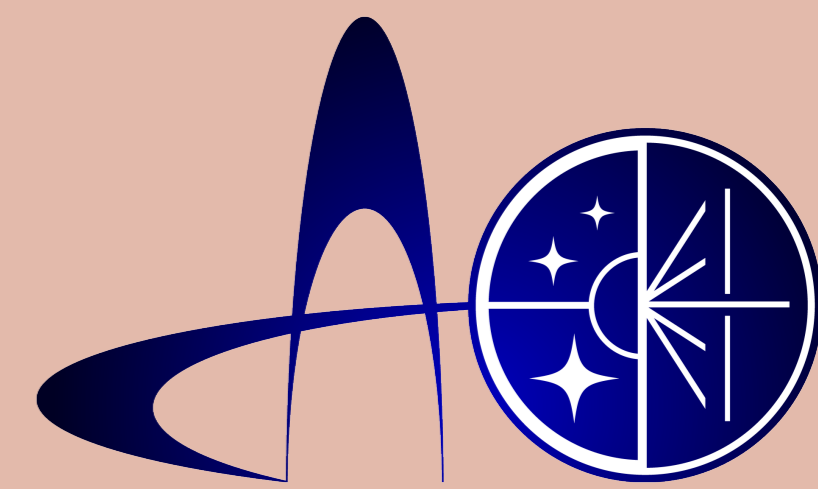




Динамика пылинок и малых тел в аккреционных дисках молодых звезд с остаточным магнитным полем

Кобозева В. А.¹ Хайбрахманов С. А.^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Россия
²Челябинский государственный университет, Россия



Аннотация

В работе представляется численная модель динамики пылинок и малых тел в аккреционных дисках с остаточным магнитным полем. Уравнения модели включают силу тяжести, центробежную силу и силу сопротивления газа. Структура диска моделируется с использованием магнитогидродинамической модели Дудорова и Хайбрахманова с учетом влияния магнитных напряжений на скорость вращения газа. Результаты показали, что тела размером 1 м быстро оседают на экваториальную плоскость, испытывая затухающие колебания, и затем медленно дрейфуют к звезде. Магнитные натяжения увеличивают скорость радиального дрейфа на периферии диска, ускоряя процесс истощения твердых частиц в этих областях и их накопление в «мертвых» зонах.

Введение

Начальные этапы образования звезд сопровождаются формированием газопылевых аккреционных дисков, которые в процессе эволюции могут превращаться в протопланетные. Инфракрасные наблюдения указывают на то, что пылинки в дисках достигают размеров 1 мм и концентрируются вблизи экваториальной плоскости дисков. Они являются основой для формирования крупных тел, поэтому исследование их седиментации и радиального дрейфа, обусловленных действием сил тяжести и аэродинамического сопротивления газа, важно для понимания процессов образования планетных систем.

Анализ наблюдений показывает, что в дисках присутствует остаточное крупномасштабное магнитное поле [2], которое может оказывать значительное влияние на динамику диска, в частности приводить к уменьшению скорости вращения газа по сравнению с кеплеровской [3]. Влиянию данного эффекта на радиальный дрейф частиц посвящена настоящая работа.

Постановка задачи

Рассмотрим движение сферической частицы радиусом a_d и плотностью $\rho_d = 3 \text{ г/см}^3$ с вектором скорости $\mathbf{v} = (v_r, v_\varphi, v_z)$ в аккреционном диске молодой звезды массой M . Частица характеризуется радиус-вектором $\mathbf{r} = (r, \varphi, z)$ и моментом импульса $\mathbf{j} = r\mathbf{v}_\varphi$. Диск в гидростатическом равновесии описывается давлением $p(r, z)$, температурой $T(r)$, плотностью $\rho(r, z)$ и полем скоростей газа $\mathbf{u} = (u_r, u_\varphi, 0)$. Динамику частицы с учетом влияния гравитации звезды, центробежной силы и сопротивления газа описывают следующие безразмерные уравнения

$$\begin{cases} \frac{dr}{dt} = v_r, \\ \frac{dv_r}{dt} = \frac{j^2}{r^3} - \frac{1}{r^2} - \frac{v_r - u_r}{\tau_s}, \\ \frac{dj}{dt} = -\frac{r}{\tau_s} \left(\frac{j}{r} - u_\varphi \right), \\ \frac{dz}{dt} = v_z, \\ \frac{dv_z}{dt} = -\frac{z}{r^3} - \frac{v_z}{\tau_s}, \end{cases} \quad \begin{cases} r(t=0) = r_{\text{init}}, \\ v_r(t=0) = 0, \\ j(t=0) = r_{\text{init}} v_K(r_{\text{init}}), \\ z(t=0) = z_{\text{init}}, \\ v_z(t=0) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где τ_s — безразмерное время остановки, r_{init} и z_{init} — начальные радиальная и вертикальная координаты частицы соответственно. Единицы измерения соответствуют кеплеровской орбите на $r_0 = 1 \text{ а. е.}$

Методы и параметры

Система уравнений (1) решается численно с помощью метода LSODA, реализованного в библиотеке SciPy для языка Python.

Структура диска рассчитывается с помощью магнитогидродинамической модели Дудорова и Хайбрахманова [1, 4], в которой учитывается влияние магнитного поля на скорость вращения газа. Рассмотрено три варианта расчета структуры диска:

- 1 аналитическое решение уравнений модели, радиальные профили характеристик диска задаются как степенные функции r , степень отклонения скорости газа от кеплеровской фиксирована, $u_\varphi/v_K = 0.9987$;
- 2 численное решение уравнений модели с учетом отклонения от кеплеровского вращения, вызванного градиентом газового давления;
- 3 численное решение уравнений модели с дополнительным учетом влияния магнитных натяжений на скорость вращения газа [3].

Параметры: радиус a_d от 1 мкм до 1 м, $r_{\text{init}} = 1, 10, 50, 100 \text{ а. е.}$, $z_{\text{init}} = 3H$, где H — локальная шкала высот.

Результаты

На левой панели Рис. 1 изображены траектории движения. Частицы сначала быстро, за времена 2.7, 8.1, 89.5, 252 лет для $r_{\text{init}} = 1, 10, 50, 100 \text{ а. е.}$ соответственно, седиментируют к экваториальной плоскости. Оседание сопровождается затухающими колебаниями относительно $z = 0$. Затем частицы более медленно дрейфуют по направлению к звезде. Времена дрейфа составляют 0.097, 4.459, 84.54, 306 тыс. лет для $r_{\text{init}} = 1, 10, 50, 100 \text{ а. е.}$ соответственно.

На правой панели Рис. 1 представлены радиальные профили скоростей дрейфа при $r_{\text{init}} = 50 \text{ а. е.}$ Во всех случаях частицы за очень короткое время выходят на стационарную скорость движения. Движение частиц размерами 1 мкм и 1 см характеризуется монотонным увеличением скорости при приближении к звезде. Например, для $a_d = 1 \text{ см}$ скорость меняется от 78 см/с до 376 см/с. Движение частицы размером 1 м сопровождается увеличением скорости в области от 50 до 0.36 а. е. Затем при приближении к звезде скорость начинает уменьшаться. Это связано с переходом от режима Эпштейна во внешней части диска к режиму Стокса во внутренней части.

Рис. 2 иллюстрирует отношения u_φ/v_K в расчетах 1–3 и профили скоростей радиального дрейфа тела радиусом $a_d = 1 \text{ м}$ с начальной координатой $r_{\text{init}} = 100 \text{ а. е.}$ Степени отклонения тем больше, чем меньше отношение u_φ/v_K , которое зависит от r и меняется в пределах 0.9960–0.9899 и 0.9950–0.9798 в расчетах 2 и 3 соответственно. С учетом магнитного поля значение отклонения больше. В расчете 1 скорость при движении тела от r_{init} в сторону звезды сначала увеличивается до максимального значения 65.44 м/с на $r \approx 0.36 \text{ а. е.}$, а затем уменьшается до $\approx 30 \text{ м/с}$ вблизи внутренней

Результаты

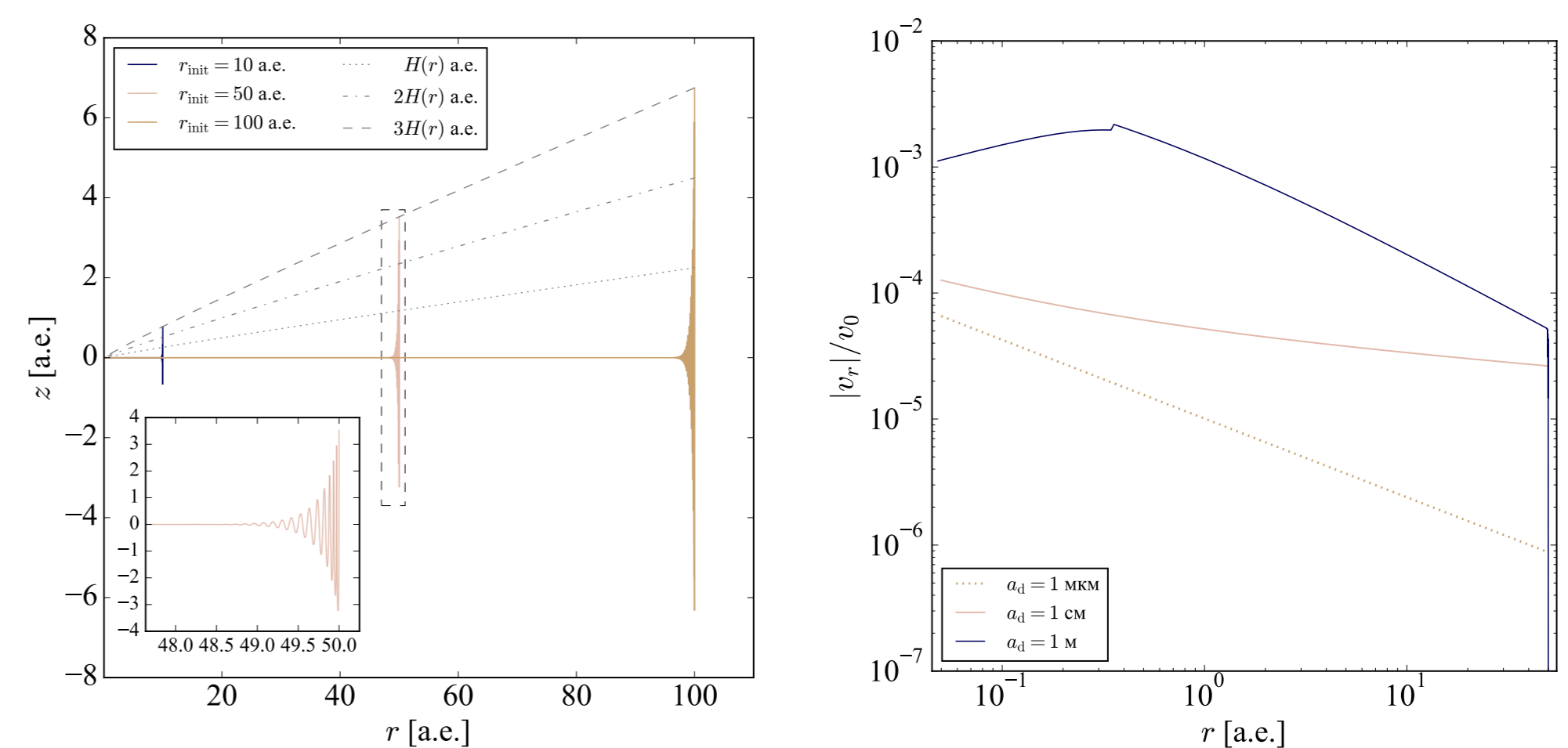


Рис. 1. Левая панель: траектории движения $z(r)$ частицы радиусом $a_d = 1 \text{ м}$ в зависимости от начальной координаты r_{init} , на рисунке также представлено увеличенное изображение траектории тела при $r_{\text{init}} = 50 \text{ а. е.}$; правая панель: радиальные профили скоростей радиального дрейфа частиц разных радиусов при $u_\varphi/v_K = 0.9987$ и $r_{\text{init}} = 50 \text{ а. е.}$, здесь $v_0 = 2.976 \times 10^6 \text{ см/с}$

границы диска $r \approx 0.05 \text{ а. е.}$ Небольшой скачок профиля $v_r(r)$ вблизи максимума соответствует переходу от закона сопротивления Эпштейна во внешней части диска к закону Стокса во внутренней. Время дрейфа составляет около 85 тыс. лет. В расчетах 2 и 3 в процессе дрейфа к звезде скорость так же сначала растет, а затем уменьшается. Однако дрейф происходит с большей скоростью: в расчете 2 скорость больше на 190 см/с в области от r_{init} до $r \approx 0.3 \text{ а. е.}$, в расчете 3 — на 833 см/с. Большие скорости дрейфа обусловлены большими значениями отклонения скорости газа от кеплеровской.

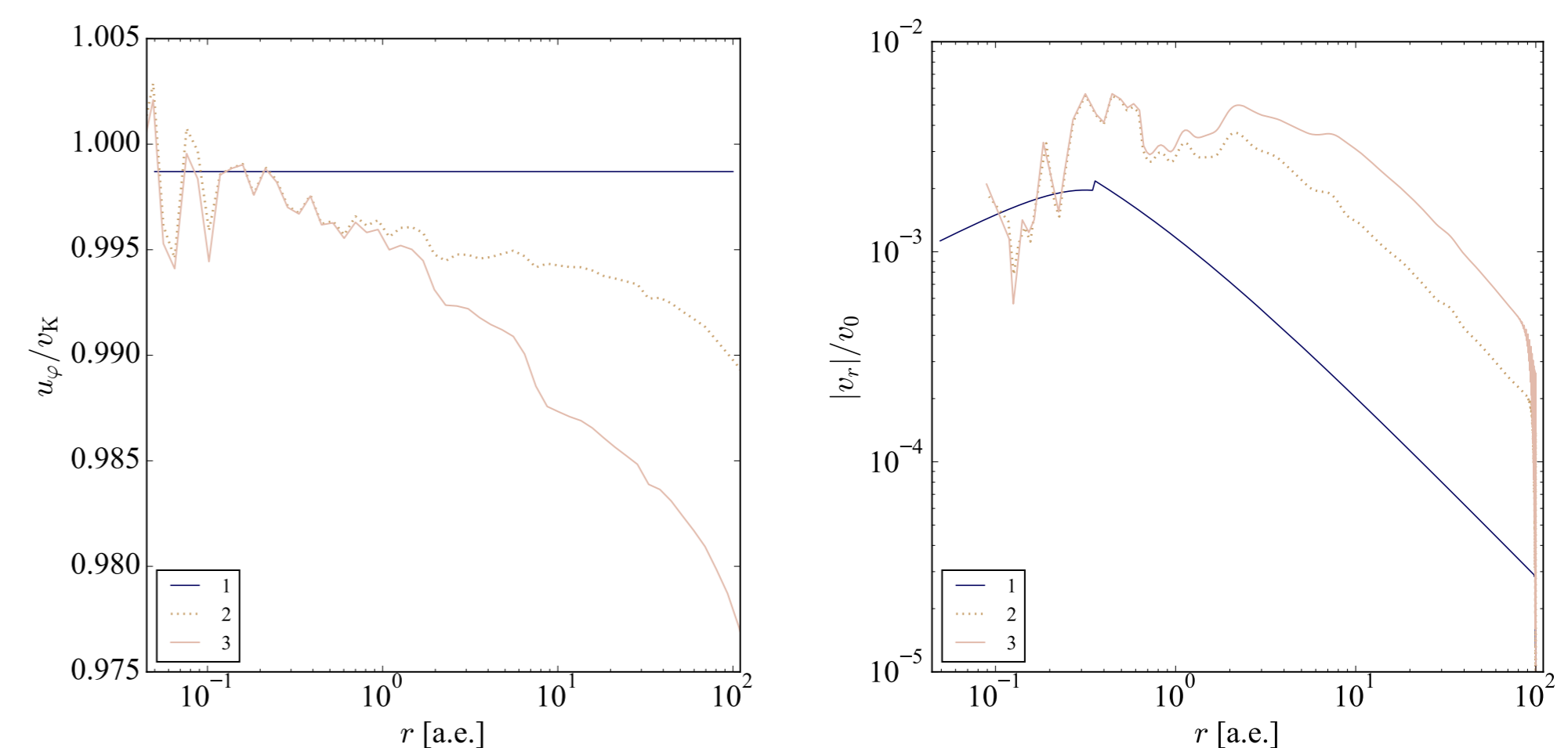


Рис. 2. Левая панель: степени отклонения скорости газа от кеплеровского вращения в зависимости от расстояния; правая панель: радиальные профили скоростей радиального дрейфа частиц радиусом $a_d = 1 \text{ м}$ в расчетах 1–3 при $r_{\text{init}} = 100 \text{ а. е.}$, здесь $v_0 = 2.976 \times 10^6 \text{ см/с}$

Заключение

Моделирование показывает, что динамика пылинок и малых тел состоит из двух этапов: оседания к экваториальной плоскости и последующего радиального дрейфа к звезде. Времена седиментации на 1–3 порядка меньше, чем времена радиального дрейфа. Тела размером $\geq 1 \text{ м}$ испытывают затухающие колебания относительно экваториальной плоскости, что может приводить к изменению спектра их размеров.

Замедление скорости вращения газа по сравнению с кеплеровской, вызываемое магнитными натяжениями, обуславливает повышение скорости дрейфа на периферии диска. Таким образом, истощение твердых частиц во внешних частях дисков и их накопление в «мертвых» зонах со слабым магнитным полем будет происходить быстрее в дисках с магнитным полем.

Список литературы

- [1] A. Dudorov and S. Khaibrakhmanov. Fossil magnetic field of accretion disks of young stars. *Astrophysics and Space Science*, 352:103–121, 2014.
- [2] S. Khaibrakhmanov. Magnetic fields of protoplanetary disks. *Astronomical and Astrophysical Transactions*, page arXiv:2401.14180, 2024.
- [3] S. Khaibrakhmanov and A. Dudorov. Dynamics of magnetized accretion disks of young stars. *Astronomy Reports*, 99(10):832–846, 2022.
- [4] S. Khaibrakhmanov, A. Dudorov, S. Parfenov, and A. Sobolev. Large-scale magnetic field in the accretion discs of young stars: the influence of magnetic diffusion, buoyancy and hall effect. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 464(1):586–598, 2017.

Работа С. А. Хайбрахманова поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (проект № 23-1-3-57-1).