.
45. *R. W. O'Connell*, Thesis, Cal. Inst. Tech., 1970.
46. *D. van Blercom*, *J. I. Castor*, *L. H. Auer*, *Ap. J.*, 179, 85, 1973.
47. *И. С. Шкловский*, *Астрон. ж.*, 42, 893, 1965.
48. *В. А. Гаген-Торн*, *Труды АО ЛГУ*, 24, 54, 1967.
49. *В. А. Домбровский*, *В. А. Гаген-Торн*, *Астрофизика*, 4, 409, 1968.
50. *В. А. Домбровский*, *М. К. Бабаджаняц*, *В. А. Гаген-Торн*, *С. М. Гуткевич*, *Астрофизика*, 7, 417, 1971.
51. *M. F. Walker*, *A. J.*, 69, 682, 1964.
52. *М. Ф. Уокер*, Нестационарные явления в галактиках, Симпозиум МАС № 29, Бюракан, 1966, АН Арм.ССР, 1968, стр. 21.
53. *A. Elvius*, *J. S. Hall*, *A. J.*, 70, 138, 1965.
54. *Э. А. Дибай*, *Н. М. Шаховской*, *Астрон. цирк.*, № 375, 1, 1966.
55. *В. А. Гаген-Торн*, *В. А. Домбровский*, *Астрон. цирк.*, № 454, 4, 1967.
56. *N. Visvanathan*, *J. B. Oke*, *Ap. J.*, 152, L167, 1968.
57. *A. Kraszewski*, *A. J.*, 73, 852, 1968.
58. *В. А. Гаген-Торн*, *М. К. Бабаджаняц*, *Астрон. цирк.*, № 526, 1, 1969.
59. *М. К. Бабаджаняц*, *В. А. Гаген-Торн*, *В. М. Лютый*, *Астрон. цирк.*, № 544, 6, 1970.
60. *K. Nandy*, *R. D. Wolstencroft*, *Nature*, 225, 621, 1970.
61. *C. J. van Houten*, *V. A. N.*, 16, 1, 1961. §
62. *A. Kraszewski*, *Acta Astronomica*, 21, 311, 1971.
63. *М. К. Бабаджаняц*, *В. А. Гаген-Торн*, *В. М. Лютый*, *Астрофизика*, 8, 611, 1972.
64. *Ю. С. Ефимов*, *Н. М. Шаховской*, *Изв. КраО*, 46, 3, 1972.
65. *T. D. Kinman*, *Ap. J.*, 148, L53, 1967.
66. *T. F. Adams*, *Ap. J.*, 179, 417, 1973.
67. *В. Ф. Есипов*, *В. И. Мороз*, *Астрон. цирк.*, № 246, 1, 1963.
68. *T. A. Matthews*, *A. R. Sandage*, *Ap. J.*, 138, 30, 1963.
69. *T. Schmidt*, *Z. Astrophys.*, 62, 217, 1965.

70. *J. B. Whiteoak*, *Z. Astrophys.*, 64, 181, 1966.
71. *T. D. Kinman, E. Lamla, C. A. Wirtanen*, *Ap. J.*, 146, 964, 1966.
72. *B. A. Домбровский, М. К. Бабаджаняц, В. А. Гаген-Торн*, *Астрон. цирк.*, № 400, 5, 1967.
73. *I. Appenzeller, W. A. Hiltner*, *Ap. J.*, 149, L17, 1967.
74. *I. Appenzeller*, *Ap. J.*, 151, 769, 1968.
75. *N. Visvanathan*, *Ap. J.*, 153, L19, 1968.
76. *A. Elvius*, *Lowell Obs. Bull.*, 7, 55, 1968.
77. *T. D. Kinman, E. Lamla, T. Cutrla, E. Harlan, C. A. Wirthanen*, *Ap. J.*, 152, 357, 1968.
78. *W. Liller*, *Ap. J.*, 155, 1113, 1969.
79. *М. К. Бабаджаняц, В. А. Гаген-Торн, Е. В. Семенова*, *Астрон. цирк.*, № 701, 1, 1972.
80. *N. Visvanathan*, *Ap. J.*, 179, 1, 1973.
81. *N. Visvanathan*, *Ap. J.*, 150, L149, 1967.
82. *J. B. Oke*, *Ap. J.*, 150, L5, 1967.
83. *В. А. Гаген-Торн, М. К. Бабаджаняц*, *Астрон. цирк.*, № 498, 3, 1969.
84. *М. К. Бабаджаняц, С. К. Винокуров, В. А. Гаген-Торн, Е. В. Семенова*, *Труды АО АГУ*, 31 (в печати).
85. *В. И. Проник, А. Г. Щербаков*, *Астрофизика*, 6, 525, 1970.
86. *N. Visvanathan*, *Ap. J.*, 155, L133, 1969.
87. *N. Visvanathan*, *Circ. Centr. Bur. Astron. Tel. IAU*, No. 2170, 1969.
88. *В. А. Домбровский*, *Астрон. цирк.*, № 571, 1, 1970.
89. *В. А. Домбровский*, *Астрон. цирк.*, № 614, 1, 1971.
90. *T. D. Kinman, E. K. Conklin*, *Ap. Lett.*, 9, 147, 1971.
91. *Н. М. Дык, Т. Д. Кинман, G. W. Lockwood, A. U. Landlot*, *Nature Phys. Sci.*, 234, 71, 1971.
92. *В. А. Гаген-Торн*, *Астрон. цирк.*, № 714, 5, 1972.
93. *W. L. Williams, A. Ritch, P. N. Kipferman, J. A. Ionson, W. A. Hiltner*, *Ap. J.*, 174, L63, 1972.
94. *P. A. Strittmatter, K. Serkowski, R. Carswell, W. A. Stein, K. M. Merrill, E. M. Burbidge*, *Ap. J.*, 175, L7, 1972.
95. *Ю. С. Ефимов, Н. М. Шаховской*, *Астрон. цирк.*, № 710, 2, 1972.
96. *К. Н. Nordstik*, *Ap. Lett.*, 12, 69, 1972.
97. *В. А. Домбровский*, *Астрон. цирк.*, № 753, 1, 1973.
98. *N. S. Nikulin, V. M. Kuvshinov, A. B. Severny*, *Ap. J.*, 170, L53, 1971.
99. *T. Gehrels*, *Ap. J.*, 173, L23, 1972.
100. *J. S. Kemp, R. D. Wolstencroft, J. B. Swedlund*, *Ap. J.*, 173, L113, 1972.
101. *J. D. Landstreet, J. R. Angel*, *Ap. J.*, 174, L127, 1972.
102. *K. Serkowski*, *Ap. J.*, 160, 1083, 1970.
103. *Н. М. Шаховской, Ю. С. Ефимов*, *Астрон. ж.*, 49, 11, 1972.
104. *R. D. Wolstencroft, J. S. Kemp*, *Nature*, 238, 452, 1972.
105. *D. S. Hessesen*, *Ap. J.*, 179, L93, 1973.
106. *T. D. Kinman*, *Ap. J.*, 179, L97, 1973.