

523.85

## ВЗРЫВАЮЩАЯСЯ ГАЛАКТИКА М-82—СВИДЕТЕЛЬСТВО СУЩЕСТВОВАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ\*)

Оптические и радиоастрономические наблюдения <sup>1, 2</sup> области около радиогалактики М-82, как недавно интерпретировали Линдс и Сэндейдж, показывают, что в центральной части этой галактики около  $1,5 \cdot 10^6$  лет назад \*\*) произошел взрыв высокой энергии. Продукты этого взрыва состоят из: 1) релятивистских электронов, взаимодействие которых с магнитным полем вызывает радиоизлучение с нетепловым спектром \*\*\*) и 2) низкоэнергетичной филаментарной системы, состоящей из ионизованного водорода с общей массой около  $5 \cdot 10^6 M_{\odot}$ , или  $10^{40} g$  \*\*\*\*), которая расширяется от центра взрыва со скоростью до  $1000 \text{ км/сек}$ .

Одной из серьезных проблем, вытекающих из такой модели, является проблема источника энергии, который требуется для ионизации водорода, рекомбинирующего в настоящее время. Только в линии  $H_{\alpha}$  расширяющиеся филаменты излучают  $10^{40} \text{ эрг/сек}$ . Линдс и Сэндейдж получили косвенное доказательство того, что оптическое синхротронное излучение на частотах выше лаймановского предела ( $v_L \approx 3,3 \times 10^{15} \text{ гц}$ ) имеет достаточную интенсивность, чтобы обеспечить ионизацию горячего водорода. Однако это доказательство было неполным.

Теперь проделаны новые наблюдения внешних областей М-82, которые показывают существование новой системы филаментов, излучающей в оптическом диапазоне, очевидно, за счет синхротронного механизма. Наши новые результаты приведены на рис. 1, где нижний снимок (б) есть наложение трех чувствительных в голубой области (пластинки Kodak 103aO плюс фильтр Schott WG2) негативов, полученных на паломарском 200-дюймовом рефлекторе. Филаменты так слабы по сравнению с фоном неба, что наложение трех негативов было необходимо, чтобы увеличить отношение сигнала к шуму.

Репродукция рис. 1, а сделана с трехчасовой экспозицией на 200-дюймовом рефлекторе с  $H_{\alpha}$ -интерференционным фильтром с полушириной  $80 \text{ \AA}$ . Эта фотография раньше обсуждалась Линдсом и Сэндейджем (2, рис. 8) как один из важных фактов, устанавливающих природу взрыва. Репродукция в  $H_{\alpha}$  увеличена здесь до того же масштаба, что и нижняя фотография рис. 1, чтобы показать, что вновь обнаруженные филаменты занимают намного больший объем М-82, чем структура в  $H_{\alpha}$ .

Некоторая часть новой филаментарной структуры была открыта Джонсоном <sup>3</sup> в 1963 г. на 36-дюймовом большом рефлекторе Ликской обсерватории. Он наложил четыре негатива, снятых в голубом цвете, и нашел большой внешний филамент, тянувшийся примерно на  $5'$  к югу от плоскости галактики около малой оси. Внутренние филаменты на его репродукциях были потеряны, потому что наложение четырех негативов создало полную поверхностную плотность, намного превышающую широту репродукционного материала.

Репродуцирование слабых деталей астрономических объектов, которые имеют вариации большой интенсивности по поверхности, всегда представляет трудность, если не использовать специальную аппаратуру. Все фотографии, приведенные в нашем сообщении, репродуцированы с помощью специального процесса маскировки, который эффективно увеличивает широту конечного отпечатка без уменьшения контрастности тонкой структуры. Техника кратко описана в конце сообщения.

Если филаменты излучают синхротронно, то должны быть выполнены два условия: 1) распределение энергии по спектру должно быть вызвано скорее непрерывным

\*) Allan R. Sandage, William C. Miller, The Exploding Galaxy M-82: Evidence for the Existence of a Large-Scale Magnetic Field, Science 144, No. 3617, 405 (1964). Перевод и примечания Б. В. Комберга.

В оригинале — резюме: «Фотографии галактики М-82 (другие обозначения: NGC3034 и ЗС 231.— *Перев.*), полученные в синих лучах, показывают наличие ранее неизвестной системы крупномасштабных филаментов (filament (*англ.*) — волокно.— *Перев.*), протянувшейся на  $4000 \text{ лс}$  ( $1,2 \cdot 10^{22} \text{ см}$ ) выше и ниже фундаментальной плоскости галактики вдоль малой оси. Филаменты являются источником непрерывного излучения с высокой степенью поляризации. Электрический вектор этого излучения в основном перпендикулярен филаментарной структуре. Вероятно, это излучение является синхротронным излучением релятивистских электронов, движущихся по спирали в крупномасштабном магнитном поле. Чтобы излучать в видимой части спектра, электрон должен иметь энергию порядка  $10^3$ — $10^4 \text{ Гэв}$  и находиться в магнитном поле  $10^{-5}$ — $10^{-6} \text{ гс}$ ».

\*\*) По новым данным, взрыв произошел примерно  $(2 \div 3) \cdot 10^6$  лет назад <sup>6</sup>.

\*\*\*) Спектральный индекс в радиодиапазоне  $\alpha = 0,29 \pm 0,06$ .

\*\*\*\*) Полная масса галактики оценивается примерно в  $(1 \pm 0,5) \cdot 10^{10} M_{\odot}$  <sup>6</sup>.

излучением, а не испусканием дискретных линий; 2) излучение должно быть очень сильно поляризовано, и электрический вектор излучения должен быть перпендикулярен магнитному полю, которое, как можно предположить, преимущественно направлено вдоль филаментов. Оба этих условия выполнены в голубых филаментах в М-82.

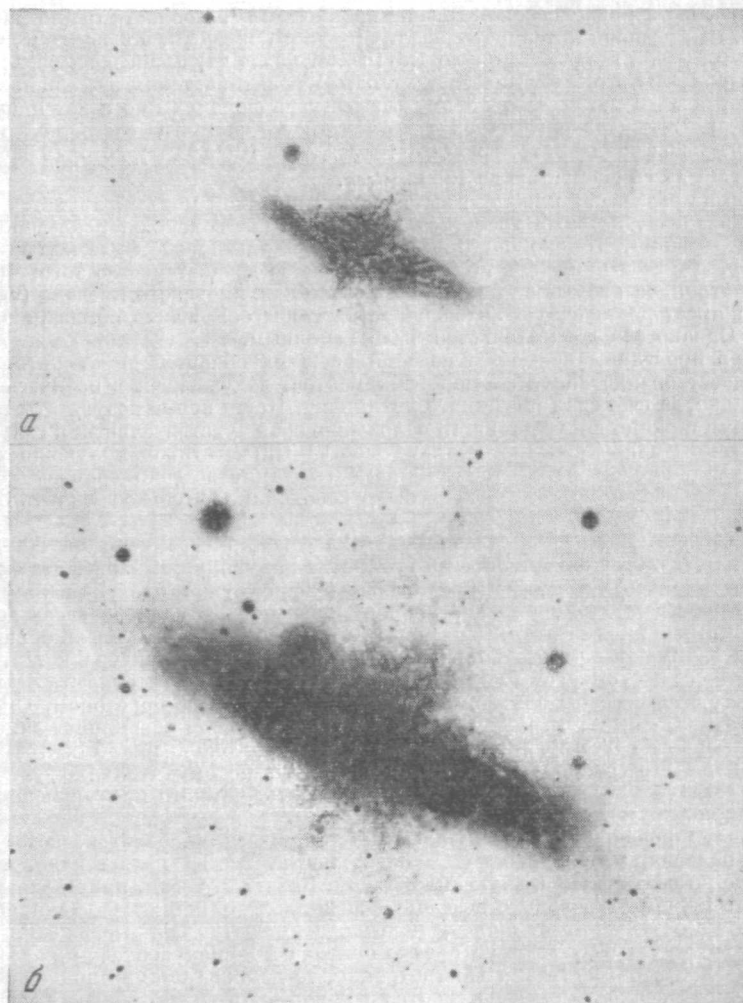


Рис. 1. *a*) Галактика М-82, сфотографированная на 200-дюймовом Hale-телескопе через интерференционный фильтр с центром полосы пропускания в линии  $H_{\alpha}$  и полной шириной 80 Å. Применена негативная печать, так что светлые места кажутся темными. *б*) Составной негативный отпечаток от четырех совмещенных негативов, полученных в интервале длин волн от 3800 до 5000 Å на 200-дюймовом рефлекторе. Масштаб увеличен по сравнению с *a*). Обширная филаментарная структура тянется примерно на 5' в обе стороны от фундаментальной плоскости галактики. Север — внизу, восток — справа.

Непрерывность распределения по спектру доказывается тем, что филаменты видны не только на рис. 1, *б*, но присутствуют также на снимках, сделанных в желтом цвете на пластинках Kodak 103aD с фильтром Schott GG11, который пропускает длины волн в интервале 5000—6200 Å, в пределах которого нет эмиссионных линий в спектре М-82 (см. <sup>2</sup>, рис. 4 и 5).

Самые ранние измерения поляризации были сделаны фотоэлектрическим способом в 1962 г. Элвиус <sup>4</sup> на Ловеллской обсерватории с 69-дюймовым рефлектором Перкинской обсерватории. Она наблюдала максимальную поляризацию около 15% \*)

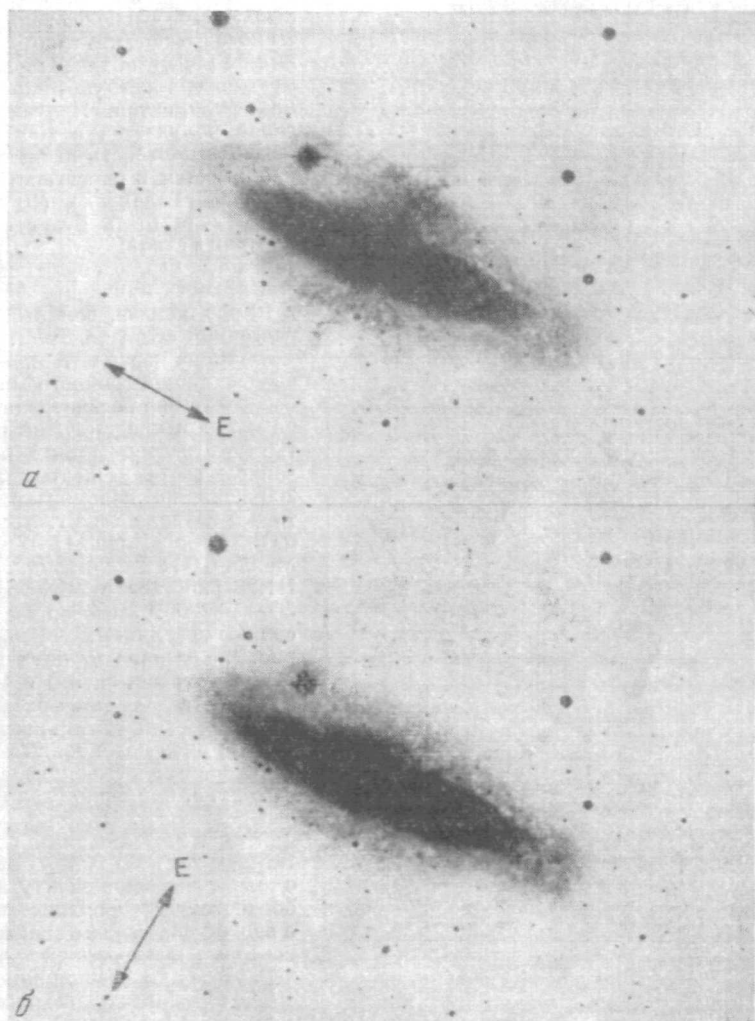


Рис. 2. а) Фотография с помощью двух сложенных пластинок, чувствительных к желтым лучам, снятая через фильтр Schott GG11 и поляроидную пленку HN38 в интервале от 5000 до 6200 Å, сделанная на 200-дюймовом рефлекторе. Электрический вектор поляроидной пленки лежит в позиционном угле  $61^{\circ},5$ , который соответствует направлению вдоль большой оси. Филаменты дают сильное излучение с таким же направлением электрического вектора. б) То же самое, что и а), но электрический вектор поляроидной пленки лежит в позиционном угле  $151^{\circ},5$ , который соответствует направлению вдоль малой оси. Филаменты при таком направлении электрического вектора почти не излучают.

у основания филаментарной структуры на южной стороне М-82, которая была интерпретирована как результат рассеяния света от главного тела М-82 пылью, находящейся на расстоянии около 500 пс ( $1,5 \cdot 10^{21}$  см) над плоскостью галактики.

\*) Оптическое излучение экваториальных областей галактики М-82 поляризовано слабее — всего 2—3% <sup>4</sup>.

Хотя такой результат возможен для 15%-ной поляризации, наши новые результаты показывают, что в самих филаментах существует почти 100%-ная поляризация.

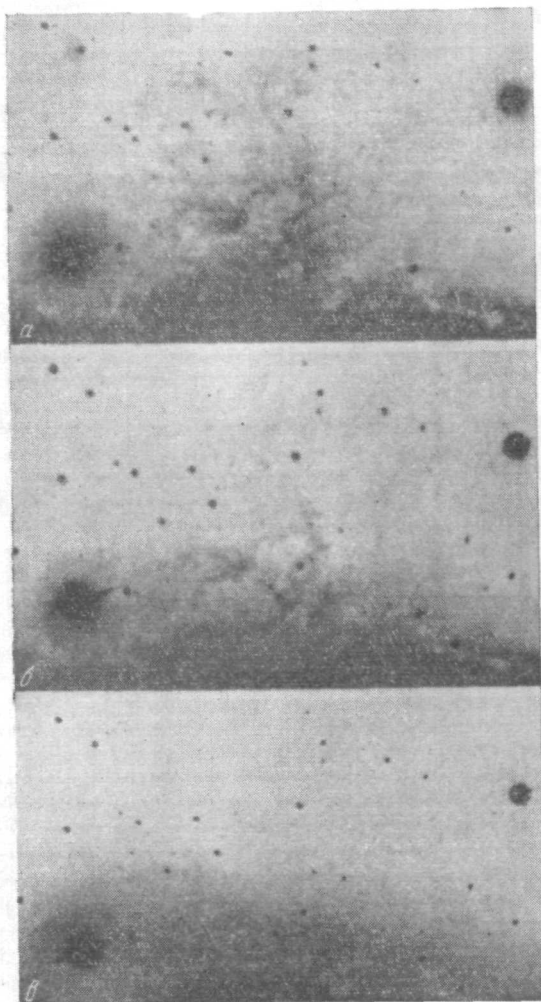


Рис. 3. а) На увеличенном участке фотографии рис. 1, б, сделанной в голубых лучах, видна в деталях часть к юго-востоку от малой оси около фундаментальной плоскости. Нитеобразная структура филаментов выступает как характерная черта. б) На увеличенном участке составной поляризационной фотографии рис. 2, а, сделанной в желтых лучах, видны те же детали, что и на рис. 3, а, с электрическим вектором, направленным вдоль большой оси. в) На увеличенном участке фотографии рис. 2, б, снятой в желтых лучах, с электрическим вектором поляроидной пленки, лежащим по направлению малой оси, видно отсутствие филаментарных деталей.

Еще не получено ни одной фотографии с позиционными углами, необходимыми для того, чтобы проследить поляризацию этой детали.

На рис. 3 приведена сильно увеличенная фотография южной части около малой оси М-82, чтобы показать детали филаментарной структуры. Фотография рис. 3, а

Такой высокий процент поляризации трудно объяснить рассеянием пылью. Но, что более важно, расчеты показывают, что гипотеза рассеяния не может объяснить наблюдаемую поверхностную яркость внешних филаментов. Причем расхождение получается в 100 раз, если принять плотность пыли такой, какая имеется в окрестности Солнца в нашей Галактике ( $10^{-26}$  г/см<sup>3</sup>). Даже если пыль будет оптически плотной в гало М-82 ( $\rho > 10^{-24}$  г/см<sup>3</sup>), то и тогда наблюдаемая поверхностная яркость ярчайших филаментов в 10 раз больше, чем было бы при рассеянии света на пыли.

Наша новая интерпретация на основе синхротронного излучения базируется на рассмотрении рис. 2, на котором представлены результаты фотографирования в поляризованном свете в желтых лучах на 200-дюймовом паломарском рефлекторе в феврале 1964 г. Комбинация из пластинки Kodak 11aD плюс 2-мм стекла GG11 и поляроидной пленки HN38 работает в области спектра 5000—6200 Å, свободной от эмиссионных линий. Репродукция рис. 2, а сделана от двух наложенных негативов, одного с 120-мин и другого с 60-мин экспозицией; электрический вектор поляроидной пленки имел позиционный угол (отсчитываемый к северу через восток)  $61^{\circ},5$ , т. е. примерно вдоль большой оси галактики. Нижняя репродукция рис. 2, б сделана по двум негативам того же типа, полученным с той же экспозицией в ту же ночь и обработанным (проявленным) вместе с первой парой, но с электрическим вектором поляроидной пленки, повернутым на позиционный угол  $151^{\circ},5$  (приблизительно параллельно малой оси галактики). Более яркие части филаментов имеют почти 100%-ную поляризацию, причем электрический вектор перпендикулярен преимущественному направлению филаментов. Южный внешний дугообразный филамент почти вверху рис. 1, б, первоначально открыт Джонсоном, виден слабо как на рис. 2, а, так и на рис. 2, б, но этого и следовало ожидать, даже если он сильно поляризован, так как его позиционный угол находится почти посередине между положениями электрического вектора инструмента, при которых были получены фотографии рис. 2, а и б.

представляет увеличенное изображение части составной голубой фотографии рис. 1, б. Здесь видно несколько нитеобразных структур, выходящих из главного тела галактики. Та же картина почти во всех деталях наблюдается на фотографии рис. 3, б, которая является увеличенной желтой поляризационной фотографией рис. 2, а, когда электрический вектор поляроидной пленки направлен вдоль большой оси. Однако филаменты в желтых лучах слабее, чем в голубых, что характерно для оптического синхротронного излучения, наблюдаемого с широкополосным фильтром в системе  $U, V, Y$  (см. вычисления Сэндейджа в приложениях к статье<sup>5</sup>). Большая часть структурных особенностей исчезает на рис. 3, в, который является увеличенной фотографией рис. 2, б, где электрический вектор поляроидной пленки лежит вдоль малой оси.

Наиболее правдоподобная интерпретация этих результатов состоит в том, что существует магнитное поле галактики М-82, которое вытянуто в основном вдоль малой оси. Это поле просируется внутрь гало вверх и вниз от большой оси до углового расстояния  $4',8$  с южной стороны и  $3',9$  — с северной, что соответствует протяженности филаментарной системы, показанной на рис. 1, б. По оценкам, расстояние до М-82 — примерно  $9,8 \cdot 10^{24}$  см<sup>2</sup> \*), что дает протяженность магнитного поля  $4,4 \cdot 10^3$  пс ( $1,3 \times 10^{22}$  см) от плоскости галактики в южную сторону и  $3,9 \cdot 10^3$  пс ( $1,2 \cdot 10^{22}$  см) — в северную.

Очевидно, М-82 является первой галактикой, в которой действительно наблюдается крупномасштабная структура магнитного поля. Планируется детальное картографирование поля, когда появятся более обширные поляризационные фотографии, сделанные в голубом цвете с разными позиционными углами. О происхождении поля можно только догадываться, но оно могло первоначально присутствовать в теле самой галактики и быть вытянутым плазмой, выброшенной первичным взрывом в полярных направлениях вдоль малой оси.

Расчет энергетики всей системы<sup>2</sup> показал, что средняя напряженность магнитного поля равна примерно  $10^{-5} \div 10^{-6}$  гс. Энергия электронов, вызывающих оптическое излучение, должна быть тогда чрезвычайно высока, как видно из следующих вычислений.

Релятивистский электрон с энергией  $E$ , движущийся в магнитном поле напряженностью  $H_{\perp}$ , направленном перпендикулярно движению электрона, будет излучать около частоты

$$\nu = 1,6 \cdot 10^{13} H_{\perp} E^2,$$

где  $\nu$  — в гц,  $H_{\perp}$  — в гс,  $E$  — в Гэв ( $10^9$  эв). Требуемая для оптического синхротронного излучения компонент М-82 частота  $\nu$  по крайней мере равна  $10^{15}$  гц, что следует из рис. 1, б—2, а, б и из условия фотоионизации водорода, рекомбинирующего затем в филаментах и наблюдаемого по  $H_{\alpha}$  за счет синхротронного излучения. Это дает  $E = 2,5 \cdot 10^3$  Гэв, если  $H_{\perp} = 10^{-5}$  гс, и  $E = 8 \cdot 10^3$  Гэв, если  $H_{\perp} = 10^{-6}$  гс — энергии, которые лежат в диапазоне энергий космических лучей \*\*). В ранее предполагаемой модели<sup>2</sup> М-82 средняя плотность энергии только электронов порядка  $10^3$  эв/см<sup>3</sup>, что примерно в 1000 раз больше плотности энергии протонной компоненты космических лучей в окрестности Солнца нашей Галактики \*\*\*). Таким образом, только из рассмотренной плотности энергии можно сделать вывод, что космические лучи в нашей Галактике могли

\*) Согласно<sup>2</sup> отношение полуосей галактики принимается равным 10. Это дает при выбранном расстоянии до М-82 размеры  $1,9 \cdot 10^{22}$  см  $\times$   $1,9 \cdot 10^{21}$  см.

\*\*\*) Электроны таких высоких энергий быстро теряют свою энергию (высвечиваются):

$$\left. \begin{aligned} E &= 2,5 \cdot 10^3 \text{ Гэв,} \\ H_{\perp} &= 10^{-5} \text{ гс} \end{aligned} \right\} t_{1/2} = 3,34 \cdot 10^4 \text{ лет,}$$

$$\left. \begin{aligned} E &= 8 \cdot 10^3 \text{ Гэв,} \\ H_{\perp} &= 10^{-6} \text{ гс} \end{aligned} \right\} t_{1/2} = 1,04 \cdot 10^6 \text{ лет.}$$

Если разлет газа в галактике происходит не в виде струй, то могут быть существенные потери и на расширение<sup>8</sup>. Все это остро ставит вопрос о механизме «подкачки» релятивистских частиц.

\*\*\*) Большая плотность космических лучей в М-82 приводит к тому, что галактика может являться источником  $\gamma$ - и рентгеновских лучей. По оценкам Гинзбурга, Озерного, Сыроватского<sup>8</sup>, потоки у Земли соответственно равны

$$F(E_{\gamma} > 1 \text{ Гэв}) \approx 10^{-9} \frac{\text{фотон}}{\text{см}^2 \text{сек}},$$

$$F_{\nu} = 10^{18} \text{ гц} \approx 3 \cdot 10^{-12} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{сек} \cdot \text{Å}}.$$

возникнуть в результате взрыва, аналогичного происходящему в настоящее время в М-82, но только взрыв был менее энергичен.

В заключение необходимо сказать о методах, использованных при получении фотографий для данного сообщения.

Во-первых, все репродукции даны в виде негативов (черные звезды на светлом фоне). Эта методика широко используется для приготовления астрономических отпечатков для демонстрирования изображения вблизи порога чувствительности, поскольку глаз обнаруживает малые перепады плотности гораздо лучше на светлом фоне, чем на темном.

Во-вторых, все репродукции, кроме рис. 1, а, являются составными отпечатками с двух или более наложенных друг на друга оригинальных негативов. Такие отпечатки выигрывают по сравнению с единичными негативными отпечатками при обнаружении слабых изображений по двум причинам: 1) отношение сигнала к шуму возрастает в  $N^{1/2}$  раз, где  $N$  — количество пластинок, сложенных вместе; 2) контрастность окончательного отпечатка для пороговых изображений возрастает в  $N$  раз.

Главный недостаток составной фотографии состоит в том, что увеличение контрастности, столь необходимое для выявления слабых деталей, превышает широту печатного материала \*) до такой степени, что быстро теряются детали в ярких частях изображения.

Эту проблему можно решить путем использования «масок» для контроля за большими перепадами плотности на площади изображения. Такое развитие метода ручной «маскировки», применяемого при печатании для предохранения от передержки ярких областей, более удовлетворительно, потому что изображение само осуществляет «маскировку» при помощи контроля с отрицательной обратной связью.

Нерезкий отпечаток напечатанного позитива делается на подходящей пленке или пластинке с контролируемой экспозицией и временем проявления, чтобы получить диапазон плотности обратный и несколько меньший, чем на напечатанном позитиве.

Зарегистрированные на позитиве и отпечатанные на высококонтрастной бумаге или пленке слабые структурные детали изображения сохраняются, не превышая широту печатного материала.

В случае рис. 1, б, 2 и 3 пределы плотности составных изображений так далеко перекрывают широту печатного материала, что никакой маскировкой нельзя выделить самые яркие детали вблизи центра. Следовательно, в ядре галактики не видно никаких деталей. Однако метод «масок» так сильно уменьшил градиент плотности по краям галактики, что видны детали в тех районах, которые иначе были бы совершенно темными. Так как техника «маскировки» с успехом применяется для выявления деталей, близких к ярким частям галактик, важно помнить, что нельзя делать никаких заключений относительно яркости филаментов на разных расстояниях от галактики по иллюстрациям, приведенным в данной работе.

*А. Сэндейдж, У. Миллер*

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. C. R. Lynds, *Astrophys. J.* **134**, 659 (1961).
2. C. R. Lynds and A. R. Sandage, *Astrophys. J.* **137**, 1005 (1963).
3. H. M. Johnson, *Publ. Natl. Radio Astron. Obs.* **1**, № 17 (1963).
4. A. Elvius, *Lowell Obs. Bull.*, № 19, 281 (1962).
5. T. A. Matthews and A. R. Sandage, *Astrophys. J.* **138**, 30 (1963).

#### ЛИТЕРАТУРА К ПРИМЕЧАНИЯМ ПЕРЕВОДЧИКА

6. E. Margaret Burbidge, G. R. Burbidge, Vera C. Rubin, *Astrophys. J.* **140** (3), 942 (1964).
7. K. J. Kellerman, *Publ. Owens Valley Radio Observ.* **1**, № 1 (1964).
8. В. Л. Гинзбург, Л. М. Озерной, С. И. Сыроватский, *Изв. АН СССР, сер. физ.*, **29**, 100 (1965).

\*) Широта печатного материала характеризует его способность выдерживать пропорциональность интенсивности света и почернения в больших пределах колебаний поверхностной яркости изображения.