

УДК: 524.7 - 327

О ПРИРОДЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ
ВРАЩАЮЩИХСЯ ГАЛАКТИК

А.М.КРИГЕЛЬ

Поступила 18 марта 1991

Принята к печати 13 апреля 1991

Решение задачи твердотельного вращения турбулентного газа в центральной части галактики показывает, что, в отличие от области дифференциального вращения, здесь нет стационарной дисковой аккреции. Вещество, поступающее в центр галактики, будет перемещаться порциями, обусловленными возбуждением гиротурбулентных колебаний на границе областей твердотельного и дифференциального вращения. Получена оценка периода таких колебаний, $23,7 / \omega$, где ω — угловая скорость вращения газа в центральной области. Дисковой структуре, наблюдаемой в центре Галактики с размером в 800 пк, будут соответствовать колебания с периодом порядка 68 млн. лет, возможно ответственные за наблюдаемую рекуррентную активизацию ядра.

1. Введение. К настоящему времени собраны многочисленные косвенные свидетельства того, что спиральные галактики, и в частности наша Галактика, периодически оказываются в возбужденном состоянии с активизацией их ядер [1-6]. На бывшие в прошлом периоды активности галактик, спокойных в настоящее время, указывает радиальное движение газа, выброшенного из ядра; данные о металличности звезд, говорящие в пользу того, что процессы звездообразования носят не стационарный, а периодический характер [7-10]; нерегулярный характер струевидных выбросов. Нельзя исключить и того, что спиральные волны плотности порождены периодическими процессами в ядрах галактик. В частности, наблюдаемые в центре нашей Галактики быстро расширяющиеся кольцевые структуры (Зкпк и 2.4 кпк рукава, комплекс молекулярных облаков в радиусе 300 пк от центра) указывают на то, что в сравнительно недавнем прошлом ядро Галактики возможно было активно. Весьма неравномерное распределение вещества, наблюдаемое в радиусе 2 пк от центра, по-видимому, возникло вследствие мощного взрыва, имевшего место примерно 10^5 лет назад [6].

Общей особенностью кривых вращения спиральных галактик различных типов является наличие в них центральной области, вращающейся примерно как твердое тело [11,12]. Вне этой области наблюдаются различные законы

вращения, но при этом линейная скорость если и меняется с расстоянием от центра, то в значительной меньшей степени, нежели в центре, и поэтому в грубом приближении ее можно считать константой. Известно также, что законы вращения звездного и газового компонентов галактик примерно совпадают.

Анализ условий поддержания стационарного вращения вязкого горячего газа в диске галактики вне центральной области [13,14] показывает, что такое вращение возможно только в том случае, если вынос углового момента из галактики, обусловленный действием сил трения, будет скомпенсирован турбулентным потоком вещества на центр (аккрецией). При этом турбулентная сила Кориолиса, связанная с этим потоком, компенсирует потерю углового момента и механической энергии, порожденную трением [15,16].

Таким образом, если допустить, что галактика вращается стационарно, то в ее газовый диск должно постоянно вовлекаться вещество из окружающего пространства. Это вещество, увлекаемое гравитацией, направляется к центру. Суммарный аккреционный поток состоит из упорядоченной и турбулентной частей и решающим образом зависит от интенсивности турбулентности. Но постоянное вовлечение вещества в галактический диск, необходимое для компенсации трения, неизбежно нарушает стационарность его вращения. Действительно, если масса диска монотонно нарастает, то соответственно должна нарастать и скорость его вращения. Возможен и другой вариант - периодические взрывы ядра, при которых вещество возвращается в пространство, окружающее галактический диск. Так или иначе, но из-за диссипативных процессов галактика в принципе не может вращаться стационарно. Факты повторяющихся активизаций ядер указывают на то, что в природе, по-видимому, реализуется эволюция второго типа.

Активизацию ядра галактики можно рассматривать как типичный пример коллективного эффекта, природу которого следует исследовать методами гидродинамики турбулентной жидкости. Поскольку установление вращения газа при наличии турбулентного трения возможно только при наличии компенсирующего потока вещества на центр, то напрашивается вывод, что нарушение устойчивости стационарного режима связано скорее всего с неустойчивостью турбулентного трения.

Известно, что вращение жидкости или газа при наличии турбулентного переноса вещества в плоскости вращения может быть неустойчивым. В частности, возможно возникновение колебаний особого рода, называемых "гиротурбулентными" [17,18]. Специфика этих колебаний состоит в том, что в них кинематическая энергия периодически перераспределяется между упорядоченным и турбулентным движениями. При этом периодически меняется энергия турбулентности и, следовательно, коэффициент турбулентной диффузии. В фазе преобладания упорядоченности движения турбулентность понижена, аккреция вещества на галактический диск из ее короны задерживается, в "турбулентной" фазе накопленное вещество пропускается к центру, где и высвобождается основная часть его гравитационной энергии. Таким образом, механизм гиротурбулентной неустойчивости в принципе может быть ответст-

венным за периодическую активизацию ядер вращающихся галактик.

Явление гиротурбулентной неустойчивости наблюдается как в метеорологии (колебания планетарного вихря типа "цикла индекса"), так и в лабораторных экспериментах с вращающимися сосудами, в которых создается неравновесный тепловой режим, поддерживающий турбулентный перенос вещества в плоскости вращения. Гиротурбулентные осцилляции - это разновидность инерционных колебаний, обязанных своим происхождением действию турбулентной силы Кориолиса (части силы Кориолиса, связанной с турбулентным потоком вещества). Механизм гиротурбулентной неустойчивости весьма общий - он может в частности реализовываться и в дисках спиральных галактик.

Чтобы дать оценку возможного периода гиротурбулентных колебаний в галактике, необходимо предварительно, в рамках гидродинамической модели, определить режим стационарного вращения газового компонента. С этой целью в [14] были рассмотрены условия вращения горячего газа вне центральной области. Цель данной работы - найти условия поддержания турбулентности в области твердотельного вращения и дать оценку периодов гиротурбулентных колебаний в ядре Галактики.

2. *Стационарное решение задачи твердотельного вращения турбулентного газа в галактике.* Применение полуэмпирической теории турбулентности к вращающемуся газу в поле силы тяжести галактики приводит к системе уравнений осредненного движения, подробно рассмотренной в [14]. Она включает в себя уравнение неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} [R (u v_r + S_r)] = 0, \quad (1)$$

два уравнения движения

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (u v_r + S_r) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} [R (u v_r^2 + 2 S_r v_r + \tau_{rr})] - \\ - \frac{1}{R} (u v_\varphi^2 + 2 S_\varphi v_\varphi + \tau_{\varphi\varphi}) + \frac{\partial}{\partial R} (p H) - u g_r = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (u v_\varphi + S_\varphi) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} [R^2 (u v_r v_\varphi + S_r v_\varphi + S_\varphi v_r + \tau_{r\varphi})] = 0, \quad (3)$$

уравнение баланса энергии турбулентности

$$\frac{\partial}{\partial t} (u b^2) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (R u v_r b^2 - \alpha_b u l b R \frac{\partial b^2}{\partial R}) + \tau_{rr} \frac{\partial v_r}{\partial R} + \tau_{r\varphi} R \frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{v_\varphi}{R} \right) +$$

$$+ \tau_{\varphi\varphi} \frac{v_r}{R} + S_r \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial R} - \frac{v_\varphi^2}{R} - g_r \right) + S_\varphi \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial R} + \frac{v_r v_\varphi}{R} \right) - \\ - \frac{c u b^3}{l} = 0, \quad (4)$$

уравнение состояния идеального газа

$$p = \rho R_* T. \quad (5)$$

Здесь рассматривается уравнение для величин, осредненных по времени, толщине галактического диска и азимутальному углу, где ρ - объемная плотность, u - поверхностная плотность, v_r, v_φ - компоненты средней скорости упорядоченного движения, p - давление, H - толщина диска, $\tau_{rr}, \tau_{r\varphi}, \tau_{\varphi\varphi}$ - компоненты тензора турбулентных напряжений, b - скорость турбулентных флуктуаций, l - масштаб турбулентности, $S_i = \overline{u' v'}$ - вектор турбулентного потока вещества, при этом черта сверху - знак осреднения, штрих - отклонения от среднего, R_* - газовая постоянная, T - температура, α_b, c - универсальные гидродинамические константы. Замыкание системы уравнений производится с помощью соотношений

$$\tau_{rr} = c_r u b^2, \quad (6)$$

$$\tau_{\varphi\varphi} = c_\varphi u b^2, \quad (7)$$

$$\tau_{r\varphi} = -u l b R \frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{v_\varphi}{R} \right), \quad (8)$$

$$S_r = \alpha_d l b \left[\frac{u \left(g_r + \frac{v_\varphi^2}{R} - v_r \frac{\partial v_r}{\partial R} \right)}{R_* T + \frac{2}{3} b^2} - \frac{\partial u}{\partial R} \right], \quad (9)$$

$$S_\varphi = 0, \quad (10)$$

$$l = \eta R \frac{v_s}{|v_\varphi|}, \quad (11)$$

где $c_r, c_\varphi, \alpha_d, \eta$ - константы, Γ - показатель адиабаты, $v_s = (\Gamma R_* T)^{1/2}$ - адиабатическая скорость звука.

Известно, что газ в центре галактики вращается примерно как твердое тело, то есть

$$v_\varphi = \omega R, \quad (12)$$

где $\omega = \text{const}$ - угловая скорость вращения газа в центральной области галактики. Рассмотрим стационарное решение модельной системы уравнений (1) - (11), поставленной в [14], имеющей вид (12). Очевидно, что закону вращения (12) будет отвечать распределение поверхностной плотности диска вида

$$u = D R, \quad (13)$$

где $D = \text{const}$. Действительно, считая, что газ составляет долю, равную $\kappa = \text{const}$ от массы Галактики $M(R)$, получим, что ускорение тяжести есть

$$g_r = -\frac{GM}{R^2} = -\frac{2\pi G}{\kappa R^2} \int_0^R u r dr = -\frac{2\pi G D R}{3\kappa} \approx \frac{v_\varphi^2}{R}, \quad (14)$$

где G - гравитационная постоянная. Поэтому распределение плотности (13) может обеспечить равновесие между силами тяжести и инерции, порожденной законом вращения (12). Конечно, фактическое распределение вещества в галактиках может иметь более сложный характер. Мы будем здесь опираться на простейшую модель (12) - (14), позволяющую получить предварительную оценку на базе линеаризированной модели.

Аналогично [13, 14] легко показать, что стационарное решение задачи вращения газа в поле силы тяжести (14) имеет вид

$$v_s = \sqrt{\Gamma \beta} v_\varphi, \quad v_r = \delta v_\varphi, \quad b = \gamma v_\varphi, \quad S_r = \lambda u v_\varphi, \quad (15)$$

где $\beta, \delta, \gamma, \lambda$ - безразмерные константы, определяющие режим вращения газа. Подстановка (15) в систему дифференциальных уравнений стационарной задачи (1) - (11) приводит к алгебраической системе уравнений

$$\delta + \lambda = 0, \quad (16)$$

$$\varphi = \frac{2\pi G D}{3\kappa\omega^2} = 1 - 4\delta^2 - 8\lambda\delta - \gamma^2(C_\varphi + 4C_r) - 3\beta^2, \quad (17)$$

$$\frac{c\gamma^2}{\theta} - \lambda\beta(3\delta^2 + 8\lambda\delta + C_\varphi\gamma^2 + 4C_r\gamma^2 + 3\beta^2) + \\ + \gamma^2\beta[\delta(5 + C_r + C_\varphi) - 10\alpha_b\theta\beta\gamma] = 0, \quad (18)$$

$$\lambda[\beta^2 + (\Gamma - 1)\gamma^2] - \alpha_d\theta\beta\gamma[(8\lambda\delta + C_\varphi\gamma^2 + \\ + 3\beta^2 + 3\delta^2 + 4C_r\gamma^2)/\Gamma - \beta^2 - (\Gamma - 1)\gamma^2] = 0. \quad (19)$$

Здесь $\theta = \eta \Gamma^{1/2}$. Система алгебраических уравнений (16) - (19) определяет четыре константы $\delta, \gamma, \lambda, \varphi$ как функции β . Эта система уравнений решена численно при значениях констант, принятых в [14]:

$$\alpha_b = \alpha_d = C_r = C_\varphi = 1; \Gamma = 5/3, c = 0.4; \eta = 0.24.$$

3. Анализ стационарного решения. Легко видеть, что система уравнений (16)-(19) имеет тривиальное решение $\beta = \gamma = \delta = \lambda = 0$; $\varphi = 1$, чему соответствует нетурбулентное твердотельное вращение холодного газа. Решение задачи стационарного твердотельного вращения газового диска для $\beta \neq 0$ оказалось физически допустимым (вещественные значения $\delta, \gamma, \lambda, \varphi, \omega$) в интервалах $0.31 \leq \beta \leq 0.36$ и $0.70 \leq \beta \leq 1.59$.

При твердотельном вращении нет обычного источника турбулентности, связанного со сдвигом скорости. Что же является источником турбулентности газа в центральной области галактики? Полученное решение показало, что источником турбулентности здесь является работа, производимая турбулентным потоком вещества в поле центробежной силы. Заметим, что поскольку согласно (16) суммарный (упорядоченный и турбулентный) поток вещества на центр отсутствует, то нет и высвобождения гравитационной энергии. Поддержание энергии упорядоченного движения и кинетической энергии в целом происходит только за счет ее втекания из области дифференциального вращения.

Для ответа на вопрос - какому значению параметра β будет соответствовать стационарное решение, реализуемое в природе, целесообразно привлечь к рассмотрению дополнительное условие - принцип минимального производства энтропии [19]. Выражение для скорости производства энтропии в турбулентном идеальном газе с постоянной теплоемкостью в области твердотельного вращения приобретает вид

$$\sigma = J_r \frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{1}{T} \right) + \frac{S_r}{T} \left[g_r - \frac{(2 - \Gamma) v_s^2}{u \Gamma T} \frac{\partial u}{\partial R} \right], \quad (20)$$

где

$$T = T_0 \left(1 + \frac{u' T_0'}{u T_0} + \frac{b^2}{C_v T_0} \right) \quad (21)$$

- "обобщенная" температура турбулентного газа, а T_0 - его обычная "локальная" температура, не включающая в себя кинематическую энергию турбулентных движений,

$$J_r = h_r + C_v (\bar{u} \overline{v_r' T_0'} + \overline{u' v_r' T_0'}) + Q_r + C_v S_r (T_0 - T) \quad (22)$$

- "эффективный" поток тепла, включающий в себя молекулярный поток тепла h_r и турбулентный поток энергии турбулентности Q_r . Здесь C_v - удельная теплоемкость при постоянном объеме. Пренебрегая в (22) молекулярным потоком тепла по сравнению с турбулентным и учитывая, что в рассматриваемой модели

$$Q_r = -\alpha_b u l b R \frac{\partial b^2}{\partial R}, \quad (23)$$

после подстановки (15) и (23) в (20), получаем

$$\begin{aligned} \sigma = \frac{\lambda u v_\varphi^3}{RT} \{ & [\Gamma(\Gamma-1)(\gamma^2 - \beta^2) + 2\alpha_b \eta \beta \gamma^3] + \\ & + (2 - \Gamma)\beta^2 + 1 - \delta^2 - \varphi \} = \alpha \frac{u v_\varphi R_*}{R}. \end{aligned} \quad (24)$$

Здесь мы должны заметить, что некоторое количество энтропии производится и в процессах переноса тепла и массы в направлении, перпендикулярном к плоскости газового диска. Однако, если система близка к состоянию гидростатического равновесия, то эта часть производства энтропии будет близка к нулю.

Общий принцип эволюции Гленсдорфа-Пригожина [19] требует, чтобы в стационарном неравновесном процессе производство энтропии было бы минимальным. Решение поставленной задачи представлено на рис.1. Здесь показаны зависимости $\alpha(\beta)$, $\gamma(\beta)$, $\delta(\beta)$. Оказалось, что имеется два наименьших

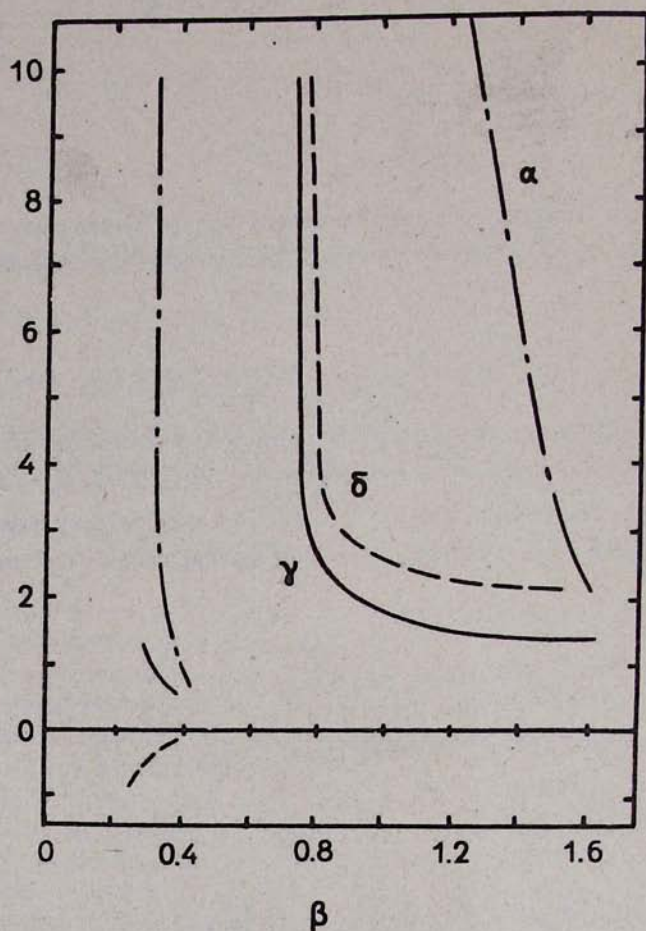


Рис.1 Характеристики стационарного твердотельного вращения турбулентного газового околоядерного диска в зависимости от β . Обозначения даны в тексте (см. формулы (15) и (24)).

значения производства энтропии, определяемого безразмерным параметром α : при $\beta \rightarrow 0.36$ и при $\beta \rightarrow 1.59$. Заметим, что в области $0.70 \leq \beta \leq 1.59$ турбулентные движения сверхзвуковые, что едва ли реализуется в природе. Наименьший из двух установленных минимумов производства энтропии достигается при

$$\beta = 0.36; \quad \lambda = -\delta = 0.10; \quad \gamma = 0.54. \quad (25)$$

(Мы рассматриваем наименьшее значение параметра α (β), совпадающее с границей области существования физически допустимого решения. Минимум производства энтропии находится вне области допустимых физических решений). Значения констант (25), по нашему мнению, возможно определяет режим твердотельного вращения турбулентного горячего газа в центре галактики.

4. *Оценка периода гиротурбулентных автоколебаний.* Стационарное решение задачи дисковой аккреции газа в области дифференциального вращения галактики [13, 14] характеризуется заметным потоком вещества на центр

$$u v_r + S_r = u v_\varphi (\delta + \lambda) < 0.$$

Однако, в соответствии с (15), в области твердотельного вращения стационарной аккреции нет. Следовательно, на границе области твердотельного вращения вещество должно накапливаться. По этой причине мы можем утверждать, что "стационарное" решение задачи в сущности не является стационарным. В [17, 21] показано, что вращение турбулентного газа в неравновесных условиях при $S_r \neq 0$ может сопровождаться так называемыми "гиротурбулентными" колебаниями, в которых происходит периодическое перераспределение энергии между упорядоченной и турбулентной формами движения. Колебания такого рода обусловлены обратной связью, содержащейся в уравнениях (3) и (4). Рассмотрение теории гиротурбулентных колебаний в линейном приближении [17, 18] приводит к оценке их периода

$$\chi = \frac{\sqrt{2} \pi u b}{\omega S_r}. \quad (26)$$

Подстановка (15) и (25) в (26) дает окончательно

$$\chi = 23.7/\omega. \quad (27)$$

Повторяя рассуждения [18], легко показать, что возникновение гиротурбулентных колебаний в области твердотельного вращения возможно при выполнении условия

$$4 \omega^2 R S_r l - 3 c u b^3 \geq 0. \quad (28)$$

После подстановки (15) в (28) оно приобретает вид

$$2 \lambda \theta \beta - 3 c \gamma^3 \geq 0. \quad (29)$$

Расчет показывает, что условие (29) при выборе решения (25) выполняется, причем левая часть этого неравенства при $\beta = 0.36$ достигает максимума. Заметим, что чем больше левая часть (28), (29), тем больше рост амплитуды колебаний. Максимуму, достигаемому при $\beta = 0.36$ будет соответствовать наиболее быстрорастущая мода возмущений, которая и реализуется в природе. Это обстоятельство является дополнительным основанием для выбора констант (25). Выполнение неравенства (29) указывает на то, что в рассматриваемом объекте при выбранных значениях констант, определяющих режим стационарного вращения турбулентного газа, есть необходимые предпосылки для развития гиротурбулентных автоколебаний. В процессе таких колебаний значительную амплитуду имеет радиальный поток вещества. В области, где генерируются колебания, вещество пропускается порциями, с чем, на наш взгляд, и может быть связан эффект периодической активизации ядер вращающихся галактик.

На данном этапе исследования мы ограничимся лишь упрощенной постановкой задачи с оценкой периода колебаний на основе линеаризированной системы уравнений. Для ответа на вопрос о возможной амплитуде гиротурбулентных колебаний в дисках галактик следует получить решение нелинейной задачи. Такая задача решалась для условий квазикеплеровской турбулентной аккреции газа на массивный центр [21]. Оказалось, что исследуемый механизм неустойчивости весьма эффективно управляет потоком вещества на центр, что и определяет целесообразность изучения возможности аналогичных колебаний в галактиках.

Здесь рассмотрена однокомпонентная модель твердотельного вращения горячего ($T \approx 10^5 - 10^6$ К), сильно турбулизованного газа в центре галактики. Разумеется, эта, крайне упрощенная, модель не способна к описанию всего многообразия физических процессов, протекающих в галактиках. Холодный газ, молекулярные облака и звезды остались вне этой модели. Для этого есть некоторые основания. Как показано в [14], в дисковой аккреции вещества на центр участвует лишь горячий газ, который только и может вносить в околоядерную область с периферии вещество и энергию. Оказалось, что для холодного газа ($0 < \beta \leq 0.31$) физического решения поставленной задачи

не найдено. Следовательно его движение должно иметь эволюционный характер. Зависимость кинематики газа от его температуры неизбежно должна приводить к тому, что разные фазы многокомпонентной газовой среды будут двигаться с различными скоростями.

Дадим оценку возможного периода гиротурбулентных колебаний для нашей Галактики. В центре Галактики расположен "околоядерный" диск радиусом в 800 пк, в котором вращение газа примерно твердотельное, достигающее 280 км/с. Оценка угловой скорости вращения газа составляет $\omega \approx 1.1 \cdot 10^{-14} \text{ с}^{-1}$, чему, согласно (27), соответствуют колебания с периодом $\chi \approx 68 \text{ млн. лет}$.

Сравним полученное в работе значение периода колебаний с данными наблюдений. Период повторения активности галактик оценивался разными авторами и методами в довольно широком интервале от 10 до 1000 млн. лет. В.С.Птускин и Я.М.Хазан [10] на базе модели происхождения галактических космических лучей установили период повторяемости активности Галактики в 10-100 млн. лет. В.А.Марсаков и А.А.Сучков [7-9] указывают на свидетельства переменной активности Галактики с периодом около 60-70 млн. лет на раннем этапе ее эволюции. Любопытно, что и в спектре колебаний земного климата наблюдается период в 40-60 млн. лет [22], возможно связанный с переменной активностью ядра Галактики.

Следует отметить, что в Галактике наблюдается несколько дисковых структур, вложенных друг в друга. Оценки, сделанные здесь, можно распространить и на аккреционные диски, вложенные в околоядерный диск.

Важно обратить внимание на то, что периодические процессы, порожденные гиротурбулентной неустойчивостью в околоядерной области Галактики, по-видимому, нельзя рассматривать в отрыве от процессов звездообразования. Поскольку считается, что темп звездообразования примерно пропорционален плотности межзвездного газа, который будет меняться при прохождении волн плотности, генерируемых гиротурбулентными колебаниями, то исследуемая неустойчивость может стимулировать вспышки звездообразования. Эти процессы в свою очередь как-то влияют на условия, в которых поддерживаются гиротурбулентные колебания. Реалистическая модель должна учитывать оба этих нестационарных процесса, взаимодействующих друг с другом. Задача данной работы - показать, что динамические эффекты, порождаемые гиротурбулентной неустойчивостью дисковой аккреции газа в ядрах галактик, могут привести к рекуррентной активизации ядер.

В заключение автор выражает глубокую признательность В.Г.Горбачкову и А.Г.Крицуку за обсуждение работы и полезные замечания.

Ленинградский государственный университет

ON THE NATURE OF RECURRENT ACTIVITY OF THE NUCLEI OF ROTATING GALAXIES

A.M.KRIGEL

A theory of solid rotation of turbulent gaseous disk in the center of a galaxy is considered. It is shown that on the contrary to the region of differential rotation here steady disk accretion is impossible. A matter following to the center of galaxy should flow by portions produced by the gyroturbulent oscillations generated at the boundary between regions of solid and differential rotation. The period of such oscillations is estimated as $23.7/\omega$, where ω is the angular velocity of the central region. Thus nuclear disk in the center of the Galaxy, with a radius of 800 pc, must produce oscillations with the period near 68 million years and may be responsible for recurrent activity of the nucleus of the Galaxy.

ЛИТЕРАТУРА

1. G.R.Burbidge, E.M.Burbidge, A.R.Sandage, *Rev.Mod.Phys.*, 35, 947, 1963.
2. J.H.Cort, *Ann.Rev.Astron. and Astrophys.*, 15, 295, 1977.
3. J.H.Oort, *Phys.Ser.*, 17, 175, 1978.
4. S.Van den Bergh, *Vistas Astron.*, 22, 307, 1978.
5. В.А.Гаген-Торн, И.И.Шевченко, *Астрофизика*, 18, 245, 1982.
6. R.Gansel, C.H.Townes, *Ann.Rev.Astron. and Astrophys.*, 25, 377, 1987.
7. В.А.Марсаков, А.А.Сучков, *Письма в Астрон.ж.*, 2, 381, 1976.
8. В.А.Марсаков, А.А.Сучков, *Астрон.ж.*, 54, 1232, 1977.
9. В.А.Марсаков, А.А.Сучков, *Астрон.ж.*, 55, 472, 1978.
10. В.С.Птускин, Я.И.Хазан, *Астрон. ж.*, 58, 959, 1981.
11. А.А.Засов, Г.А.Кязумов, *Астрон.ж.*, 60, 656, 1983.
12. В.Г.Горбачкий, *Введение в физику галактик и скоплений галактик*, Наука, М., 1986, стр.254.
13. А.М.Кригель, *Астрон.ж.*, 60, 242, 1983.
14. А.М.Кригель, *Кинематика и физика небесных тел*, 6, 73, 1990.
15. А.М.Кригель, *Письма в Ж. техн.физ.*, 7, 1300, 1981.
16. А.М.Krigel, *Geophys. Astrophys.Fluid Dyn.*, 24, 213, 1983.
17. А.М.Krigel, *Geophys.Astrophys.Fluid Dyn.*, 16, 1, 1980.
18. А.М.Кригель, *Ж. техн.физ.*, 55, 442, 1985.
19. P.Glansdorff, I.Prigogin, *Phys.Lett.*, 7, 243, 1963.
20. А.М.Krigel, *Tellus*, (in press), 1991.
21. А.М.Кригель, *Астрон.ж.*, 26, 1174, 1990.
22. J.M.Mitchell, *Quart. Res.*, 6, 481, 1976.