

Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга Семинар отдела релятивистской астрофизики

Моделирование свободного падения струи вещества на протопланетный диск

Демидова Татьяна Валерьевна Григорьев Виталий Валерьевич

Крымская астрофизическая обсерватория РАН

29 апреля 2025

Дугообразные асимметрии на изображениях ППД, *Cazzoletti+, 2018; Perez+, 2018*



Туго закрученные спирали на изображениях ППД, Avenhaus+, 2018; Huang+, 2018



Двухрукавные спирали на изображениях ППД, Garufi+, 2013; Benisty+, 2015



Симметричные тени на изображениях ППД, Marino+, 2014; Benisty+, 2017



Кольцевые структуры на изображениях ППД, Fedele+, 2017; van der Plas+, 2017; Huang+, 2018,



Компактные сгустки — выбросы



Vorobyov+, A&A, 2017

2D, пролет массивной звезды (intruder), 12 моделей. Получались сгустки: 5 – 25M_{Jupiter}

Компактные сгустки — остатки протозвездного облака



Kuffmeier+, A&A, 2018

3D-моделирование: образование сгустков параллельно с образованием ППД Сгустки падали в область < 10 а.е. от звезды

JuMBOs: свободные компактные объекты



Постановка задачи



Звезда

масса $M=1.4M_{\odot},$ радиус $R=2.3R_{\odot},$ температура $T=7500~{\rm K}$

Протопланетный диск

$$\rho(r, z, 0) = \frac{\Sigma_0}{\sqrt{2\pi}H(r)} \frac{r_{in}}{r} e^{-\frac{z^2}{2H^2(r)}}, v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$
$$H(r) = \sqrt{\frac{\kappa T_d(r)r^3}{GM\mu m_H}}, T_d(r) = \sqrt[4]{\frac{\Gamma}{4}} \sqrt{\frac{R}{r}} T,$$
$$[0.1:50] \text{ a.e.; } M_d = 0.01 M_{\odot}; \mu = 2.35; \Gamma = 0.05$$

Возмущение

 r_0, r_1 – радиальные границы; I – наклон вектора скорости; $L = V/V_K$; m – масса; $\Delta \phi$ – азимутальный угол.

Демидова Т.В. (КрАО РАН)

 $r \in$

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \vec{v} = 0, \\ \rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \nabla \vec{v} \right) = \rho \nabla \phi - \nabla P + \vec{F_{\nu}}, \\ P = c^2(r)\rho; \end{cases}$$

↓ SPH

$$\begin{cases} \rho_i = \sum_j m_j W(\vec{r_i} - \vec{r_j}, h_i), \\ \frac{\Delta \vec{r_i}}{\Delta t} = \vec{v_i}, \\ \frac{\Delta \vec{v_i}}{\Delta t} = \vec{W_i} + \vec{G_i} + \vec{\nu_i}, \\ P_i = c_i^2 \rho_i \end{cases}$$

$$\begin{split} & \Gamma \mathbf{U} Дродинамическое ускорение \\ & \vec{w}_i = -\frac{\vec{r}_i}{|r_i|} \sum_j \left(m_j \frac{p_i}{\Omega_i \rho_i^2} \nabla_i W_{ij}(h_i) + \frac{p_j}{\Omega_j \rho_j^2} \nabla_i W_{ij}(h_j) \right), \\ & \Omega_i = \left[1 - m_i \frac{\partial h_i}{\partial \rho_i} \sum_j \frac{\partial W_{ij}(h_i)}{\partial h_i} \right]; \\ & \mathbf{M} c \mathbf{K} \mathbf{Y} \mathbf{C} \mathbf{C} \mathbf{T} \mathbf{B} \mathbf{E} \mathbf{H} \mathbf{H} \mathbf{A} \mathbf{B} \mathbf{A} \mathbf{S} \mathbf{O} \mathbf{C} \mathbf{T} \mathbf{b} \\ & \nu_i = -0.5 \sum_j m_j \Pi_{ij} [\nabla_i W_{ij}(h_i) + \nabla_i W_{ij}(h_j)], \\ & \Pi_{ij} = \begin{cases} [-\alpha c_i \mu_{ij} + \beta \mu_{ij}^2] / \overline{\rho_{ij}}, & \vec{v_{ij}} \cdot \vec{r}_{ij} < 0 \\ 0, & \vec{v_{ij}} \cdot \vec{r}_{ij} > 0; \end{cases} \\ & \mu_{ij} = \frac{h_{ij} \vec{v_{ij}} \cdot \vec{r}_{ij}}{|\vec{r}_{ij}^2|^2}, \alpha = 1, \beta = 0; \\ \hline \mathbf{\Gamma} \mathbf{D} \mathbf{B} \mathbf{H} \mathbf{T} \mathbf{A} \mathbf{U} \mathbf{M} \mathbf{H} \mathbf{G}_i = \frac{M_* \vec{E}}{|\vec{R}|^5} + \text{самогравитация} \end{split}$$

Расчеты выполнены с помощью кода Gadget-2 (Springel, 2005), модифицированного для протопланетных дисков (Демидова, 2016)

Подходы к решению уравнений газодинамики

Лагранжевы методы

Суть: движущиеся мат. точки, в которых ищем значения макропараметров Варианты: Smooth Particle Hydrodynamics, Particles In Cell

$$f(\mathbf{r}) = \int_{\Omega} f(\mathbf{r}') \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') dx' \approx$$

$$\approx \int_{\Omega} f(\mathbf{r}') W(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|, h) d\mathbf{r}' \approx \sum_{j=1} m_j \frac{f(\mathbf{r}_j)}{\rho_j} W(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|, h)$$

$$W(q) = \alpha_D \begin{cases} 0.25(2-q)^3 - (1-q)^3, & 0 \le q \le 1\\ 0.25(2-q)^3, & 1 \le q \le 2\\ 0, & q \ge 2 \end{cases}$$



Преимущества: реализация более сложной геометрии, идеологически близки к самой среде, динамическое разрешение, континуум Недостатки: дополнительные параметры, сложнее в реализации, поиск соседних частиц, динамическое разрешение, граничные условия

Демидова Т.В. (КрАО РАН)

Моделирование падения струи

Изображения ППД на $\lambda = 1$ мм, Demidova & Grinin, 2022





Масса сгустка 3M_I, место падения 2 – 3 а.е., скорость 60% от Кеплеровой скорости.

Наклонный внутренний диск — симметричные тени, Demidova & Grinin, 2023



Кривая блеска: запыленный дисковый ветер



Гринин & Демидова, ПАЖ, 2024

$$\begin{split} \dot{M}_{wind} &\approx 0.1 \dot{M} \\ \tau &= \tau_{max} (\dot{M} - \dot{M_0}) / \dot{M}_{max} \\ I &= I_{tot} e^{-\tau} + I_{sc} \\ I_{tot} &= I_{\star} \cdot \dot{M} / \dot{M_0} \\ \tau_{max} &= 5, I_{sc} = 0.01 I_{tot} \\ \Delta m &= -2.5 lg \left(\frac{I}{I_{\star}}\right) \end{split}$$

Демидова Т.В. (КрАО РАН)

Подходы к решению уравнений газодинамики

Методы конечных объемов

Суть: ячейки заполняют пространство, внутри них ищем распределение макропараметров Варианты: схема Годунова, метод Галеркина...



Преимущества: выполнение интегральных законов сохранения, лучшая устойчивость, интерполяция Недостатки: численные диссипации, осцилляции, сложнее в реализации

Демидова Т.В. (КрАО РАН)

Моделирование падения струи

"Падение сгустка" на ППД

Grigoryev, Demidova, 2023

PLUTO

РLUTO: Mignone+, ApJS, 2007 $\gamma = 5/3$, $\nu_1 - \alpha$ -параметризация Уравнение энергии $(r, \theta, \varphi) : 195 \times 18 \times 256 = 9 \times 10^5$ ячеек в [0.4; 47.94] a.e. $\times [77.34^\circ; 102.66^\circ] \times [0:2\pi]$

Gadget-2

SPH: Monaghan, ARA&A, 1992, Gadget-2: Springel, MNRAS, 2005 $\gamma = 7/5$, ν_1 — численная вязкость Уравнение на энтропию $(x, y, z) : 10^6$ частиц, $r_{max} = 100$ а.е., 30 ± 2 соседей



 $1M_{Jupiter}$ $v_0 = 0.6v_{kepler}$

Gadget-2: Sink-cell

PLUTO vs. Gadget-2: расчеты, t = 20 лет



Демидова Т.В. (КрАО РАН)

19/ 38

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla\cdot\left(\rho\vec{v}\cdot\vec{v} - p\hat{I}\right)^{T} = -\rho\nabla\Phi + \nabla\cdot\Pi(\nu)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon_t + \rho \Phi)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\left(\varepsilon_t + p + \rho \Phi \right) \vec{v} \right] =$$

$$= \nabla \cdot (\vec{v} \cdot \Pi(\nu)) + \nabla \cdot \vec{F}_c$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} &= \frac{1}{2} \frac{\gamma - 1}{\rho^{\gamma - 1}} \nabla \cdot (\vec{v} \cdot \Pi(\nu)) \\ \Pi(\nu) &= \nu_1 \left[\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T \right] + \left(\nu_2 - \frac{2}{3} \nu_1 \right) (\nabla \cdot \vec{v}) \hat{I} \\ \vec{F}_c &= \kappa \cdot \nabla T \end{aligned}$$

- ho плотность газа
- \vec{v} скорость
- р давление
- $\Phi = -GM_*/R$ грав.потенциал
- ε_t SIE + уд.кин. энергия
- γ параметр адиабаты
- Î ед. матрица
- $p =
 ho \epsilon (\gamma 1)$ $S = p /
 ho^{\gamma}$ — энтропия
- ν₁, ν₂ коэф. вязкости
 κ коэф. теплопроводности

Честное падение: Григорьев & Демидова, АЖ 2024

Начальные и граничные условия

Demidova, T.V., Grinin, V.P., ApJ, 2022

$$\rho(r, z) = \frac{\Sigma_0}{\sqrt{2\pi}H(r)} \frac{r_{\rm in}}{r} e^{-\frac{z^2}{2H^2(r)}}$$

$$\Sigma_0 = \frac{M_{\rm disk}}{2\pi r_{\rm in}(r_{\rm out} - r_{\rm in})}$$

$$H(r) = \sqrt{\frac{k_{\rm B}T_{\rm mid}(r)r^3}{GM_*\mu m_{\rm H}}}$$

Chiang, E.I., Goldreich, P., AJ, 1997 $T_{\rm mid}(r) = \sqrt[4]{\frac{\Gamma}{4}} \sqrt{\frac{R_*}{r}} T_*$

Сгусток: $1M_{Jupiter}$, 20 аu., $\sqrt{2}v_{Kepler}$ Звезда: $1M_{\odot}$ ГУ на R: $\kappa_b \nabla_n T_b = \kappa \nabla_n T$, $\nu_b \nabla_n (\rho_b \vec{v}_b) = \nu \nabla_n (\rho \vec{v})$ и НД

PLUTO

Метод Годунова: Годунов С.К.+, *М:Наука*, 1976, PLUTO: *Mignone+*, *ApJS*, 2007 (r, θ, φ): 144 × 60 × 144 ячеек в области [0.2; 107.2] а.е. ×[15°; 165°] × [0: 2 π] ν_1 и κ — Shakura & Sunyaev, *ApJ*, 1973, Брагинский, 1963, Pr_{turb} = 1

Вычисления

МСЦ РАН — филиал Φ ГУ Φ НЦ НИИСИ РАН: https://www.jscc.ru 144 ядра $\rightarrow \sim 90$ лет за 24^h

Сетка моделей



	ДП-45	ДП-р45	ДП-60	ДП-р60	ДП-30	ДП-р30	ОП-45	ОП-р45
t_1	6.7	6.7	6.9	6.9	6.6	6.6	9.3	9.3
t_{c1}	6.9	6.9	7.1	7.1	6.7	6.7	9.5	9.6
R_1	7.4	7.4	7.0	7.0	7.8	7.8	7.4	7.4
R_{c1}	7.3	7.3	6.9	6.9	7.7	7.5	7.1	7.1
t_2	14.9	14.9	16.2	16.2	14.0	14.0	-	-
t_{c2}	17.2	15.1	20.0	17.8	15.8	14.2	-	-
R_2	15.5	15.5	17.8	17.8	13.8	13.8	-	-
R_{c2}	15.9	12.0	13.6	15.7	14.1	10.0	-	-

Итого: сгусток вытягивается в струю, после первого пересечения орбита заметно меняется. Спиральные волны проходят по диску

Поверхность максимальной плотности (ДП-р45), t = 100 лет



Координата z поверхности максимальной плотности (ОП-45, ОП-р45) *t* = 100 лет



25/38

Координата z поверхности максимальной плотности (ДП-45, ДП-р45) *t* = 100 лет



		ДП-45	ДП-р45	ДП-60	ДП-р60	ДП-30	ДП-р30
	наклон, °	7	12	4	8	4	17
50 лет	азимут $ec{n}$, $^\circ$	308	128	285	165	301	71
	размер, а.е	8	8	11	11	6	5?
	наклон, ^о	7	18	6	20	5	14
100 лет	азимут $ec{n}$, $^\circ$	311	142	298	235	317	95
	размер, а.е	12	13	14	12	12	10
	наклон, °	4	22	6	21	4	7
150 лет	азимут $ec{n}$, $^\circ$	277	119	293	131	316	164
	размер, а.е	22	14	20	15	17	24

Итого: ориентация наклонных дисков зависит от начальной орбиты, есть эволюция во времени

Карта скоростей ОП-р45



Изменение массы и темп аккреции



Изменение массы и темп аккреции



V1057 Cyg: Szabó+, Apj, 2021







Кривая блеска, ДП-р45



Grinin+, Aph, 2023: CQ Таи $\Delta m \approx 3^m \sim$ год, минимум уже ~ 80 лет + внутренний диск Chapillon+, A&A, 2008 Semkov+, A&A, 2015: V1184 Таи $\Delta m \approx 5^m \sim$ год, минимум ~ 8 лет Bouvier+, A&A, 2013: AA Таи $\Delta m \approx 4^m \sim$ год, минимум уже ~ 12 лет

Звезда типа UX Ori: V1184 Tau, Mutafov+, 2019



Звезда типа UX Ori: CQ Tau, Гринин+, 2023



Звезда типа UX Ori: АА Таи, Covey+, 2021



- Построена 3D численная модель протопланетного диска с учетом вязкости и теплопроводности
- При взаимодействии ППД со сгустком массой $1M_I$
 - образуются спиральные волны
 - происходит рост темпа аккреции, способный вызвать вспышку, аналогичную FU Ori (ретроградное движение)
 - при двойном пересечении орбитой диска образуется наклонный внутренний диск
 - при наблюдении с ребра кривая блеска соответствует наблюдательным данным
- 3D-моделирование апостериорно обосновало приближение "2D"

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2024, том 101, № 10, с. 866–884

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ СТРУИ ГАЗА НА ПРОТОПЛАНЕТНЫЙ ДИСК

© 2024 г. В. В. Григорьев*, Т. В. Демидова**

Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Крым, Научный, Россия *E-mail: vitaliygrigoryev@crao.ru **proxima 1@list.ru

> Поступила в редакцию 20.03.2024 г. После доработки 12.06.2024 г. Принята в печать 18.07.2024 г.

Проблему формирования экзопланет на наклонных орбитах по отношению к экваториальной плоскости родительской звезды или основной плоскости протопланетного диска можно решить путем введения наклонного диска меньшего размера. Однако остается открытым вопрос природы такого внутреннего

Демидова Т.В. (КрАО РАН)

Моделирование падения струи

29 апреля 2025

Благодарю за внимание!

e-mail: demidovatv@crao.ru colab.ws: R-38343-088CC-NX08A



Демидова Т.В. (КрАО РАН)