

УДК: 524.7:524.57

РАСШИРЕНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ СТРУКТУР В ГАЛАКТИКАХ

В. А. АНТОНОВ, О. А. ЖЕЛЕЗНЯК

Поступила 2 июня 1986

Принята к печати 14 июля 1987

Рассмотрено расширение вращающегося газо-пылевого кольца в гравитационном поле галактики. Получено решение уравнения движения при учете нагребания кольцом межзвездной среды, а также давления излучения ядра галактики на пыль, находящуюся в кольцевом образовании. Показано на примере NGC 4736, что истечение вещества из ядер галактик может приводить к возникновению внутренних кольцевых структур.

1. *Введение.* Проблеме происхождения кольцевых структур в галактиках посвящен ряд теоретических работ, в которых выдвинуты различные механизмы их образования. Кратко остановимся на каждой из предложенных гипотез.

1) Кольцевые образования рассматриваются как результат действия сил вязкости в межзвездной среде, которая состоит из облаков. Кольца, согласно этой гипотезе, будут образовываться в области максимума угловой скорости вращения галактики [1—3].

2) Согласно Линдбладу, кольцевые структуры могут возникать в областях галактики, где орбиты частиц, движущихся в гравитационном поле, устойчивы. Предполагается, что в процессе эволюции вещество должно накапливаться в указанных областях, образуя при этом кольцевые структуры [4]. С современным развитием этой идеи, учитывающим численные эксперименты, можно познакомиться, например, по обзору [5].

3) Кольца связываются с распространением ударных волн в дисках галактик [6]. Источником, возбуждающим ударные волны, предполагаются активные процессы, происходящие в галактических ядрах.

4) Кольцевые структуры-солитоны в самогравитирующих дисках [7]. Для того, чтобы возникли такие солитоны, необходимо предполагать существование в галактике источника, который задает специальные возмущения. Здесь отметим, что образовавшиеся кольцевые структуры в галактиках часто сравниваются с солитонами, которые получаются в опытах с вязкой вращающейся жидкостью [8]. При проведении такого сравнения

считается, что гравитация и магнитное поле в галактических дисках не играют существенной роли.

5) Результаты вычислений, проведенные в [9, 10], показали, что кольцевые образования могут возникать в результате взаимодействия галактик. Наблюдения кольцевой галактики AM 064—741 [11] указывают на то, что в отдельных случаях этот механизм может действовать, хотя столкновения галактик маловероятны [12].

Современные спектральные исследования галактик позволили обнаружить в их центральных областях расширяющиеся кольцевые образования [13, 14]. Похожие структуры также были найдены в ядерной области нашей Галактики [15].

В исследованиях, проведенных нами ниже, предложен механизм формирования расширяющегося кольцевого образования в галактике, состоящего преимущественно из газа и пыли, а также рассматривается его динамика.

Причиной формирования расширяющихся кольцевых структур, по-видимому, являются активные процессы, протекающие в ядрах галактик. Активность ядра, как было впервые отмечено в работе [16], может привести к выбросу части вещества из центральной области галактики. Действительно, в ряде галактик с активными ядрами наблюдается радиальное движение вещества [17], которое, возможно, приводит к образованию описанных структур. На движущееся в галактике газо-пылевое кольцо действуют несколько сил: гравитационная, газового и светового давления, а также сила, которая возникает за счет изменения массы кольцевого образования. Нагревание кольцом межзвездной среды увеличивает со временем его массу, что приводит к торможению расширения. Кольцо также подвержено торможению со стороны гравитационного поля галактики. Напротив, силы газового и светового давления, порожденные активностью ядра, стремятся поддержать расширение.

Очевидно, что на некотором расстоянии от центра галактики силы могут скомпенсировать друг друга, тогда расширение прекратится и кольцо превращается в стационарное образование. Наблюдения показывают [18], что внутри ряда галактик существуют такие стационарные структуры.

В настоящей работе исследуется расширение вращающегося газо-пылевого кольцевого образования в галактике при некоторых упрощающих предположениях: во-первых, считаем, что гравитационный потенциал галактики осесимметричный и определяется звездной составляющей; во-вторых, в области галактики, где рассматривается движение кольца, будем пренебрегать градиентом газового давления. При решении задачи принимаем во внимание только давление излучения на пыль, опуская при этом малое его действие в галактических условиях на электроны и атомы.

2. *Расширение вращающегося газо-пылевого кольца в гравитационном поле галактики.* Известно, что в активных ядрах галактик в оптическом диапазоне наблюдаются очень широкие эмиссионные линии, профиль и эквивалентная ширина которых изменяются со временем таким образом, что их образование, согласно [19], может быть связано с выбросами облаков газа из ядерной области галактики под действием пучков релятивистских электронов. Скорости облаков, приобретаемые при взаимодействии с релятивистскими электронами, составляют примерно $v, \approx 10^8 + \div 10^9$ см/с, при их характерном размере $10^{15} \div 10^{16}$ см.

В процессе радиального движения такие облака расширяются под действием собственного светового давления, что приводит к увеличению скважности облаков с расстоянием от центра галактики. Как следствие этого, облака сливаются друг с другом на расстоянии $r_c \approx 100 \div 150$ пк и образуют сплошную газо-пылевую оболочку. Все это справедливо при допущении, что выброс облаков происходит изотропно.

Несколько иначе обстоит дело, если существует анизотропия выбросов, т. е. имеется выделенное направление, на котором облака выбрасываются чаще со скоростями, превышающими среднюю. Причины, побуждающие возникновение такой анизотропии, могут быть: магнитное поле ядра галактики, вращение ее центральной области или несимметричность гравитационного поля галактики. Тогда в области галактики, где $r > r_c$, из нескольких заторможенных при движении облаков возможно формирование расширяющихся кольцеобразных структур.

Пусть на расстоянии r_0 от центра галактики в ее экваториальной плоскости образовалось кольцо с радиусом поперечного сечения β_0 , причем отношение $\frac{\beta_0}{r_0} < 1$ (см. рис. 1). При движении кольца в галактической среде за счет нагребания β будет увеличиваться. Принимаем, что β — известная функция от r .

Выделим из вещества кольца движущийся со скоростью $\vec{v}$ объем, имеющий массу $\mu(t)$ и, записав для него закон сохранения импульса, получим уравнение движения

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f} + \frac{\dot{\mu}}{\mu} (\vec{v}' - \vec{v}), \quad (1)$$

где $\vec{f}$ — плотность действующих массовых сил (сила, отнесенная к единице массы), $\dot{\mu}$ — скорость изменения массы материальной частицы, $\vec{v}'$ — скорость движения галактической среды. Учитывая симметрию рассматривае-

мой задачи, удобно перейти к полярной системе координат (r, φ) . Тогда, векторное уравнение (1), можно записать в виде системы двух уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dv_r}{dt} = \frac{v_\varphi^2}{r} + f - \frac{\dot{\mu}}{\mu} v_r, \\ \frac{dv_\varphi}{dt} = -\frac{v_r \cdot v_\varphi}{r} + \frac{\dot{\mu}}{\mu} (v'_\varphi - v_\varphi). \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{dv_\varphi}{dt} = -\frac{v_r \cdot v_\varphi}{r} + \frac{\dot{\mu}}{\mu} (v'_\varphi - v_\varphi). \quad (3)$$

Если $\mu = \frac{m\dot{\theta}}{2\pi}$, то легко видеть, что

$$\frac{\dot{\mu}}{\mu} \approx \frac{4\pi\beta \cdot r \cdot \rho_s \cdot v_r}{m}, \quad (4)$$

где m — масса кольца, $v_r = \frac{dr}{dt}$ — радиальная скорость расширения, ρ_s — плотность среды, в которой движется кольцо, β — коэффициент набегания. Соответственно, полное изменение массы кольца:

$$\frac{dm}{dt} \approx 4\pi\beta \cdot r \cdot \rho_s \cdot v_r. \quad (5)$$

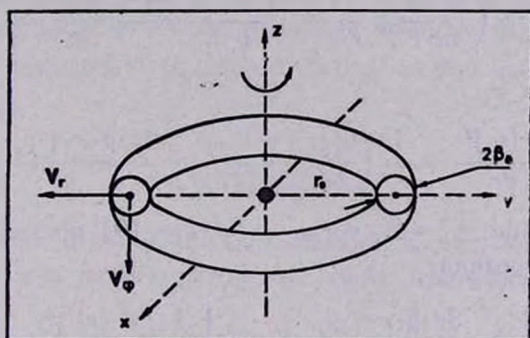


Рис. 1. Расширяющееся кольцевое образование в галактике.

Деля на v_r и интегрируя (5), получим

$$m(r) = m_0 + 4\pi \int_{r_0}^r \beta \rho_s \xi d\xi, \quad (6)$$

где m_0, r_0 — масса и радиус кольца в начальный момент времени.

Используя (4), можно преобразовать систему уравнений (2) и (3) к следующему виду:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dv_r}{dr} &= \frac{v_r^2}{r \cdot v_r} + \frac{f}{v_r} - \frac{4\pi \cdot \beta \cdot r \cdot \gamma \cdot \rho_s \cdot v_r}{m}, \end{aligned} \right. \quad (2')$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dv_\varphi}{dr} &= -\frac{v_\varphi}{r} + \frac{4\pi \cdot \beta \cdot r \cdot \gamma \cdot \rho_s}{m} (v'_\varphi - v_\varphi). \end{aligned} \right. \quad (3')$$

Вначале найдем закон изменения углового момента кольца со временем:

$$\frac{d}{dt} (m \cdot r \cdot v_\varphi) = r v_\varphi \frac{dm}{dt} + m v_\varphi \cdot v_r + m \cdot r \frac{dv_\varphi}{dt} = 4\pi r^2 \beta \cdot \gamma \cdot \rho_s v_r \cdot v'_\varphi. \quad (7)$$

Разделив (7) на v_r , а затем проинтегрировав, имеем:

$$m \cdot K = m_0 K_0 + 4\pi \int_{r_0}^r \beta \cdot \rho_s v'_\varphi(\xi) \xi^2 d\xi = \Phi(r), \quad (8)$$

где K_0 , K — удельный угловой момент кольца в начальный и произвольный момент времени. Последняя формула показывает, что при наших предположениях изменение углового момента кольца является только функцией от r . Перейдем теперь к уравнению (2). Учитывая (8), его можно записать так:

$$\frac{dv_r}{dr} = \left(\frac{\Phi(r)}{m \cdot r} \right)^2 \frac{1}{r \cdot v_r} + \frac{f}{v_r} - \frac{4\pi \cdot \beta \cdot r \cdot \gamma \cdot \rho_s \cdot v_r}{m}$$

или, умножив на v_r ,

$$\frac{1}{2} \frac{d(v_r)^2}{dr} = \frac{1}{r} \left(\frac{\Phi(r)}{m \cdot r} \right)^2 + f - \frac{4\pi \cdot \beta \cdot r \cdot \gamma \cdot \rho_s \cdot v_r^2}{m}. \quad (9)$$

Введем обозначение $v_r^2 = X$, тогда уравнение (9) примет более удобный вид для интегрирования:

$$\frac{dX}{dr} + \frac{8\pi \cdot \beta \cdot r \cdot \gamma \cdot \rho_s}{m} X = 2 \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\Phi(r)}{m \cdot r} \right)^2 + f \right]. \quad (10)$$

Хорошо известно решение такого уравнения:

$$X(r) = \frac{1}{n(r)} \left\{ 2 \int_{r_0}^r \left[\frac{1}{\xi} \left(\frac{\Phi(\xi)}{m \cdot \xi} \right)^2 + f \right] \eta(\xi) d\xi + X(r_0) \right\}, \quad (11)$$

где

$$\eta(r) = \exp \left(8\pi \int_{r_0}^r \frac{\beta \cdot \gamma \cdot \rho_s \cdot \xi}{m} d\xi \right).$$

Для дальнейшего анализа решения уравнения (10) необходимо конкретизировать ряд величин, которыми описывается галактическая среда, активность ядра галактики и сила ее гравитации.

Прежде всего рассмотрим действующие силы. В нашей задаче при нахождении гравитационной силы удобно воспользоваться формулой

$$f_g = \frac{a^2 \cdot r}{r^2 + b^2}, \quad (12)$$

где a и b — постоянные, которые определяются из кривой вращения галактики.

Несколько сложнее найти плотность силы светового давления на пылевые частицы, содержащиеся в веществе кольцевого образования. Трудность здесь заключается в том, что f_c зависит от многих плохо известных параметров: концентрации пыли, от распределения ее частиц по размерам, формы частиц, природы вещества, из которого они состоят, и т. д.

По этой причине вряд ли возможен точный расчет f_c , поэтому в таком случае приходится пользоваться приближенными вычислениями, которые справедливы при определенных допущениях. Пусть пылевая составляющая в кольцевом образовании распределена равномерно и импульс, полученный частицами пыли при взаимодействии с излучением, быстро перераспределяется по газу. Тогда, принимая пылевые частицы сферическими со средним радиусом a и плотностью ρ_d , можно найти их концентрацию n_d в кольце:

$$n_d = \frac{3 \cdot q \cdot m}{8\pi^3 a^3 \rho_d^2 \cdot r \cdot \rho_d},$$

где q — доля пыли в кольцевом образовании. Если q не меняется со временем, то, как легко видеть, плотность силы светового давления будет равна:

$$f_c \approx \frac{3 \cdot q \cdot L}{16\pi \cdot c a \cdot \rho_d \cdot r^2}, \quad (13)$$

где L — светимость ядра галактики в активной фазе, c — скорость света.

Перейдем к рассмотрению газо-пылевой составляющей галактик. Наблюдения показывают, что основная часть газа и пыли в спиральных галактиках сосредоточена вблизи их экваториальной плоскости, образуя тонкий слой в виде диска, толщиной порядка $200 \div 500$ пк. Общее количество газа и пыли, которое содержится в спиральных галактиках, составляет примерно 5—10% от их полной массы [20]. Используя данные радионаблюдений галактик, можно получить распределение плотности нейтрального водорода по диску. Согласно [21], такое распределение хорошо описы-

вается степенной функцией от радиуса, хотя в ряде случаев существуют отклонения от такой зависимости [22]. Можно считать, что распределение плотности межзвездного вещества по диску также подчиняется степенному закону:

$$\rho_s = \rho_s(r_0) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\lambda_2}, \quad (14)$$

где λ_2 — постоянная величина, $\rho_s(r_0)$ — плотность межзвездной среды на расстоянии r_0 .

Помимо этого, межзвездная среда принимает участие в дифференциальном вращении галактики, поэтому для решения задачи необходимо задать зависимость скорости вращения v_φ от расстояния. Предположив, что существует равновесие между центробежной и гравитационной силами, можно легко определить при помощи формулы (12) эту зависимость.

$$v_\varphi'(r) = \frac{a \cdot r}{\sqrt{r^2 + b^2}}. \quad (15)$$

Удобно для дальнейших расчетов вычислить массу кольца по формуле (6) и функцию $\Phi(r)$ по формуле (8). Положив $\beta = \beta_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\lambda_1}$, при учете (14) и (15), получим

$$m(r) = m_0 + \frac{4\pi \cdot \gamma \cdot \beta_0 \cdot \rho_s(r_0)}{\lambda_1 - \lambda_2 + 2} \left(\frac{r^{\lambda_1 - \lambda_2 + 2}}{r_0^{\lambda_1 - \lambda_2}} - r_0^2 \right), \quad (16)$$

$$\Phi(r) = m_0 K_0 + \frac{4\pi \cdot \gamma \beta_0 \rho_s(r_0) \cdot a}{r_0^{\lambda_1 - \lambda_2}} \int_{r_0}^r \frac{\xi^{\lambda_1 - \lambda_2 + 3}}{\sqrt{\xi^2 + b^2}} d\xi. \quad (17)$$

Получно найдем зависимость скорости вращения кольца от расстояния

$$v_\varphi(r) = \frac{m_0 v_\varphi(r_0) \cdot r_0}{m \cdot r} + \frac{4\pi \cdot \gamma \beta_0 \rho_s(r_0) \cdot a}{r_0^{\lambda_1 - \lambda_2} m \cdot r} \int_{r_0}^r \frac{\xi^{\lambda_1 - \lambda_2 + 3}}{\sqrt{\xi^2 + b^2}} d\xi. \quad (18)$$

Вернемся к решению (11). Задавая различные значения λ_1 и λ_2 , прикладываемые для галактик, можно получить ряд частных случаев. Здесь рассмотрим один из них, когда $\beta = \beta_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{1/2}$, $\rho_s = \rho_s(r_0) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-1/2}$, и вращение межзвездной среды задается выражением (15). Тогда, согласно формулам (16) и (18), будем иметь:

$$m = m_0 + \varepsilon (r^2 - r_0^2), \quad (16a)$$

$$v_{\varphi} = \frac{m_0 \cdot v_{\varphi}(r_0) \cdot r_0}{m \cdot r} + \frac{2 \cdot a \cdot \varepsilon}{m \cdot r} \left[\frac{1}{3} (r^2 + b^2)^{3/2} - b^2 (r^2 + b^2)^{1/2} + c_1 \right], \quad (18a)$$

где $\varepsilon = 2\pi\gamma\beta_0\rho_s(r_0)$, $c_1 = b^2(r_0^2 + b^2)^{1/2} - \frac{1}{3}(r_0^2 + b^2)^{3/2}$.

Подставив полученные выражения в (11), учитывая вычисленное $\eta(r)$, а также (12) и (13), решение можно привести к такому виду:

$$\begin{aligned} X(r) = \frac{2}{(r^2 + \psi)^2} & \left\{ c_2 \int_{r_0}^r \frac{d\xi}{\xi} + c_3 \int_{r_0}^r \frac{(\xi^2 + b^2)^{3/2}}{\xi^3} d\xi + c_4 \int_{r_0}^r \frac{(\xi^2 + b^2)^{1/2}}{\xi^2} d\xi + \right. \\ & + \frac{4a^2}{9} \int_{r_0}^r \xi^3 d\xi + \frac{3 \cdot q \cdot L}{16\pi \cdot c \cdot a \cdot \rho_d} \int_{r_0}^r \frac{(\xi^2 + \psi)^2}{\xi^2} d\xi - \\ & \left. - a^2 \int_{r_0}^r \frac{(\xi^2 + \psi)^2 \xi}{\xi^2 + b^2} d\xi + \frac{1}{2} (r_0^2 + \psi)^2 X(r_0) \right\}, \quad (19) \end{aligned}$$

где введены обозначения:

$$\psi = \frac{m_0}{\varepsilon} - r_0^2 > 0,$$

$$c_2 = \frac{m_0^2 \cdot v_{\varphi}^2(r_0) \cdot r_0^2}{\varepsilon^2} + 4 \frac{a}{\varepsilon} m_0 v_{\varphi}(r_0) \cdot r_0 \cdot c_1 + 4a^2 \left(\frac{4}{9} b^6 + c_1^2 \right),$$

$$c_3 = \frac{4}{3} a \left(\frac{m_0 v_{\varphi}(r_0) \cdot r_0}{\varepsilon} + 2ac_1 \right),$$

$$c_4 = -4ab^2 \left(\frac{m_0 v_{\varphi}(r_0) \cdot r_0}{\varepsilon} + 2ac_1 \right).$$

После интегрирования окончательно получим:

$$\begin{aligned} X(r) = (r^2 + \psi)^{-2} & \left\{ -c_2 r^{-2} + c_3 \left[3(r^2 + b^2)^{1/2} - \frac{(r^2 + b^2)^{3/2}}{r^2} - \right. \right. \\ & \left. - 3b \ln \left| \frac{b + (r^2 + b^2)^{1/2}}{r} \right| \right] + c_4 \left[-\frac{(r^2 + b^2)^{1/2}}{r^2} - \right. \\ & \left. - \frac{1}{b} \ln \left| \frac{b + (r^2 + b^2)^{1/2}}{r} \right| \right] + \frac{2}{9} a^2 r^4 + \frac{3 \cdot q \cdot L}{8\pi \cdot c \cdot a \cdot \rho_d} \left(\frac{r^3}{3} + 2\psi r - \frac{\psi^2}{r} \right) - \\ & \left. - a^4 \left[\frac{r^4}{2} + (2\psi - b^2) r^2 + (b^2 - \psi)^2 \ln(r^2 + b^2) \right] + P + (r_0^2 + \psi)^2 X(r_0) \right\} \quad (20) \end{aligned}$$

Через P обозначена постоянная, зависящая от параметров задачи:

$$P = c_2 r_0^{-2} + c_3 \left[\frac{(r_0^2 + b^2)^{3/2}}{r_0^2} - 3(r_0^2 + b^2)^{1/2} \right] + \frac{c_4 (r_0^2 + b^2)^{1/2}}{r_0^2} + \\ + \left(3c_5 b + \frac{c_4}{b} \right) \ln \left| \frac{b + (r_0^2 + b^2)^{1/2}}{r_0} \right| - \frac{2}{9} \alpha^2 r_0^4 + \\ + \frac{3 \cdot q L}{8\pi \cdot c \alpha \cdot \rho_d} \left(-\frac{r_0^3}{3} - 2\psi r_0 + \frac{\psi^2}{r_0} \right) + \\ + \alpha^2 \left[\frac{r_0^4}{2} + (b^2 - \psi)^2 \ln |r_0^2 + b^2| + (2\psi - b^2) r_0^2 \right].$$

3. *Обсуждение результатов.* Полученное нами решение (20) дает возможность проследить за движением кольцевого образования в галактике. Для этого необходимо знать кривую вращения галактики и распределение плотности межзвездного вещества по ее диску, а также задать соответствующие начальные условия.

Остановимся более подробно на примере NGC 4736. Допустим, что в этой галактике происходят, время от времени, вспышки ядерной активности. Пусть светимость ядра, в момент его активной фазы, составляет примерно $L \approx 10^{45}$ эрг/с, что сравнимо со светимостью ядер сейфертовских галактик [23]. При повышении светимости ядра в центральной области галактики ($r < r_c$) создаются, согласно [24], такие условия, при которых возникающая тангенциальная составляющая светового давления на движущееся вещество может привести к увеличению скорости вращения кольцевого образования. Если принять начальную массу кольца $m_0 \approx 5 \cdot 10^5 M_\odot$, то его скорость v_r на расстоянии $r_0 \approx 200$ пк, благодаря усилению „затравочного“ вращения, согласно формуле $m \cdot v_\phi^2 \approx A \frac{r}{c} q_n \cdot L$ из [12], может повыситься до $(1 \div 5) \cdot 10^7$ см/с. Тогда, определяя параметры $\alpha = 1.9 \cdot 10^7$ см/с и $b \approx 150$ пк из кривой вращения галактики [25], задавая распределение плотности межзвездной среды $\rho_s = 5 \cdot 10^{-24} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-1/2}$ г/см³ и изменение поперечного сечения кольца $\beta = 35 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{1/2}$ пк при условии, что $v_r(r_0) \approx (5 \div 10) \cdot 10^7$ см/с, $q \approx 10^{-2}$, $\gamma \approx 0.75$, $\alpha \approx 5 \cdot 10^{-5}$ см, $\rho_d \approx 2.5$ г/см³, можно получить, (18а) и (20), изменение скоростей вращения и расширения кольца в зависимости от r .

Из рис. 2 видно, что скорость вращения кольца на расстоянии $r > 400$ пк меньше, чем скорость окружающей среды. Это обстоятельство

приведет к тому, что после слияния кольца с межзвездной средой (на расстоянии, где скорость расширения становится малой — см. рис. 3) после усреднения углового момента на кривой вращения галактики должен воз-

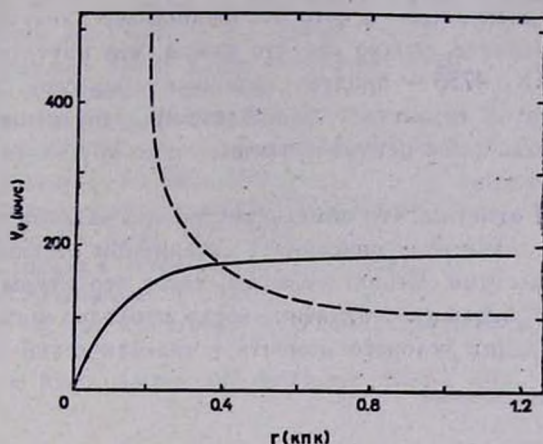


Рис. 2. Пунктирная линия показывает зависимость скорости вращения расширяющегося кольца от r , сплошная — кривая вращения галактики.

никнуть небольшой минимум. Действительно, согласно наблюдениям NGC 4736 [26], в области нахождения внутреннего кольца (1 ± 0.15) кпк имеется уменьшение скорости вращения.

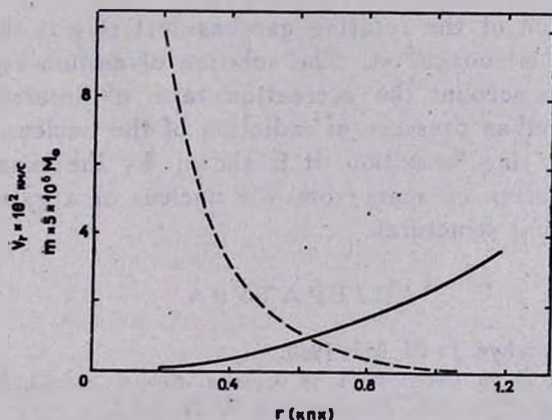


Рис. 3. Пунктирная линия показывает изменение скорости расширения кольца, сплошная — зависимость его массы от r .

Следует подчеркнуть, что в процессе расширения кольцевое образование, благодаря набеганию окружающей среды, может увеличить свою массу до такой величины, когда будут существенны эффекты самогравита-

ции. Тогда кольцо может стать неустойчивым по отношению к распаду на отдельные сгустки, что в свою очередь будет сопутствовать звездообразованию, которое приведет к появлению в кольце молодых горячих звезд. Ионизуя вокруг себя нейтральный водород, образовавшиеся звезды создадут H II области, расположение которых напоминает клочковатое кольцо.

Учитывая сказанное, можно сделать вывод, что внутреннее кольцевое образование в NGC 4736 — продукт активных процессов, проходящих в ядерной области этой галактики. По-видимому, внутренние кольцевые структуры, наблюдаемые в центральных областях других галактик, имеют подобное происхождение.

В заключение отметим, что объяснение происхождения внешних кольцевых структур в галактиках описанным механизмом сталкивается с энергетическими трудностями. Вероятнее всего, такие структуры образовались на ранних стадиях эволюции галактик, когда проходил интенсивный процесс перераспределения углового момента в галактической среде.

Ленинградский государственный
университет
Шемахинская астрофизическая
обсерватория

THE EXPANSION OF THE RING STRUCTURE IN GALAXIES

V. A. ANTONOV, O. A. GELESNYAK

The expansion of the rotating gaseous-dust ring in the gravitation field of a galaxy is considered. The solution of motion equation is obtained taking into account the accretion rate of interstellar medium by the ring as well as pressure of radiation of the nucleus of galaxy on dust found in the ring formation. It is shown by the example of NGC 4736 that the ejection of mass from the nucleus of a galaxy may give rise to internal ring structures.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Randers, *Astrophys. J.*, 92, 255, 1940.
2. Ю. Н. Мишуров, В. М. Пегуев, А. А. Сучков, *Астрон. ж.*, 53, 269, 1976.
3. В. Г. Горбачук, В. М. Сербин, *Астрофизика*, 19, 79, 1983.
4. B. Lindblad, *Stockholms Observ. Ann.*, 19, No. 9, 1957.
5. E. Athanassoula, A. Bosma, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, 23, 147, 1985.
6. И. Г. Колесник, С. А. Силич, П. И. Фомин, *Письма в Астрон. ж.*, 5, 567, 1979.
7. А. М. Фридман, *Письма в Астрон. ж.*, 4, 243, 1978.
8. М. В. Неалин, *Успехи физ. наук*, 150, 36, 1986.
9. R. Lynds, A. Toomre, *Astrophys. J.*, 209, 382, 1976.

10. *J. Theys, E. Shpiegel*, *Astrophys. J.*, 212, 616, 1977.
11. *J. Few, B. F. Madore, H. C. Arp*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 199, 633, 1982.
12. *В. А. Досталь, В. Г. Метлов*, *Астрон. ж.*, 56, 3, 1979.
13. *P. C. van der Kruit*, *Astrophys. J.*, 188, 3, 1974.
14. *V. C. Rubin, W. K. Ford, C. J. Peterson*, *Astrophys. J.*, 199, 39, 1975.
15. Центр галактики, ред. Г. Риглер, Р. Бленфорд, Мир, М., 1984.
16. *В. А. Амбарцумян*, *Solvay Conference Report*, 1958.
17. *V. C. Rubin*, *Astrophys. J.*, 238, 808, 1980.
18. *J. Kormendy*, *Astrophys. J.*, 227, 794, 1979.
19. *В. П. Гринин, С. Н. Фабрика*, *Астрон. ж.*, 57, 480, 1980.
20. *A. Bosma*, *Astron. J.*, 86, 1825, 1981.
21. *А. В. Засов*, *Итоги науки и техн. ВИНТИ, Астрон.*, 18, М., 1981.
22. *А. В. Засов*, *Астрон. ж.*, 51, 1225, 1974.
23. *Э. А. Дибай*, *Письма в Астрон. ж.*, 3, № 1, 3, 1977.
24. *В. П. Гринин*, *Астрофизика*, 17, 109, 1981.
25. *A. Bosma, J. M. van der Hulst, W. T. Sullivan*, *Astron. and Astrophys.*, 57, 373, 1978.
26. *P. C. van der Kruit*, *Astron. and Astrophys.*, 52, 85, 1976.