

## АСТРОНОМИЯ

УДК 524.7

MSC 85A30, 85-08

**Гравитационная неустойчивость газопылевых  
околоядерных дисков близких галактик***Р. В. Ткаченко<sup>1</sup>, В. И. Корчагин<sup>1</sup>, Б. Б. Жмайлов<sup>2</sup>*<sup>1</sup> Институт физики, Южный федеральный университет,  
Российская Федерация, 344090, Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194<sup>2</sup> Институт высоких технологий и пьезотехники, Южный федеральный университет,  
Российская Федерация, 344090, Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10

**Для цитирования:** *Ткаченко Р. В., Корчагин В. И., Жмайлов Б. Б.* Гравитационная неустойчивость газопылевых околоядерных дисков близких галактик // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2022. Т. 9 (67). Вып. 3. С. 561–571. <https://doi.org/10.21638/spbu01.2022.316>

С помощью двумерного многокомпонентного гидродинамического моделирования мы изучаем влияние пыли на развитие неустойчивости в газопылевых минидисках, наблюдаемых в центральных областях галактик, в частности в галактике NGC 4736. Пыль, связанная с газом гравитационно и посредством силы трения, зависящей от разности скоростей между двумя компонентами, приводит к неустойчивости минидиска, находящегося во внешнем потенциале галактики. В модели оказывается возможным объяснить развитие неустойчивости и появление спиральных структур, наблюдаемых в дисках. Возникающие спиральные структуры оказываются многорукавными, что связано с доминированием Фурье-амплитуд высоких порядков. Неустойчивость газопылевых околоядерных дисков является важным механизмом для объяснения активности галактических ядер, связанной с аккрецией вещества на центральную черную дыру. Моделирование показало, что добавление пыли к газовой компоненте с отношением пыли к газу в 10–20 % способно существенно дестабилизировать газопылевой диск, в результате чего уже через 50–100 млн лет наступает стадия насыщения.

*Ключевые слова:* околоядерные диски, численное моделирование, вычислительная гавитационная динамика, галактические центры.

**1. Введение.** Изучение природы пылевых миниспиралей и образования неустойчивостей в центральных областях галактик имеет большое значение для на-

шего понимания процессов, связанных с аккрецией вещества на центральные черные дыры галактик, и влияния аккреции на активность галактических ядер. Известно, например, что развитие спиральной структуры в протопланетных дисках играет важную роль в аккреции вещества на центральную звезду [1]. Поэтому естественно предположить, что динамика волн плотности газа в околоядерных галактических дисках играет важную, если не определяющую роль в подпитке центральных черных дыр в ядрах активных галактик. Наблюдаемые данные центральных областей близких галактик с высоким разрешением (порядка 10 пк), появляющиеся в настоящее время, а также данные о содержании и распределении пыли и газа в околоядерных галактических дисках, темпах звездообразования в них, кривых вращения минидисков и массы центральных черных дыр позволяют перевести задачу в количественную плоскость [2–4]. В настоящей работе в качестве наблюдаемого материала выбрана галактика NGC 4736.

Темп подпитки газом центральных сверхмассивных черных дыр сводится к выявлению механизмов переноса углового момента газа. Перенос момента в галактических минидисках, в частности, может быть связан с гравитационным влиянием, оказываемым галактическими барами на вещество околоядерных газопылевых дисков. Наблюдаются, однако, галактики, в которых миниспиральные рукава образуются и в отсутствие баров [5, 6], что приводит к актуальной задаче поиска альтернативных механизмов переноса углового момента газа. Кроме того, структуры минидисков, связанные с влиянием галактического бара, должны приводить к образованию двухрукавных спиралей, однако наблюдаются и многорукавные структуры [6]. Одним из таких альтернативных механизмов является перенос углового момента спиральными волнами плотности в гравитирующих дисках посредством сил трения между газом и пылью. Ключевым механизмом, исследуемым в настоящей работе, является учет влияния пыли на динамику центральных минидисков, приводящего к развитию неустойчивости в них. Параметры газовых компонент околоядерных дисков, такие как плотность газа и скорость звука в нем, указывают на то, что диски являются устойчивыми. Тем не менее в галактических минидисках наблюдается развитая спиральная структура, что напрямую может быть связано с влиянием пылевой компоненты [6]. Отметим также, что центральные области галактик являются областями с высокой металличностью и содержанием пыли. Отношение плотностей пыли и газа в центральном газопылевом диске галактики NGC 4736 может достигать 10–20 % [7, 8].

В разделе 2 дана модель, принятая нами для описания динамики газопылевого диска. В разделе 3 приведены параметры минидиска галактики NGC 4736, а также результаты моделирования динамики газопылевого диска этой галактики. В разделе 4 суммированы результаты наших исследований.

**2. Равновесные параметры и гидродинамическая модель.** Начальное осесимметричное распределение плотностей газа и пыли в минидиске задавалось с учетом наблюдаемых параметров центрального минидиска в галактике NGC 4736 [3, 9]. Таким образом, распределение поверхностных плотностей газа и пыли в диске задается уравнением

$$\sigma_{g,d}(r) = \sigma_{g,d}^0 \exp(-r/r_s), \quad (1)$$

где  $\sigma_{g,d}$  — поверхностная плотность, индексы  $g$  и  $d$  отвечают газовой и пылевой компонентам соответственно,  $r_s$  — радиальная шкала диска, значение которой принято из наблюдений и равно 0.5 кпк [3]. Центральная плотность газа  $\sigma_g^0$  принята из

наблюдений и равна  $120 M_{\odot} \text{пк}^{-2}$  [9]. Полная масса газового минидиска оказывается равной  $1.58 \cdot 10^8 M_{\odot}$ . Для пыли величина  $\sigma_d^0$  определяется из отношения  $\epsilon = \sigma_d / \sigma_g$ . В настоящей работе исследуются модели с двумя принятыми значениями  $\epsilon$ : 0.1 и 0.2 (в тексте статьи они названы Me01 и Me02 соответственно). Толщина молекулярного диска  $h$  принимается равной 0.1 кпк, что является разумной величиной [10]. Нужно отметить, что в наблюдениях отсутствуют данные о толщине окооядерного диска NGC 4736 ввиду того, что галактика наблюдается плашмя. Значения объемных плотностей газа и пыли могут быть вычислены как  $\rho_{g,d}(r) = \sigma_{g,d}(r)/h$ .

Решение поставленной задачи подразумевает решение набора гидродинамических уравнений. Нами был разработан двумерный мультикомпонентный численный код, основанный на ZEUS 2D из [11]. Гидродинамические уравнения дискретизированы на логарифмической эйлеровой сетке в полярных координатах ( $256 \times 256$  расчетных ячеек), что предоставляет высокую точность во внутренней части диска. Для решения уравнений движения и непрерывности использовался метод конечных разностей, подробное описание которого для однокомпонентной среды — газа можно найти в [11]. Внутренняя граница расчетной области ограничена  $r_{in} = 0.02$  кпк и внешняя —  $r_{out} = 1.5$  кпк. В качестве граничных условий на внутренней границе задан режим аккреции, на внешней — режим отражения.

Для обезразмеривания задачи мы приняли гравитационную постоянную равной единице, выбрали единицу длины равной 1 кпк, а единицу массы —  $10^9 M_{\odot}$ . Тогда единица времени измеряется в  $1.49 \cdot 10^7$  лет, скорость — в  $65.6 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ , а поверхностная плотность — в  $10^3 M_{\odot} \text{пк}^{-2}$ .

Поведение двухкомпонентной гидродинамической модели описывается системой уравнений непрерывности, уравнений движения и уравнения Пуассона в полярных координатах для газовой ( $g$ ) и пылевой ( $d$ ) компонент:

$$\frac{\partial \rho_{g,d}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{g,d} \cdot \mathbf{v}_{g,d}) = 0, \quad (2)$$

где  $\rho_{g,d}$  — объемные плотности газа и пыли,  $\mathbf{v}_{g,d}$  — векторы скорости газовой и пылевой компонент. Уравнения движения имеют вид

$$\frac{\partial \mathbf{v}_g}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \cdot \nabla) \mathbf{v}_g = -\frac{\nabla P_g}{\Sigma_g} - \nabla(\Phi + \Phi_H) - \epsilon \frac{(\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_d)}{t_{stop}}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}_d}{\partial t} + (\mathbf{v}_d \cdot \nabla) \mathbf{v}_d = -\nabla(\Phi + \Phi_H) + \frac{(\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_d)}{t_{stop}}. \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) отличаются тем, что в уравнении (3) есть слагаемое с давлением, где  $P_g$  — давление газа, в уравнении (4) оно отсутствует. Это связано с тем, что пылевая компонента воспринимается как среда без давления (или с очень малой скоростью звука). Последние слагаемые в уравнениях (3) и (4) описывают силу трения между двумя компонентами, пропорциональную разностям скоростей  $\mathbf{v}_g$  и  $\mathbf{v}_d$ , где величина  $\epsilon = \rho_d / \rho_g$  есть отношение плотностей пылевой и газовой компонент. Величина  $t_{stop}$  является характерным временем обмена импульсом между пылью и газом и выражается уравнением [12]

$$t_{stop} = \frac{a \rho_{in}}{\rho_g c_s}, \quad (5)$$

здесь  $a$  и  $\rho_{in}$  — радиус и внутренняя плотность пылинки (внутренняя плотность принята равной  $4 \text{ гр} \cdot \text{см}^{-3}$ ). В работах [13, 14] сделан вывод о том, что большая

часть пыли в центральных областях галактик может содержаться в гранулах, размер которых превышает 3 мкм. Мы принимаем в наших расчетах размер пылинок равным 5 мкм. Скорость звука в газовой компоненте  $c_s$  принята равной  $7 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Для расчета силы трения нами используется явная схема, описанная в работе [12], являющаяся устойчивой при условии, что шаг по времени удовлетворяет неравенству  $dt < 2t_{stop}$ . Это накладывает дополнительное ограничение при выборе временного шага (наряду с критерием Куранта — Фридрихса — Леви):  $C$ , принятого равным 0.6.

Величины  $\Phi$  и  $\Phi_H$  представляют собой потенциал самогравитации газопылевого диска, который рассчитывается методом FFT, и внешний стационарный потенциал, создаваемый галактическим балджем, гало и центральной черной дырой соответственно. Таким образом, уравнение Пуассона можно представить в виде

$$\Delta\Phi = 4\pi G(\rho_g + \rho_d). \quad (6)$$

Система гидродинамических уравнений замыкается с помощью уравнения состояния:

$$P_g = K\rho_g^\gamma, \quad (7)$$

где  $\gamma$  — показатель политропы газа, который в настоящей работе принимается равным 1 (считаем газ изотермическим). Константу  $K$  определяем из уравнения для скорости звука, полагая  $c_s = 7 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ :

$$c_s = \sqrt{\frac{\partial P_g}{\partial \rho_g}} = \sqrt{\gamma K \rho_g^{\gamma-1}}. \quad (8)$$

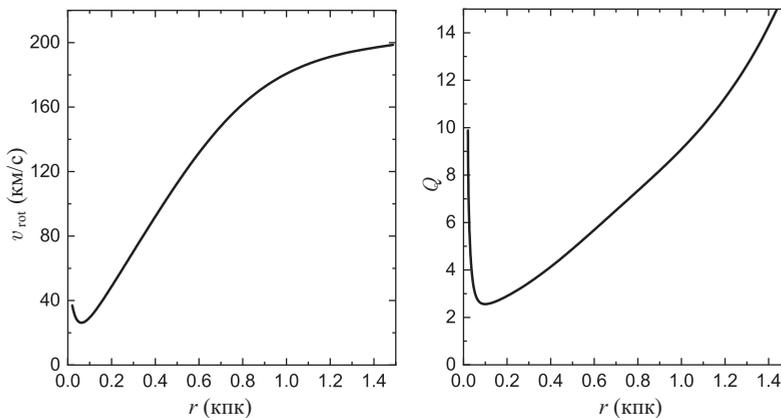


Рис. 1. Равновесная кривая вращения газопылевого диска (слева) и параметр газовой компоненты  $Q$  (справа) для галактики NGC 4736.

Наблюдаемая кривая вращения внутренней части галактики NGC 4736 хорошо описывается с помощью уравнения

$$v_{\text{rot}}(r) = \sqrt{v_c^2 + \frac{GM_{BH}}{r} + r \frac{\partial \Phi}{\partial r}}, \quad (9)$$

где последние два слагаемых определяют вклад от центральной черной дыры и самогравитации минидиска соответственно, учет которых крайне важен в центральной части диска ввиду определяющего влияния в области 20–60 пк;  $M_{BH} = 6.8 \cdot 10^8 M_{\odot}$  — масса центральной черной дыры [2]. Первое слагаемое описывает вклад во вращение от внутренней части галактики,  $v_c$  может быть определено с помощью уравнения [3]

$$v_c(r) = v_0 \cdot \frac{r}{[(r_0)^4 + (r)^4]^{1/4}}, \quad (10)$$

где  $v_0$  принята равной  $200 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ , а  $r_0$  — характерный масштаб, соответствующий переходу кривой вращения в область с постоянной скоростью, на котором твердотельное вращение переходит в область с постоянной скоростью. В настоящей работе  $r_0$  равно 0.9 кпк.

Таким образом, результирующее распределение азимутальных скоростей в минидиске описывается уравнением (9) и представлено на рис. 1. Радиальные скорости газа и пыли в начальный момент времени полагаются равными нулю.

Критерий Тумре (критерий устойчивости) для газовой компоненты  $Q$ , описывающий рост мелкомасштабных кольцевых возмущений в диске, имеет вид

$$Q = \frac{c_s \kappa}{\pi \sigma_g G}, \quad (11)$$

здесь  $\kappa$  — эпициклическая частота, определяемая кривой вращения диска. На рис. 1 представлены кривая вращения минидиска, а также радиальная зависимость критерия Тумре для минидиска галактики NGC 4736. Как видно из рис. 1, минимальные значения параметра Тумре  $Q_{min}$  близки к значению 2.5. Обычно предполагается, что при значении  $Q > 1$  газовый диск является устойчивым. Однако авторы [15], исследуя около 50 галактик, эмпирически определили критическое значение для устойчивости газового диска:  $Q_c = 1.58$ . Таким образом, исследуемый нами однокомпонентный газовый минидиск в отсутствие холодной пылевой компоненты является устойчивым.

Начальное возмущение в газовой и пылевой компонентах задается в виде случайной добавки к плотности, для которой амплитуда возмущения  $A_r$  оценивается как  $10^{-5}$ .

**3. Результаты моделирования.** Основная задача состоит в изучении возможности дестабилизации минидиска и образования спиральных рукавов холодной пылевой компонентой. Параметрами модели являются отношения масс пылевой и газовой компонент, которые в соответствии с наблюдательными данными принимались равными 0.1 и 0.2.

На рис. 2 представлены наблюдаемые изображения газопылевого околоядерного диска галактики NGC 4736, полученные телескопом «Хаббл» в оптическом диапазоне. В минидиске видна многорукавная спиральная структура с тугой закруткой спиральных рукавов. Спиральная структура нелинейна, так что вариация плотности газа между рукавами и межрукавным пространством может варьироваться в два раза [16].

На рис. 3 показано распределение поверхностных плотностей газовой и пылевой компонент в околоядерном диске в модели Me01 с отношением масс пылевой и газовой компонент  $\epsilon = 0.1$  в моменты времени  $t = 0, 180, 480$  млн лет. На рис. 4

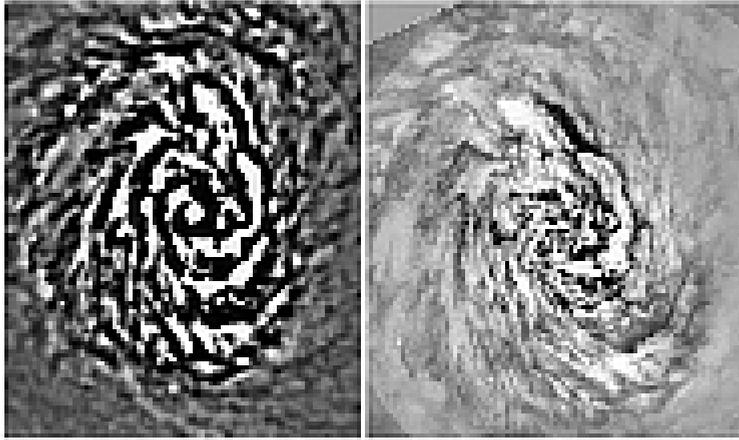


Рис. 2. Изображения центрального минидиска галактики NGC 4736, полученные с помощью космического телескопа «Хаббл» в работах [16] (слева) и [17] (справа). Горизонтальный размер рисунков соответствует 600 пк.

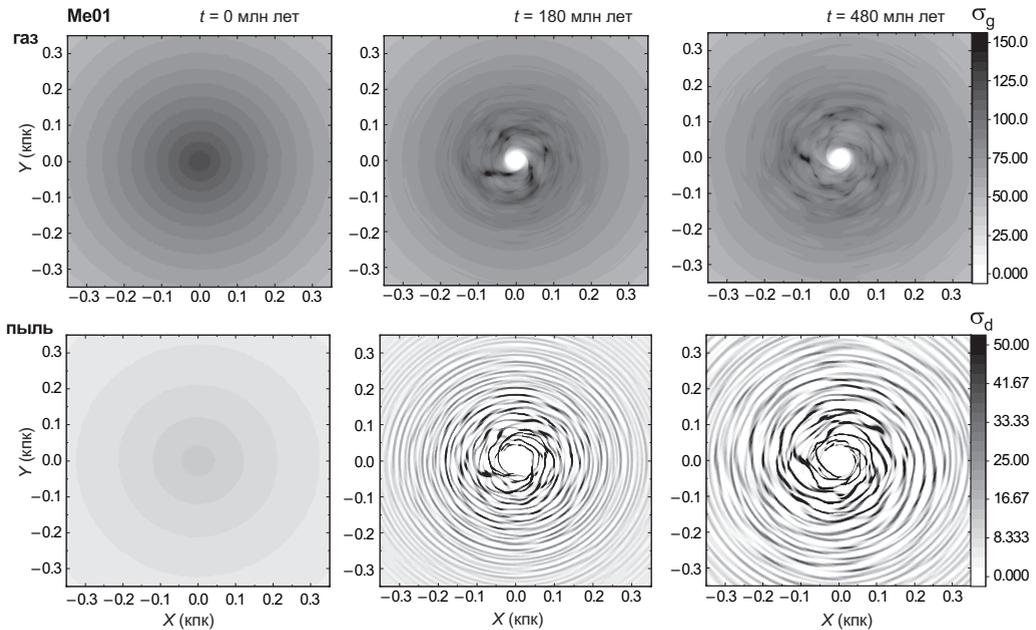


Рис. 3. Распределение газовой (верхний ряд) и пылевой (нижний ряд) поверхностной плотности для модели Me01 ( $\epsilon = 0.1$ ) при  $t = 0, 180, 480$  млн лет. Индикатор с поверхностной плотности (измеряемой в  $M_{\odot} \text{пк}^{-2}$ ) представлен на рисунке.

представлена аналогичная информация для модели Me02, для которой отношение масс пылевой и газовой компонент  $\epsilon$  равно 0.2. В обеих моделях формируется многорукавная спиральная структура. Пылевые рукава коррелируют с газовыми, но отличаются большим контрастом плотности между рукавами и межрукавным пространством и наличием заметно большего числа мелкомасштабных структур. По ме-

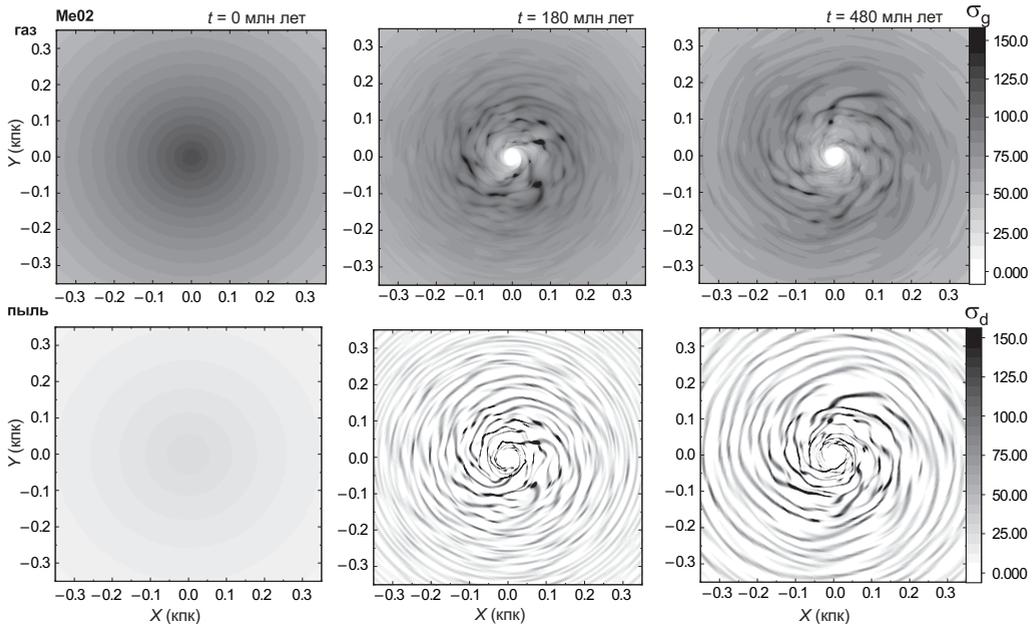


Рис. 4. Распределение газовой (верхний ряд) и пылевой (нижний ряд) поверхностной плотности для модели Me02 ( $\epsilon = 0.2$ ) при  $t = 0, 180, 480$  млн лет. Цветовой индикатор с поверхностной плотности (измеряемой в  $M_{\odot} \text{пк}^{-2}$ ) представлен на рисунке.

ре удаления от центра пылевые рукава больше напоминают кольцевые структуры, хотя для газовой компоненты такие структуры не прослеживаются. Характерный размер области, вовлеченной в образование спиральной структуры, оказывается в модели Me02 приблизительно в два раза большим по сравнению с моделью Me01, для которой спиральная структура достигает радиального размера в 250 пк. Таким образом, модель Me02, для которой доля пыли составляет 20 %, является предпочтительной для объяснения наблюдаемой структуры минидиска галактики NGC 4736. Спиральная структура в численном эксперименте существует по крайней мере на временах порядка 1 млрд лет (вычисления на больших временах не проводились).

На рис. 5 показаны азимутальные вариации плотности на радиусах 50 и 150 пк для моделей Me01 и Me02. В обеих моделях плотность газа меняется примерно в два раза, что соответствует наблюдаемым данным. Для пылевой компоненты вариации плотностей имеют значительно большие значения. Пылевые структуры при этом оказываются более узкими и резкими. Как видно из рисунка, основным отличием моделей являются значения максимальной плотности пыли, которая для модели Me02 в 3–3.5 раза больше, чем для Me01.

Для количественной оценки роста возмущений в газопылевом минидиске используем глобальные амплитуды Фурье, определяемые уравнением

$$A_m = \log_{10} \left( \frac{1}{M_{\text{comp}}} \left| \int_0^{2\pi} \int_{R_{\text{in}}}^{R_{\text{ex}}} \Sigma(r, \phi) r dr e^{-im\phi} d\phi \right| \right), \quad (12)$$

где  $M_{\text{comp}}$  — масса газового или пылевого диска, заключенного в области между  $R_{\text{in}} = 20$  пк и  $R_{\text{ex}} = 300$  пк. Значение 300 пк было выбрано за характерный радиус существования спиральной структуры в минидиске галактики NGC 4736.

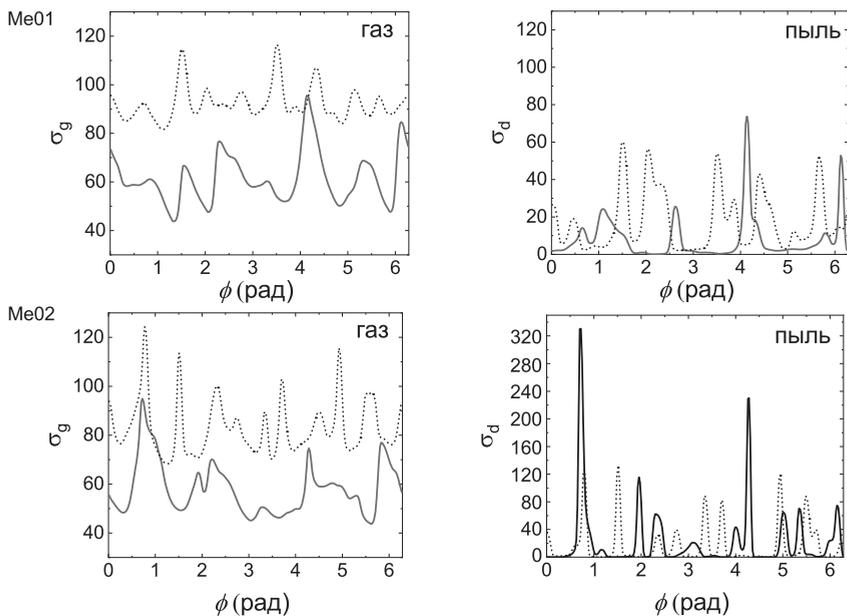


Рис. 5. Азимутальные вариации плотности на двух фиксированных радиусах:  $r = 50$  пк (сплошная линия) и  $150$  пк (точечная линия) для моделей Me01 и Me02.

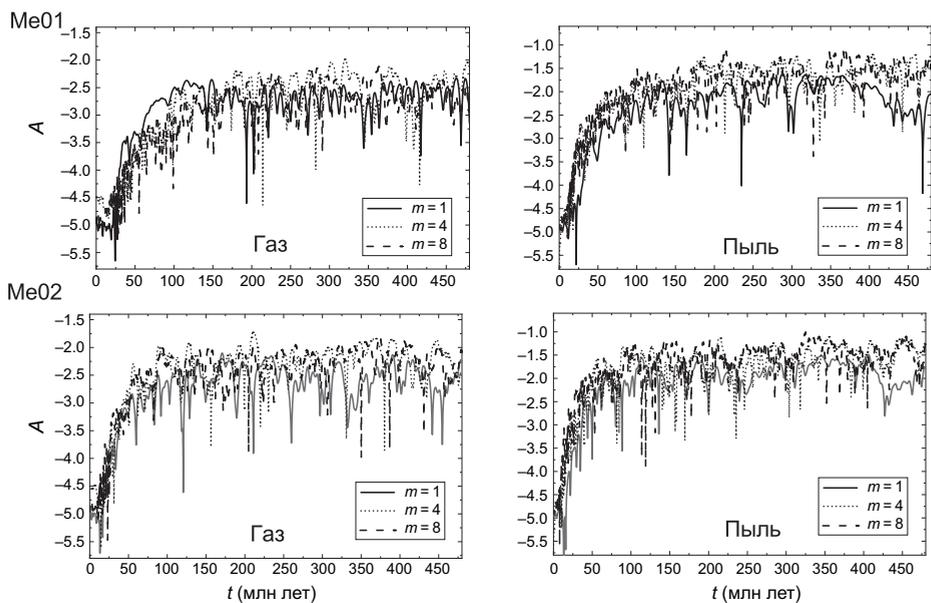


Рис. 6. Эволюция глобальных Фурье-амплитуд газовой и пылевой компонент в моделях Me01 (сверху) и Me02 (снизу) для моды  $m = 1$  (сплошная линия),  $m = 4$  (точечная линия),  $m = 8$  (пунктирная линия).

На рис. 6 представлена эволюция глобальных Фурье-амплитуд газовой и пылевой компонент для мод  $m = 1, 4, 8$ . Из рисунка видно, что возмущения в газовой

и пылевой подсистемах достигают стадии нелинейного насыщения уже через 50–100 млн лет. Отметим также, что возмущения с любым числом спиральных рукавов (в настоящем эксперименте были исследованы моды вплоть до 10) растут практически с одинаковой скоростью в газопылевом минидиске. Глобальные амплитуды в пылевой подсистеме достигают больших значений, чем в газовой подсистеме, причем в модели Me02 значения амплитуд для газовой и пылевой компонент являются большими по сравнению с моделью Me01.

**4. Заключение.** Нами исследовано влияние пылевой компоненты на эволюцию окооядерного газопылевого диска галактики NGC 4736. Основное внимание было уделено вопросу, может ли присутствие пыли в галактических минидисках приводить к их дестабилизации и появлению наблюдаемых многорукавных спиральных узоров в них. Поиск механизмов, приводящих к образованию структуры, является важным, так как альтернативные механизмы возникновения спиральной структуры в минидисках связаны с влиянием галактического бара, что должно приводить к образованию двухрукавных спиралей. Наблюдения, однако, демонстрируют существование многорукавной спиральной структуры в газопылевых минидисках, обнаруживаемой, например, в галактике NGC 4736. Далее, в модели учтено взаимодействие газовой и пылевой компонент посредством как гравитации, так и силы трения между подсистемами, зависящей от относительных скоростей и временной шкалы трения  $t_{stop}$ . Начальные модели основывались на наблюдательных данных минидиска галактики NGC 4736.

Показано, что добавление к газовой компоненте пыли с массовым содержанием 10–20 % от массы газа существенно влияет на динамику окооядерных дисков, приводя к их дестабилизации и образованию многорукавной спиральной структуры. Спиральная структура формируется как в пылевой, так и в газовой подсистемах. Стадия нелинейной стабилизации, сменяющая стадию экспоненциального роста возмущений, наступает приблизительно после 100 млн лет. При этом возникающая спиральная структура как в газовой, так и в пылевой подсистемах является сильно нелинейной. Появляющиеся пики плотностей пылевых рукавов находятся в корреляции с газовыми. Спиральные рукава в пылевой компоненте отличаются от газовых спиральных рукавов тем, что имеют значительно больший контраст плотности в рукавах и межрукавном пространстве. Кроме того, пылевые спиральные рукава являются более узкими по сравнению с газовыми и имеют большее число мелкомасштабных ветвлений. Модель с содержанием пыли 20 % является более предпочтительной в контексте соответствия наблюдаемым данным, так как спиральная структура в этой модели имеет большую протяженность по радиусу по сравнению с моделью M0e1 с содержанием пыли 10 %.

Мы ограничились рассмотрением динамики центрального минидиска одной галактики — NGC 4736, а также моделями, в которых размер пылинок является фиксированным. Модели, учитывающие распределение пылинок по размеру, процессы уничтожения и образования пыли, определение критического отношения массы пыли к массе газа, приводящего к развитию неустойчивости, так же как и оценку темпа аккреции вещества на центральную черную дыру, будут рассмотрены в будущих исследованиях.

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку Южному федеральному университету, 2020 (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации).

## Литература/References

1. Noh H., Vishniac E. T., Cochran W. D. An examination of the  $M=1$  instability in a low-mass protoplanetary disk. *The Astrophysical Journal* **397**, 347 (1992). <https://doi.org/10.1086/171790>
2. Terrazas B. A., Bell E. F., Woo J., Henriques B. M. Supermassive black holes as the regulators of star formation in central galaxies. *The Astrophysical Journal* **844** (2), 170 (2017). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa7d07>
3. Shioya Y., Tosaki T., Ohyama Y., Murayama T., Yamada T., Ishizuki S., Taniguchi Y. Molecular gas in the poststarburst galactic nucleus of NGC 4736. *Publications of the Astronomical Society of Japan* **50** (3), 317–323 (1998). <https://doi.org/10.1093/pasj/50.3.317>
4. Gerin M., Casoli F., Combes F. Molecular gas in the RSAB galaxy NGC 4736. *Astronomy and Astrophysics* **251**, 32–42 (1991).
5. Wada K., Fukushige R., Izumi T., Tomisaka K. Circumnuclear Multiphase Gas in the Circinus Galaxy. I. Non-LTE Calculations of CO Lines. *The Astrophysical Journal* **852** (2), 88 (2018). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa9e53>
6. Martini P., Regan M. W., Mulchaey J. S., Pogge R. W. Circumnuclear dust in nearby active and inactive galaxies. II. Bars, nuclear spirals, and the fueling of active galactic nuclei. *The Astrophysical Journal* **589** (2), 774 (2003). <https://doi.org/10.1086/374685>
7. Muñoz-Mateos J. C., De Paz A. G., Boissier S., Zamorano J., Dale D. A., Pérez-González P. G., Kennicutt Jr. R. C. Radial distribution of stars, gas, and dust in sings galaxies. II. Derived dust properties. *The Astrophysical Journal* **701** (2), 1965 (2009). <https://doi.org/10.1088/0004-637X/701/2/1965>
8. Muñoz-Mateos J. C., Boissier S., De Paz A. G., Zamorano J., Kennicutt Jr. R. C., Moustakas J., Gallego J. Radial distribution of stars, gas, and dust in sings galaxies. III. Modeling the evolution of the stellar component in galaxy disks. *The Astrophysical Journal* **731** (1), 10 (2011). <https://doi.org/10.1088/0004-637X/731/1/10>
9. Van der Laan T. P. R., Armus L., Beirao P., Sandstrom K., Groves B., Schinnerer E., Kennicutt R. C. Heating and cooling of the neutral ISM in the NGC 4736 circumnuclear ring. *Astronomy & Astrophysics* **575**, A83 (2015). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425402>
10. Patra N. N. Theoretical modelling of two-component molecular discs in spiral galaxies. *Astronomy & Astrophysics* **638**, A66 (2020). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936483>
11. Stone J. M., Mihalas D., Norman M. L. ZEUS-2D: A radiation magnetohydrodynamics code for astrophysical flows in two space dimensions. III-The radiation hydrodynamic algorithms and tests. *The Astrophysical Journal Supplement Series* **80**, 819 (1992). <https://doi.org/10.1086/191682>
12. Stoyanovskaya O. P., Snytnikov V. N., Vorobyov E. I. Analysis of Methods for Computing the Trajectories of Dust Particles in a Gas — Dust Circumstellar Disk. *The Astrophysical Journal Supplement Series* **61** (12), 1044 (2017). <https://doi.org/10.1134/S1063772917120071>
13. Maiolino R., Marconi A., Oliva E. Dust in active nuclei — II. Powder or gravel? *Astronomy & Astrophysics* **365** (2), 37–48 (2001). <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20000012>
14. Maiolino R., Marconi A., Salvati M., Risaliti G., Severgnini P., Oliva E., Vanzì L. Dust in active nuclei. I. Evidence for “anomalous” properties. *Astronomy & Astrophysics* **365** (2), 28–36 (2001). <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20000177>
15. Kennicutt Jr. R. C. The star formation law in galactic disks. *Astronomy & Astrophysics* **344**, 685 (1989). <https://doi.org/10.1086/167834>
16. Elmegreen D. M., Elmegreen B. G., Eberwein K. S. Dusty acoustic turbulence in the nuclear disks of two liner galaxies ngc 4450 and ngc 4736. *The Astrophysical Journal* **564** (1), 234 (2002). <https://doi.org/10.1086/324150>
17. Kim W. T., Elmegreen B. G. Nuclear spiral shocks and induced gas inflows in weak oval potentials. *The Astrophysical Journal Letters* **841** (1), L4 (2017). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa70a1>

Статья поступила в редакцию 27 января 2022 г.;  
доработана 28 февраля 2022 г.;  
рекомендована к печати 3 марта 2022 г.

Контактная информация:

Ткаченко Роман Валерьевич — канд. физ.-мат. наук; rtkachenko@sfnedu.ru

Корчагин Владимир Иванович — д-р физ.-мат. наук, проф.; vkorchagin@sfnedu.ru

Жмайлов Борис Борисович — д-р техн. наук, проф.; bbzhmaylov@sfnedu.ru

# Gravitational instability of gas-dust circumnuclear disks in nearby galaxies

R. V. Tkachenko<sup>1</sup>, V. I. Korchagin<sup>1</sup>, B. B. Jmailov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physics, Southern Federal University,

194, pr. Stachki, Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of High Technologies and Piezotechnics, Southern Federal University,

10, ul. Milchakova, Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation

**For citation:** Tkachenko R. V., Korchagin V. I., Jmailov B. B. Gravitational instability of gas-dust circumnuclear disks in nearby galaxies. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*, 2022, vol. 9 (67), issue 3, pp. 561–571.

<https://doi.org/10.21638/spbu01.2022.316> (In Russian)

Using the two-dimensional multi-component hydrodynamical simulations, we study the effect of dust on the development of instability in the gas-dust mini-disks observed in the central regions of galaxies. The dust is coupled with the gas gravitationally and by means of a friction force depending on the velocity difference between the two components. The presence of dust leads to the instability of a mini-disk and the development of a spiral structure observed in the gas-dust mini-disks. The spiral structure is multi-armed, which is caused by a dominance of the high order Fourier harmonics in the unstable modes. The instability of gas-dust circumnuclear disks is an important mechanism for explaining the activity of galactic nuclei associated with the accretion of matter onto a central black hole. We find that the admixture of dust with a dust-to-gas ratio of 10–20% significantly destabilizes the gas-dust disk.

*Keywords:* circumnuclear disks, numerical simulations, computational hydrodynamics, galactic centres.

Received: January 27, 2022

Revised: February 28, 2022

Accepted: March 3, 2022

## Authors' information:

Roman V. Tkachenko — [rtkachenko@sfedu.ru](mailto:rtkachenko@sfedu.ru)

Vladimir I. Korchagin — [vkorchagin@sfedu.ru](mailto:vkorchagin@sfedu.ru)

Boris B. Jmailov — [bbzhmaylov@sfedu.ru](mailto:bbzhmaylov@sfedu.ru)