

О ПОЛОЖЕНИИ ГАЗОПЫЛЕВОГО СЛОЯ
В ГАЛАКТИКЕ М 31

Е. Н. МАКАРЕНКО

Поступила 9 августа 1966

Исправлена 9 февраля 1967

Указывается на возможность отслоения газовых и пылевых масс от плоскости звездных спиральных рукавов М 31. Показано, что спиральная структура системы эмиссионных туманностей по наблюдениям [1] выявляется наилучшим образом в допущении $i_1 = 11^\circ$ и $\theta_1 = 33^\circ.7$ для плоскости газа и пыли и $i_2 = 16^\circ$ и $\theta_2 = 39^\circ.7$ для плоскости звезд. Получено значение угла между плоскостями $\varphi = 7^\circ.5$ и позиционного угла проекции на картинную плоскость линии пересечения плоскостей $\psi = 21^\circ$.

Предложенная гипотеза объясняет наблюдаемое распределение эмиссионных туманностей и некоторые особенности карт радиояркости М 31.

Обсуждаются фотометрические эффекты, подтверждающие возможность отслоения газопылевой составляющей.

За последние годы появилось значительное число работ, посвященных всестороннему изучению М 31. В этих работах содержится, на наш взгляд, ряд свидетельств в пользу отслоения газопылевой галактической составляющей от спиральных рукавов. Такая составляющая образует слой, который наклонен под сравнительно небольшим углом к основной галактической плоскости. В предлагаемой статье приводятся некоторые аргументы, подтверждающие эту точку зрения.

В результате исследований спиральной структуры М 31 по наблюдениям эмиссионных газовых туманностей [1] Арп показал следующее [2]:

а) Ход звездных рукавов наилучшим образом представляется двуручавной спиралью

$$r = 30' e^{0.13 \theta}, \quad (1)$$

которая соответствует углу наклона плоскости рукавов к лучу зрения, равному 16° .

б) Двухрукавная плоская спираль не может представить наблюдаемое расположение цепочек эмиссионных туманностей.

в) Удовлетворительного согласования эмиссионных туманностей с ветвями спирали можно достичь, если принять для юго-восточной половины видимого изображения М 31 угол наклона $i = 16^\circ$ и позиционный угол большой оси $\theta = 37^\circ.7$, а для северо-западной $i = 11^\circ$ и $\theta = 34^\circ.7$.

Для объяснения такого различия Арп выдвинул гипотезу о кривлении галактической плоскости у М 31. При этом вращение позиционного угла можно считать кажущимся эффектом, отражающим изменение в наклоне спиральных ветвей. Возможное искривление галактической плоскости связывалось с магнитно-плазменным взаимодействием М 31 и М 32, осуществляющимся непосредственно через связывающий их рукав. Однако против такой интерпретации наблюдаемой картины выдвинуто следующее возражение: как показали радионаблюдения нейтрального водорода на волне 21 см, проведенные Эрджлом [3], вблизи М 32 отсутствует повышение контуров лучевых скоростей, которое должно было бы наблюдаться в случае магнитноплазменного ускорения, вызывающего искривление галактической плоскости.

Гораздо более правдоподобной представляется нам возможность реального отклонения газовых и пылевых масс от плоскости звездных рукавов. Как указывает Б. А. Воронцов-Вельяминов [4], перекося слоя газопылевой материи является одним из проявлений взаимодействия между галактиками. А. В. Засов, исследовавший вопрос о деформации поглощающей материи в галактиках [5], нашел, что наклон газопылевого слоя к основной плоскости — явление не очень редкое: из числа 80 галактик, видимых с ребра, более чем у 20% плоскость пыли не совпадает с экваториальной плоскостью. Деформация газового диска обнаружена и у нашей Галактики [6]. В настоящее время механизм межгалактического взаимодействия еще не известен. Но если, в случае М 31 газопылевой слой действительно наклонен к плоскости, в которой лежат спиральные ветви, то это обстоятельство должно отразиться на распределении эмиссионных туманностей и вызвать целый ряд фотометрических эффектов.

Нами сделана попытка оценить величину угла между основной плоскостью и плоскостью газопылевого слоя. В связи с этим были построены картины расположения эмиссионных туманностей в основной плоскости (то есть „виды сверху“) для различных углов i (от 10° до 16° через 1°) и θ (от $33^\circ.7$ до $41^\circ.7$ с тем же шагом).

Сопоставление этих картин с двухрукавной спиралью (1), полученной по звездам, показало, что систему эмиссионных туманностей удает-

ся наилучшим образом уложить на двуручавную спираль, если допустить, что:

1. Газопылевой слой, концентрирующийся близ плоскости с $i_1 = 11^\circ$, $\theta_1 = 33.7$ пересекает плоскость звездных рукавов с $i_2 = 16^\circ$ и $\theta_2 = 39.7$.

2. Эмиссионные туманности возникают в местах „соприкосновения“ водородной составляющей газопылевого слоя с горячими звездами. На рис. 1 в координатной системе Арпа представлены: двуручавная спираль (сплошная линия), эмиссионные туманности, лежащие

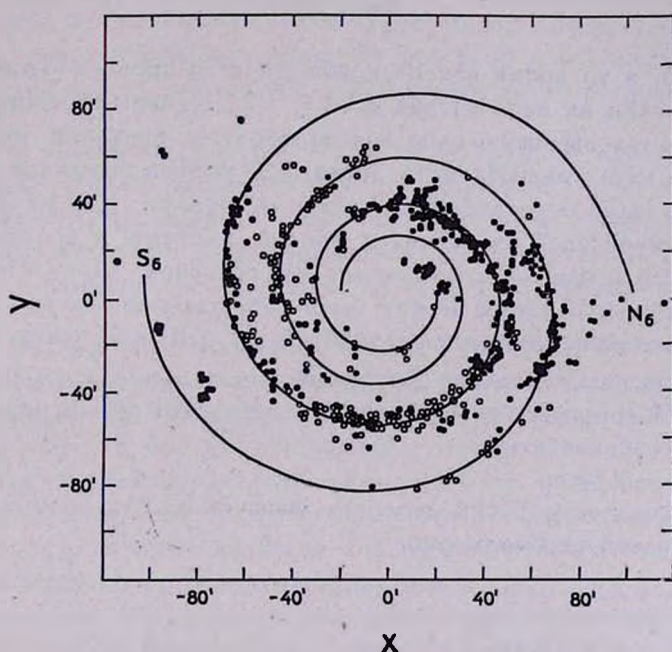


Рис. 1. Спиральная структура системы эмиссионных туманностей. В координатной системе Арпа представлены: двуручавная спираль (сплошная линия), эмиссионные туманности, лежащие в основной плоскости М 31 (темные точки) и положения, которые заняли бы эмиссионные туманности, повторяющие структуру газопылевых рукавов, если совместить плоскости. Буквами S_6 и N_6 отмечены соответственно шестая южная и шестая северная звездные спиральные ветви.

в основной плоскости М 31 (темные точки) и положение, которое заняли бы эмиссионные туманности, повторяющие структуру газопылевых рукавов, если бы обе указанные плоскости удалось совместить (кружки).

Допустим, что каждая из двух основных плоскостей (то есть плоскость звезд и плоскость пыли) проходит через ядро галактики; в прямоугольной координатной системе с началом в ядре, осью z совпадающей с лучом зрения и осью x , направленной на север, каждая из таких плоскостей описывается уравнением

$$x \sin \theta - y \cos \theta + z \operatorname{tg} i = 0; \quad (2)$$

угол φ между этими плоскостями находится из соотношения

$$\cos \varphi = \frac{\cos(\theta_2 - \theta_1) + \operatorname{tg} i_1 \operatorname{tg} i_2}{\sec i_1 \cdot \sec i_2} \quad (3)$$

и равен 7.5° , в то время как позиционный угол проекции на картинную плоскость линии их пересечения есть $\psi = 21^\circ$. Таким образом, наибольший подъем газопылевого слоя над плоскостью звездных рукавов достигается в юго-западной части диска, а в противоположной его части слой газа и пыли опускается за звездные рукава. Весьма возможно, что газопылевой слой не является вполне плоским, а его отклонение увеличивается в наиболее удаленных от основной плоскости частях. Следствием такого изгиба может быть наблюдаемое (на рис. 1) спрямление цепочек эмиссионных туманностей в I и III квадрантах.

Предложенная гипотеза о наклоне газопылевого слоя к основной плоскости М 31 позволяет естественно объяснить целый ряд наблюдаемых эффектов.

1. Наблюдаемое распределение эмиссионных туманностей по квадрантам довольно неравномерно:

квадрант	I $X > 0; Y > 0$	II $X < 0; Y > 0$	III $X < 0; Y < 0$	IV $X > 0; Y < 0$
число объектов	250	131	121	186

В свете предложенной гипотезы такая неравномерность понятна: в пределах звездных рукавов поглощение невелико, и мы можем наблюдать почти все эмиссионные туманности в тех частях галактики, где газ лежит, в основном, за звездными рукавами — то есть у М 31 в северо-восточной части (I и примыкающие к нему части II-го и IV-го квадрантов на рис. 1); в то же время в юго-западной части для наблюдений доступна лишь некоторая доля всех туманностей, не экранируе-

мых полосами пыли (наблюдаемые здесь туманности располагаются в промежутках между темными полосами и „повторяют“ их структуру).

2. В I и III квадрантах на удалении пятой (по Бааде) спиральной ветви (на расстоянии $57'$ от ядра) видно значительное уменьшение числа эмиссионных туманностей. В то же время по данным ван ден Берга [7] в этой области присутствуют горячие звезды ОВ-ассоциаций, а радионаблюдения на волне 21 см [3] не показывают заметного падения плотности водорода. Это противоречие можно объяснить, если учесть, что в местах наибольшего расхождения плоскостей звезд и газа расстояние между ними на уровне 5 и 6 ветвей превышает 1.3 клс . Правда, если провести аналогию с нашей Галактикой, в наиболее отклоняющихся от основной плоскости частях водородный слой может значительно увеличивать свою толщину.

3. По внешнему контуру карты радиояркости атомарного водорода у М 31 Эрджл нашел значение позиционного угла большой оси $\theta = 33^\circ$ [3]. Это довольно близко согласуется с позиционным углом для газопылевого слоя, найденным выше по эмиссионным туманностям ($\theta_1 = 33.7^\circ$), и такое согласие вряд ли является случайным.

4. Предложенная гипотеза может в целом объяснить также и возникновение выступа на картах радиояркости М 31 в частотах 1415 [8], 1400 [9] и 600 [8] мц , заключенного в интервале позиционных углов $12-24^\circ$. В местах наибольшего проникновения газа и пыли в пространство между звездами — то есть близ линии пересечения основных плоскостей — существует повышенная концентрация ионизованного водорода, который является основным источником теплового излучения, преобладающего на этих частотах.

Рассмотрим теперь некоторые фотометрические данные, которые подтверждают, как нам кажется, отслоение газопылевой составляющей от звездных рукавов в случае М 31.

1. В видимой структуре западной и восточной половин оптического изображения М 31 имеются хорошо известные различия. На западе спиральная структура выявляется, в основном, благодаря присутствию резких полос темной материи, на востоке — благодаря звездным рукавам. Восточная половина в целом является более яркой и голубой. На картах изофот М 31 ясно видна асимметрия общей фотометрической картины [10, 11]. Все это, как кажется, подтверждает предложенную точку зрения.

2. Как следует из описания ОВ-ассоциаций в М 31, данного ван ден Бергом [7], на ближнем северо-западном крае, близ ОВ-61, ассоциации вытянуты вдоль темной полосы, причем они ограничены этой полосой с одной стороны, а по мере продвижения на юг начинают проглядывать между темными полосами. Так, ассоциация ОВ-72 рассечена полосой пыли на две части, единой рассеченной ассоциацией представляется также ОВ-67 и ОВ-68; блеск ассоциаций наружного кольца в этой части видимого изображения галактики ослаблен. На западном крае (III квадрант) в промежутке между внешним и внутренним кольцами ассоциаций значительно ослаблен блеск звезд поля. Причина здесь видимо кроется не в том, что эта часть галактики бедна звездами или содержит звезды пониженной светимости, а в том, что она экранируется от наблюдателя слоем пылевой материи. Здесь очень отчетливо видны длинные узкие полосы пыли, которые тянутся почти через четверть всего диска. Ширина и направление этих полос позволяют предположить, что пылевые слои образуют с лучом зрения меньший угол, чем звездный диск.

3. Анализируя поглощение в южной части М 31 можно опереться на данные о 414 исследованных здесь цефеидах [12 — 14]. Приняв средний модуль расстояния

$$M = 24^m 20 \pm 0^m 14, \quad (4)$$

найденный Бааде по цефеидам IV поля и подтвержденный Арпом [15] по Новым, и используя наклон зависимости „период-светимость“ по Крафту [16] совместно с нульпунктом Арпа [17], можно для цефеид М 31 вычислить значения светимостей по их периоду:

$$M_B = 24^m 20 - 1^m 33 - 2^m 52 \lg P. \quad (5)$$

Уклонения наблюдаемых медианных величин от вычисленных оказываются положительными и превышают у ряда звезд 2^m . Такие уклонения могут обуславливаться многими причинами: ошибками наблюдений, собственной дисперсией, связанной с конечной шириной полосы неустойчивости, занимаемой цефеидами на диаграмме Г-Р, дифференциальными эффектами, связанными с поглощением в М 31, ошибками при учете поглощения света в Галактике, различиями между звездными величинами, найденными в результате осреднения интенсивностей и медианными величинами — и т. п. При грубом анализе можно наблюдаемые уклонения полностью отнести на счет поглощения света в пределах М 31 (остальные факторы либо оказывают относительно слабое влияние, либо примерно одинаково воздействуют на величины уклоне-



Рис. 2. Карта уклонений наблюдаемых медианных величин блеска цефеид от вычисленных по соотношению (5). Используются обозначения: $\blacktriangle$ $O-C > 2^m 0$, $\bullet$ $1^m 0 < O-C \leq 20$, $\circ$ $O-C < 1^m 0$. Север справа. Восток сверху.



Рис. 3. Положения цефеид типа С в южной части М 31.

ний у всех звезд). Оправданность этого допущения подтверждается при анализе относительных цветов цефеид в М 31. Карта уклонений $O - C$ приводится на рис. 2; все цефеиды разбиты здесь на 3 группы в соответствии с величиной уклонений (см. подпись к рисунку). Легко усмотреть следующее:

а) Наибольшие уклонения ($O - C > 2^m0$) присущи цефеидам, процирующим на картинную плоскость совместно с облаками темной материи; эти звезды просвечивают сквозь слой поглощающего вещества.

б) В юго-восточной части, где пылевой слой проникает в звездную спираль, наибольшее ослабление испытывают цефеиды, лежащие к юго-востоку от темных полос. Звезды, лежащие к северо-западу, ослабления блеска не показывают. Это можно рассматривать как подтверждение правильности обычно принимаемой ориентации М 31 в пространстве, соответствующей закручиванию спиральных ветвей при галактическом вращении.

в) Почти все цефеиды, располагающиеся в слабо светящемся поле звезд в юго-западной части, к западу от узкой вытянутой пылевой полосы испытывают поглощение, превышающее 1^m . Эта область галактики экранируется слоем пыли.

4. Среди цефеид М 31 имеются звезды типа C_1 , для которых характерны почти синусоидальные кривые блеска с малыми амплитудами. Подобные объекты в наблюдаемой части нашей Галактики располагаются в довольно узкой полосе вдоль спирального рукава [18]. Распределение таких звезд в случае М 31 показано на рис. 3; видно, что эти объекты относятся к населению спиральных рукавов и локализируются в их внутренних частях. Положение этих цефеид в юго-западной части М 31 дает основание считать, что ось рукава не совпадает с линией наибольшей наблюдаемой яркости и что значительная часть всей ширины звездной спирали скрыта здесь полосами пыли, располагающимися над основной плоскостью.

Следует отметить, что, если гипотеза об отслоении газопылевой составляющей у М 31 верна, то несколько иную интерпретацию может получить построенная Кинманом [19] карта расположения скоплений. Выделенные им по признаку различия в цвете группы скоплений „b“ ($0^m5 \leq B - V < 1^m0$) и „c“ ($B - V \geq 1^m0$) характеризуются различной локализацией в галактике: скопления „c“ группируются в западной части видимого диска, а основная масса скоплений „b“ в его восточной половине. По мнению Кинмана состав этих двух групп определяется, в основном, шаровыми скоплениями, испытывающими раз-

личную степень покраснения; это допущение позволяет истолковать наблюдаемую асимметрию в распределении групп вдоль малой оси как свидетельство правильности принятой ориентации основной плоскости М 31 (северо-западная часть — более близкая). Однако, при этом не находит объяснения резко выраженная асимметрия в распределении групп „b“ и „c“ вдоль большой оси М 31. Различия форм и звездного состава у скоплений разных типов приводят к слишком широким и перекрывающимся пределам изменения их собственных интегральных цветов. Поэтому не исключена возможность того, что значительная часть наблюдаемых скоплений в М 31 относится к числу открытых и группируется вблизи галактической плоскости. В этом случае наблюдающееся покраснение и ослабление скоплений в той части галактики, где газопылевой слой возвышается над плоскостью звездных спиралей, становится вполне понятным; указанная выше асимметрия получает рациональное объяснение.

В заключение автор выражает глубокую благодарность Б. А. Воронцову-Вельяминову и В. П. Цесевичу за полезные советы.

Одесская астрономическая
обсерватория

ON THE POSITION OF GAS-DUST LAYER IN GALAXY M 31

E. N. MAKARENKO

The possibility of the exfoliation of gas and dust masses from the plane of stellar spiral arms of M 31 is pointed out. It is shown that the spiral structure of the system of emission nebulae according to the observations [1] makes itself apparent in the best way at the admission $i_1 = 11^\circ$ and $\theta_1 = 33^\circ.7$ for gas and dust plane and $i_2 = 16^\circ$ and $\theta_2 = 39^\circ.7$ for the star plane. The value of the angle between the two planes is $\varphi = 7.5^\circ$ and the position angle of projection on the sky of the intersection line of the planes is $\psi = 21^\circ$.

The proposed hypothesis explains the observed distribution of the emission nebulae and some peculiarities of the maps of the radio-brightness.

The photometric effects are discussed, confirming the possibility of the exfoliation of the gas-dust component.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. W. Baade, H. C. Arp, Ap. J., 134, 1027, 1964.
2. H. C. Arp, Ap. J., 124, 1045, 1964.
3. E. Argyle, Ap. J., 141, 750, 1965.
4. Б. А. Воронцов-Вельяминов, Труды VI совещания по вопросам космогонии, М., 1957.
5. А. В. Засов, Астрон. ж., 42, 959, 1965.
6. Т. А. Лозинская, Н. С. Кардашев, Астрон. ж., 39, 840, 1962.
7. S. van den Bergh, Ap. J., Suppl. ser., 9, 65, 1964.
8. J. D. Kraus, Nature, 202, 269, 1964.
9. J. D. Kraus, Nature, 198, 844, 1963.
10. B. Lindblad, R. Brahe, Stockholm Obs. Medd., № 58.
11. G. de Vaucouleurs, Ap. J., 128, 465, 1958.
12. W. Baade, H. H. Swope, A. J., 68, 435, 1963.
13. W. Baade, H. H. Swope, A. J., 70, 212, 1965.
14. S. Geraschkin, A. J., 67, 334, 1962.
15. H. C. Arp, A. J., 61, 15, 1956.
16. K. P. Kraft, Ap. J., 134, 616, 1961.
17. H. C. Arp, A. J., 65, 404, 1960.
18. Е. Н. Макаренко, сб. "Физика звезд и диффузной материи", Киев, "Наукова думка", 1966.
19. T. D. Kinman, Ap. J., 137, 213, 1963.