

**Влияние радиальных градиентов поверхностной плотности
на формирование крупномасштабных структур в газовом диске галактики
со скачком скорости на кривой вращения.**

The influence of radial gradients of surface density
on the formation of large-scale structures in the gaseous disk of a galaxy
with a velocity jump on the rotation curve.

Абстракт. Анализируются результаты проведенных численных исследований развития неустойчивых гидродинамических (ГД) мод в газовом диске плоской (спиральной) галактики, имеющей скачок скорости на кривой вращения (M31, M81, Галактика). Раскачка таких ГД мод в случае крупномасштабных азимутальных гармоник (в частности, как наиболее вероятной двухрукавной, $m=2$ гармоники) приводит к формированию либо регулярной спирально-вихревой структуры, либо - псевдо-кольцевой структуры.

Исследовано влияние сильной неоднородности равновесной поверхностной плотности на возбуждение неустойчивых ГД мод. В случае присутствия заметного уплотнения в центральной области газового диска инкременты неустойчивых мод могут заметно возрасть.

Характерные времена формирования глобальных регулярных структур оказываются порядка 1 GY.

1. Введение.

Многие массивные спиральные галактики в течение последних нескольких млрд. лет не испытывали мерджинга, либо существенного столкновения с соседями (Weinzirl et al 2009), при этом их "секулярная" (медленная и плавная) крупномасштабная эволюция в основном определялась коллективными процессами формирования в дисках этих галактик глобальных волновых структур – баров, спиралей и псевдо-колец (Kormendy & Kennicutt 2004, Засов & Сильченко 2010, van der Kruit & Freeman 2011).

Согласно наиболее общепринятой гравитационной концепции, возникновение таких структур связано с развитием одной из разновидностей коллективных гравитационных мод – бар-моды и спиральных мод в звездном галактическом диске (Сафронов 1960, Toomre 1981, Polyachenko 2004, Binney & Tremaine 2008).

В ряде массивных спиральных галактик во внутренней области диска наблюдается скачок скорости на кривой вращений (Sofue & Rubin 2001, Chemin et al. 2009). Этот факт дает основу для гидродинамической (ГД) концепции формирования спиральной структуры в газовых дисках галактик (Морозов 1977, Морозов и др. 1985б).

Для проявления ГД механизма формирования спиральной структуры требуется, чтобы в результате предыдущей эволюции, галактика обладала бы следующими свойствами: 1) в ней сформировался бы заметный скачок скорости вращения с относительной амплитудой $\sim (0.2 - 0.3)$, см. рис.1; 2) скорость спада скорости в области скачка была бы быстрее кеплеровской скорости спада, т.е. чтобы

$$\alpha_{\Omega \min} > \sim ((-1.75) - (-1.85)), \tag{1}$$

здесь $\alpha_{\Omega \min} = \min_r \{\alpha_{\Omega}(r)\}$, $\alpha_{\Omega}(r) = d \ln \Omega(r) / d \ln r$, $\Omega(r)$ – угловая скорость вращения газового диска;

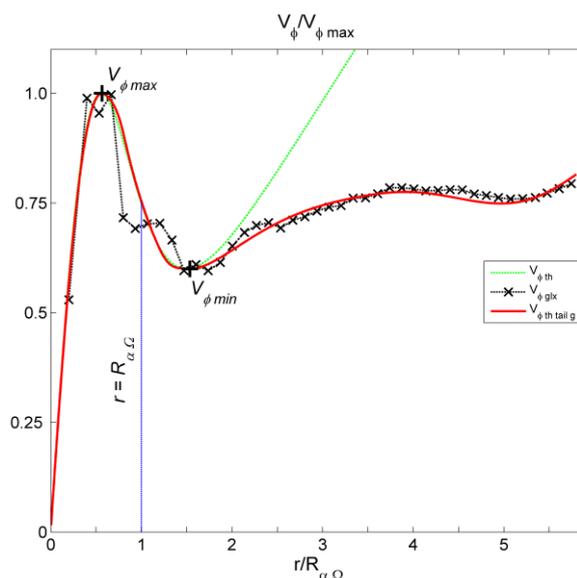
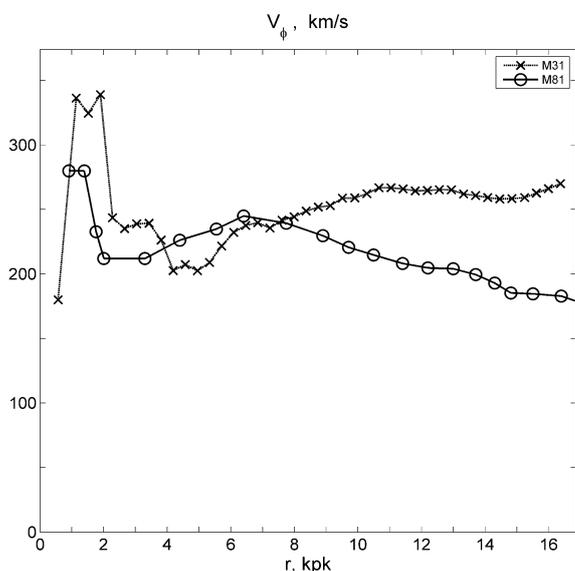
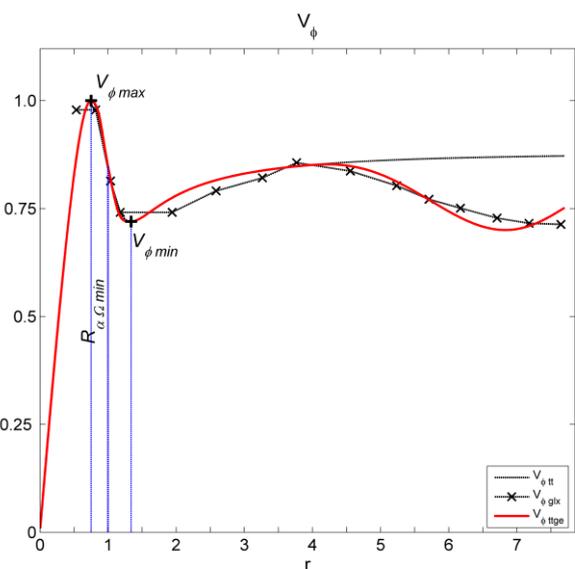


Рис. 1а. Наблюдаемые кривые вращения в галактиках М31 [Chemin et al. 2009] и М81 [Tenjes et al. 1998].

Рис. 1б. Нормированные кривые вращения для М31: наблюдаемая и последовательно использовавшиеся для аппроксимации модельные кривые вращения. Красная жирная кривая - расчетная.

Рис. 1в. Нормированные кривые вращения для М81. Красная жирная кривая - расчетная.



3) дисковые подсистемы галактики должны быть устойчивы (или находиться вблизи границы устойчивости) относительно гравитационных мод колебаний. Согласно численным экспериментам, при развитии неустойчивой бар-моды и/или спиральных мод происходит разогрев звездного диска, выход на насыщение амплитуд, и постепенное расплывание сформировавшихся структур (Bournaud et al. 2005, Sellwood 2011), это соответствует приближению звездного диска к границе гравитационной устойчивости. Анализ наблюдений в целом подтверждает такое предположение (Засов и др. 2011).

Кроме того, бар-мода, или спиральная волна плотности порождают радиальное перераспределение газа в диске, формируя псевдо-балдж - уплотнение в центральной области диска (Athanasoula 1992, Salo

1999). Это способствует образованию скачка скорости на равновесной кривой вращения во внутренней области диска.

2. Основные уравнения. Описание возмущений

в тонком несамогравитирующем газовом галактическом диске.

Проведя линеаризацию "традиционных" двумерных гидродинамических уравнений для тонкого несамогравитирующего газового диска по малым возмущениям \hat{f}_k , и представив эти возмущения в виде суперпозиции гармоник $\hat{f}_k(r, \varphi, t) \propto \tilde{f}_k^{(m, \omega)}(r) \cdot \exp[i(m\varphi - \omega t)]$, для комплексных амплитуд гармоник $\tilde{f}_k^{(m, \omega)}(r) \equiv \tilde{f}_k(r)$ получим систему линейных однородных уравнений. В частности, возмущённые энтропия $\tilde{\eta} = \tilde{p}/\sigma_0$ и радиальное лагранжево смещение $\tilde{\xi}$, будут описываться системой линейных однородных ОДУ (Torgashin & Omurkanov, 2013, далее ТО-13):

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{\eta}}{dr} &= \left[\frac{2m\Omega_0}{\hat{\omega}} - \frac{(\gamma-1)}{\gamma} \alpha_\sigma \right] \frac{\tilde{\eta}}{r} + \left[(\hat{\omega}^2 - \kappa^2) - \frac{(\gamma-1)}{\gamma^2} \frac{\alpha_\sigma^2}{M_*^2 r^2} \right] \tilde{\xi}; \\ \frac{d\tilde{\xi}}{dr} &= \left[\frac{m^2}{r^2 \hat{\omega}^2} - M_*^2 \right] \tilde{\eta} - \left[1 + \frac{2m\Omega}{\hat{\omega}} + \frac{\alpha_\sigma}{\gamma} \right] \frac{\tilde{\xi}}{r}; \end{aligned} \quad (2)$$

Остальные возмущения выражаются через $\tilde{\eta}$ и $\tilde{\xi}$ алгебраически:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_r &= -i\hat{\omega}\tilde{\xi}; & \tilde{V}_\varphi &= \frac{m}{\hat{\omega}} \frac{\tilde{\eta}}{r} - \frac{\kappa^2}{2\Omega} \tilde{\xi}; \\ \tilde{p} &= \sigma_0 \tilde{\eta} & \frac{\tilde{\sigma}}{\sigma_0} &= M_*^2 \cdot \tilde{\eta} - \frac{(\gamma-1)}{\gamma} \alpha_\sigma \frac{\tilde{\xi}}{r} \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь используем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}(r) &= \omega - m\Omega(r); & \Omega(r) &\equiv V_{\varphi 0}(r)/r; & \kappa^2(r) &\equiv 4\Omega^2(1 + \alpha_\Omega/2); \\ \tilde{\eta} &= \tilde{p}/\sigma_0; & M_* &= V_{\varphi \max}/C_{S0}; & \alpha_f &\equiv d \ln f(r)/d \ln r. \end{aligned}$$

В системе уравнений (2), (3) и далее используем нормировки: линейных масштабов – на $R_{\alpha\Omega \min}$ (радиус наиболее быстрого убывания кривой вращения в области скачка скорости), скоростей – на $V_{\varphi \max}$ (внутренний максимум скорости), частот – на $\Omega_* = V_{\varphi \max}/R_{\alpha\Omega \min}$. Поскольку температура газа в диске меняется очень плавно, пренебрегаем ее изменениями: $C_{S0}(r) \approx C_{S0}(r = R_{\alpha\Omega \min}) = const$. Решение задачи типа Штурма-Лиувилля по нахождению комплексных собственных частот $\omega = \omega_r + i\omega_i$ возмущений для системы (2) с заданными модельными $\Omega(r)$, $\sigma_0(r)$ и C_{S0} , и корректными граничными условиями, дает комплексные собственные частоты $\omega = \omega_r + i\omega_i$ возмущений и собственные функции $\tilde{\eta}(r)$ и $\tilde{\xi}(r)$, через них с помощью (3) находим все возмущенные поля.

3. Задание модельного газового галактического диска

Здесь используем базовый профиль модельной кривой вращения $V_{\varphi th tail}(r)$, где

$$\begin{aligned} V_{\varphi th tail}(r) &= r \cdot \Omega_{th tail}(r); & \Omega_{th tail}(r) &= \Omega_{th}(r) \cdot f_{tail}(r); \\ \Omega_{th}(r) &= \langle \Omega \rangle - \left(\frac{\Delta \Omega}{2} \right) \text{th} \left(\frac{r - R_{0th}}{L_{\Omega}} \right); & f_{tail}(r) &= \left[1 + \left(\frac{r}{R_{tail}} \right)^N \right]^{-1/N}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для аппроксимации наблюдаемого профиля скорости вращения в M31 (Torgashin & Omurkanov, 2018, далее ТО-18) использовались следующие параметры

$$\begin{aligned} R_{\alpha\Omega min} &= 2.85 \text{ kpc}; & V_{\varphi max} &= 340 \frac{\text{km}}{\text{s}}; & \delta V_{\varphi} &= 0.40; \\ \alpha_{\Omega min} &= -1.85; & q_{tail} &= 0.80; & N &= 4; \end{aligned} \quad (5a)$$

Для M81 (Торгашин, 2018, далее Т-18) :

$$\begin{aligned} R_{\alpha\Omega min} &= 1.7 \text{ kpc}; & V_{\varphi max} &= 286 \frac{\text{km}}{\text{s}}; & \delta V_{\varphi} &= 0.28; \\ \alpha_{\Omega min} &= -1.80; & q_{tail} &= 0.88; & N &= 2; \end{aligned} \quad (5b)$$

Здесь $\delta V_{\varphi} = (V_{\varphi max} - V_{\varphi min}) / V_{\varphi max}$ – относительная амплитуда скачка скорости, $R_{\alpha\Omega min}$ – радиус центра скачка скорости вращения, $q_{tail} = V_{\varphi \infty} / V_{\varphi max}$, $V_{\varphi \infty}$ – скорость на периферии диска. Решением обратной задачи, по параметрам (5) были определены параметры $\{\langle \Omega \rangle; (\Delta \Omega / 2); R_{0th}; L_{\Omega}; R_{tail}\}$ для профиля (4).

Затем найденный профиль $V_{\varphi th tail}(r)$ был гладким образом немного укрупнен в окрестности центра скачка скорости (без изменения параметров (5)), и слегка плавно деформирован в области $R_{tt max} \leq r \leq r_{outer}$. Итоговый "укрупненный" с "хвостом" профиль (здесь обозначим его $V_{\varphi ttg}(r)$) использовался в основных расчетах, см. Рис.1б, 1в.

В некоторых галактиках во внутренней области диска присутствует заметное уплотнение (Helfer et al., 2003). Поэтому было проведено исследование эффектов скачка $\sigma_0(r)$, заданного в виде:

$$\sigma_0(r) = \sigma_{02} \left[\frac{(Q_{\sigma} + 1)}{2} - \frac{(Q_{\sigma} - 1)}{2} \tanh \left(\frac{r - R_{\sigma}}{L_{\sigma}} \right) \right] \quad (6)$$

Здесь был рассмотрен вариант параметров $Q_{\sigma} = \sigma_{01} / \sigma_{02} = 20$, $L_{\sigma} = 0.1$, параметр R_{σ} положения центра скачка плотности (относительно центра скачка скорости) варьировался в пределах: $0.6 \leq R_{\sigma} \leq 1.4$. Для имитации процессов охлаждения газа в диске задаем $\gamma = 1.1$.

4. Неустойчивые ГД моды в неоднородном газовом галактическом диске, имеющем скачок скорости вращения.

На первом этапе был исследован случай газового диска, однородного по равновесной поверхностной плотности, $\sigma_0(r) = const$, $\alpha_\sigma(r) = 0$. В этом случае было обнаружено, что при переходе в модельном профиле $V_{\phi\text{tg}}(r)$ от $\alpha_{\Omega\text{min}} = -2.0$ до $\alpha_{\Omega\text{min}} = -1.8$, и фиксированных остальных параметрах в (5), неустойчивая CF-ветка возмущений при $M_* \%10$ стабилизируется примерно при значениях $\alpha_{\Omega\text{min}} \approx ((-1.9) - (-1.85))$, т.е. в однородном по поверхностной плотности диске с реалистичными значениями $\alpha_{\Omega\text{min}} \approx ((-1.85) - (-1.80))$ такая ветка неустойчивых мод, по-видимому, возбуждаться не может [TO-18, T18].

В присутствии скачка плотности (6) с указанными выше параметрами, и профиле $V_{\phi\text{tg}}(r)$ с $\alpha_{\Omega\text{min}} \approx ((-1.85) - (-1.80))$, и остальными параметрами из (5), была обнаружена "реанимация" неустойчивой CF- ветки при типичных для газового галактического диска значениях параметра $M_* \square (15 - 20)$, причем инкременты этой ветки иногда могут быть примерно в два раза выше, чем у A-корней, см. Рис. 2а, б, [TO-18]; Рис. 3 [T-18].

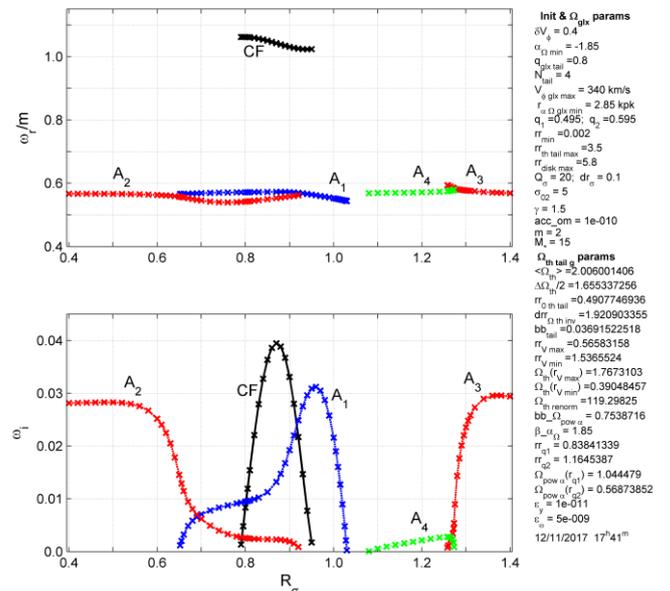
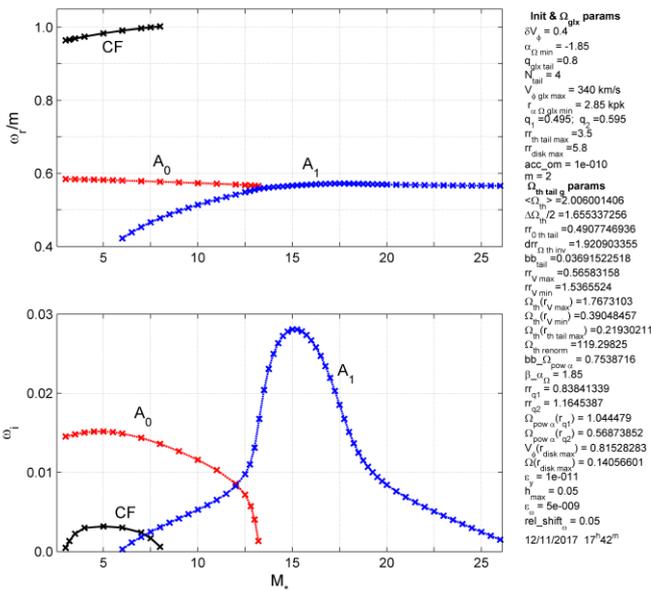


Рис. 2а. Рассчитанные собственные значения неустойчивых веток возмущений для гармонике $m = 2$ в зависимости от параметра M_* , однородный по поверхностной плотности модельный газовый диск (5а), аппроксимирующий М31, [TO-18].

Рис. 2б. - тот же диск, но с неоднородной плотностью (6), при $M_* = 15$, зависимость от R_σ , [TO-18].

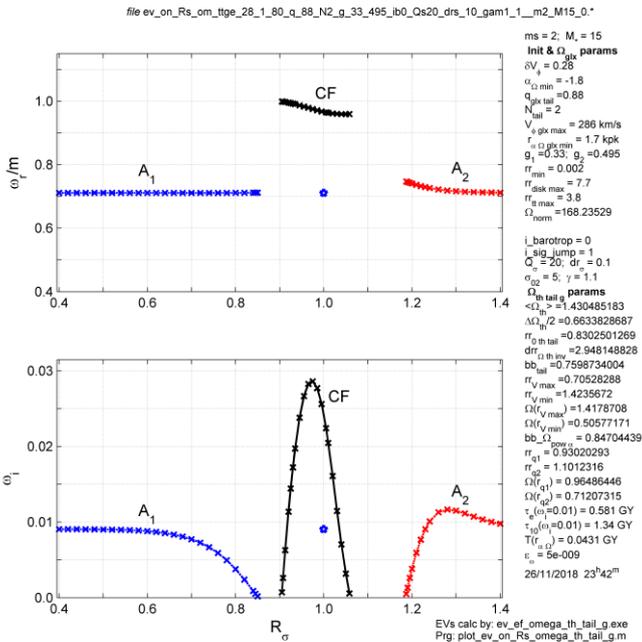


Рис. 3. Аналогично Рис. 2б, но для модельного неоднородного диска М81, (5б), при $M_* = 15$.

Отдельной звездочкой показан единственный НЧ-корень для однородного диска при данном M_* , [Т-18].

ВЧ, иначе - CF корни возбуждают регулярную отстающую спиральную волну плотности, см. Рис. 4а.

НЧ, или А-корни формируют (для гармоники

$m = 2$) два куска туго закрученных примерно четверть-оборотных спиралей, напоминающих псевдо-кольца в галактиках, см. Рис. 4б. Эти возмущения сильно локализованы по радиусу в окрестности коротационной окружности. Для всех неустойчивых веток возмущений коротация лежит внутри области скачка скорости, для CF-ветки - ближе к внутренней части скачка, для А-корней - ближе к наружной части.

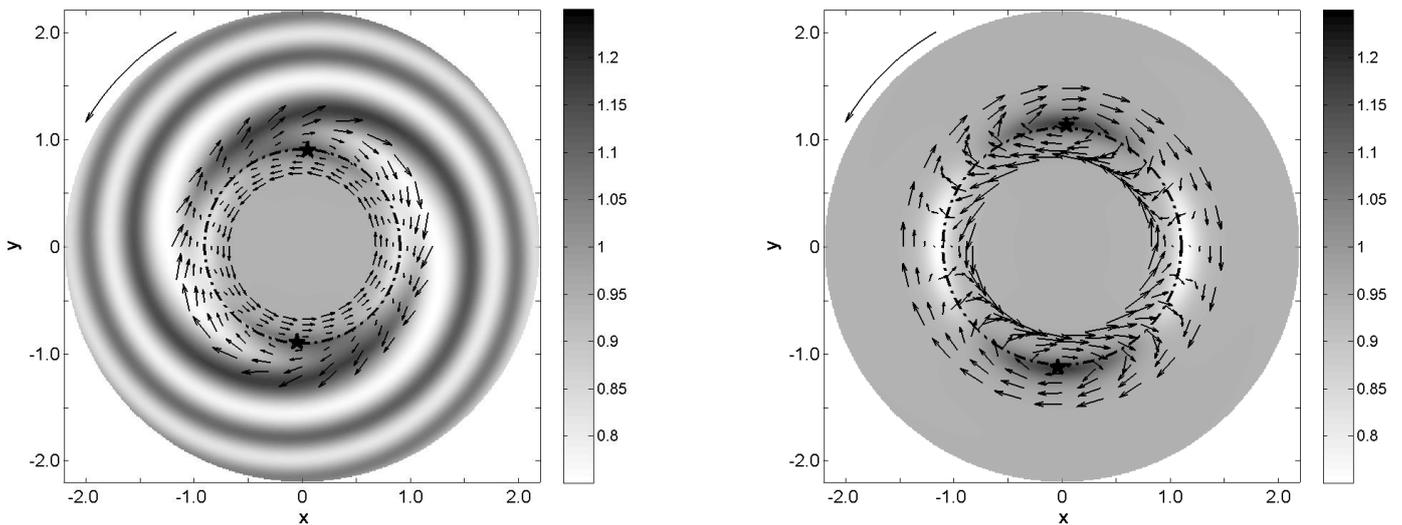


Рис. 4а. Рассчитанные возмущения поверхностной плотности для CF-ветки, нормированные на невозмущенную поверхностную плотность $\sigma_0(r)$, в неоднородном модельном диске М81.

Рис. 4б - то же для НЧ А-ветки.

Параметры модельного диска даны в подписях на рисунках 3 и в тексте. Жирный штрих-пунктир – коротационная окружность, стрелки - векторное поле скоростей волны в системе координат волны. Звездочками обозначены положения центров антициклонических вихрей, большая стрелка показывает направление вращения диска.

5. Заключение.

Исследованы крупномасштабные неустойчивые ГД моды возмущений в модельном газовом диске, аппроксимирующем реальный неоднородный газовый галактический диск, кривая вращения которого имеет скачок скорости во внутренней области диска. Показано, что присутствие достаточно резкого скачка плотности способно усиливать СФ-ветку возмущений, которая формирует отстающую спиральную волну плотности. "Низкочастотные" А-ветки возмущений порождают туго закрученные четверт-оборотные двух-рукавные спиралли, похожие на псевдо-кольца в некоторых спиральных галактиках. Оценки времени нарастания амплитуды возмущений на порядок величины дают значения примерно $\sim 10^9$ лет.

Литература.

1. Weinzirl T., Jogee S., Khochfar S., Burkert A., Kormendy J. Bulge n and B/T in high-mass galaxies: constraints on the origin of bulges in hierarchical models. – *Ap. J.*, 2009, v. 696, pp. 411-447.
2. Kormendy J., Kennicutt R.C., Jr. Secular evolution and the formation of pseudobulges in disk galaxies. – *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 2004, v. 42, pp. 603-683.
2. Zasov, A.V. & Sil'chenko, O.K. 2010, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* (in Russian), 180, 434–439.
4. van der Kruit P.C., Freeman K.C. Galaxy Disks. – *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 2011, v. 49, pp. 301-371.
5. Safronov, V.S. 1960, *AnAp*, 23, 979–982.
6. Toomre A. 1981, In: Fall S.M., Lynden-Bell D. (Eds.), *Proceedings of the Advanced Study Institute (3-15 August 1980, Cambridge, England)*, Cambridge University Press, Cambridge and New York , 111-136.
7. Polyachenko E.V. 2004, *MNRAS*, 348, p. 345.
8. Binney, J., Tremaine, S. 2008, *Galactic Dynamics, Second Edition*, Princeton University Press, Princeton.
9. Sofue Y., Rubin V., 2001, *ARA&A*, 2001, V. 39, pp. 137-174.
10. Chemin L., Carignan C., Foster T. *HI kinematics and dynamics of Messier M31*. // *Astrophys. Journal*, 2009, V. 705, pp. 1395-1415.
11. Морозов А.Г. Раскачка спиральных возмущений в дисках плоских галактик неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца. – *Письма в Астрон. журн.*, 1977, т.3, №5, с.195–198.

12. Морозов А.Г., Незлин М.В., Снежкин Е.Н., Торгашин Ю.М., Фридман А.М. Численное моделирование процесса генерации спиральной структуры в газовом галактическом диске и вращающемся слое мелкой воды. – Астрон. циркуляр, 1985, №1414, с. 4-7.
13. Tenjes P., Haud U., Einasto J. *Galactic models with massive coronae. V. The spiral Sab galaxy M81.* // *Astron. Astrophys.*, 1998, V. 335, pp. 449-462.
14. Bournaud, F., Combes, F., & Semelin, B. 2005, *MNRAS*, 364, L18–L22.
15. Sellwood, J.A. 2011, *MNRAS*, 410, 1637-1646.
16. Засов А.В., Хоперсков А.В., Сабурова А.С. Гравитационная устойчивость и динамическая перегретость звездных дисков галактик. // *Письма в АЖ*, 2011, Т.37, №6, с. 410-421.
17. Athanassoula E. 1992, *MNRAS*, 259, 345-364.
18. Salo, H. et al. 1999, *AJ*, 117, 792-810.
19. Torgashin Yu.M., Omurkanov T.Z. Spiral-vortex structures generation in gaseous galactic disks with a two-hump rotation curve. *Astron. Nachr.* 2013, N8, v. 334, pp. 870-878.
20. Torgashin Yu.M., Omurkanov T.Z. Large scale hydrodynamic modes of oscillations in gaseous disks of flat galaxies with a kink on rotation curves. *Open Astron.* 2018; 27: 278–289.
21. Торгашин Ю.М. Неустойчивые гидродинамические моды в газовых дисках галактик с "двугорбой" кривой вращения. Сборник трудов конференции "Звезды и спутники", посвященной 100-летию со дня рождения А.Г. Масевич. - М., Янус-К, 2018, с. 282-288.