

# Моделирование вертикальной структуры аккреционных дисков вокруг нейтронных звёзд и чёрных дыр

А. Тавлеев, Г. Липунова, К. Маланчев

Государственный Астрономический Институт имени П.К. Штернберга МГУ,  
Университетский пр. 13, Москва, 119234, Россия

tavleev.as15@physics.msu.ru



Мы представляем результаты нового кода, моделирующего вертикальную структуру аккреционных дисков. Код позволяет использовать разные уравнения состояния, модели непрозрачности и механизмы переноса энергии.

## Введение

Рентгеновские двойные — одни из самых ярких объектов в рентгене. Вспышки в таких системах связаны с неустойчивостью в аккреционном диске вокруг компактного объекта (нейтронной звезды или чёрной дыры). Для моделирования вспышек необходимо решить уравнение нестационарной дисковой аккреции [1]. Его решение можно получить, исследуя устойчивость диска посредством анализа так называемых S-кривых — зависимостей потока излучения от поверхностной плотности.

Для построения S-кривых необходимо получить зависимости между физическими параметрами (например, давление и поток лучистой энергии) в диске. Эти зависимости находятся из решения уравнений вертикальной структуры диска.

## Модель вертикальной структуры

Уравнения вертикальной структуры [2]:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dz} = -\omega_K^2 z, \quad (1)$$

$$\frac{d\Sigma}{dz} = -2\rho, \quad (2)$$

$$\frac{d \ln T}{d \ln P} \equiv \nabla = \begin{cases} \nabla_{\text{rad}}, & \nabla_{\text{rad}} < \nabla_{\text{ad}}, \\ \nabla_{\text{conv}}, & \nabla_{\text{rad}} > \nabla_{\text{ad}}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{dQ}{dz} = \frac{3}{2} \omega_K w_{r\phi}, \quad (4)$$

$$z \in [0, z_0].$$

Здесь уравнение (1) — это уравнение гидростатического равновесия с давлением  $P$ , плотностью  $\rho$ , Кеплеровской угловой скоростью  $\omega_K^2 = GM/r^3$ ; уравнение (2) — фактически определение поверхностной плотности  $\Sigma$  как функции  $z$ ; уравнение (4) — уравнение вязкого нагрева. Уравнение (3) определяет градиент температуры. В случае переноса тепла излучением градиент лучистый:

$$\nabla_{\text{rad}} = \frac{3\kappa}{4ac\omega_K^2 z T^4} Q, \quad (5)$$

где  $\kappa$  — Росселандова непрозрачность,  $Q$  — поток излучения,  $a$  — постоянная излучения. В случае сверхадиабатического градиента в диске развивается конвекция, и градиент рассчитывается в рамках теории пути перемешивания.

Вертикальная координата  $z$  меняется от нуля в плоскости симметрии до  $z_0$ , полутолщины диска.

Систему нужно дополнить уравнением состояния, моделью непрозрачности и выражением для тензора вязкости:

$$\rho = \rho(P, T), \quad \kappa = \kappa(\rho, T), \quad w_{r\phi} = \alpha P.$$

Здесь мы используем  $\alpha$ -модель Шакуры–Сюняева для вязкости [3],  $\alpha$  — это турбулентный параметр.

Код может использовать как аналитические выражения для уравнения состояния и закона непрозрачности, так и табличные значения. В частности, мы используем программный пакет MESA [4] для интерполяции табличных значений.

Система дополнена граничными условиями:

$$\begin{aligned} \Sigma(z_0) &= 0, \\ Q(z_0) &= Q_0 = \sigma_{\text{SB}} T_{\text{eff}}^4, \\ T(z_0) &= T_{\text{eff}}, \\ P(z_0) &= P_0. \end{aligned}$$

Код, написанный на Python 3, разработан для численного решения системы (1–4). Входные параметры: масса центрального тела  $M$ , радиус  $r$ , поток излучения  $F$  (или эффективная температура  $T_{\text{eff}}$ , или темп аккреции  $\dot{M}$ ) на этом радиусе, тип непрозрачности и уравнения состояния, турбулентный параметр  $\alpha$ . Программа интегрирует уравнения вертикальной структуры и решает оптимизационную задачу — находит значение свободного параметра  $z_0$ , для которого выполняется дополнительное условие в плоскости симметрии диска:

$$Q(0) = 0.$$

## Результаты

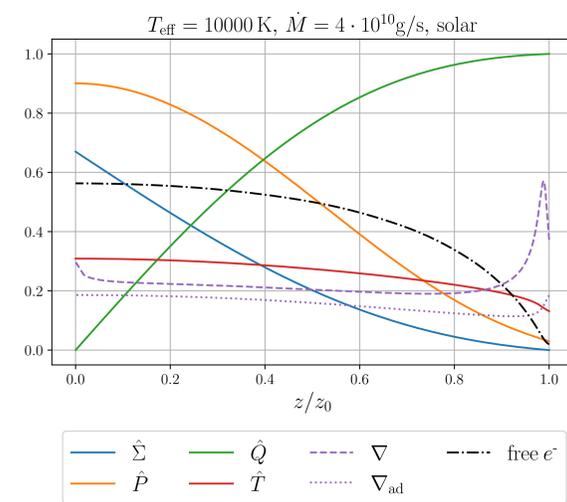


Рис. 1: Вычисленная вертикальная структура при  $r = 1,8 \cdot 10^8$  см,  $\alpha = 0,01$ ,  $M = 6M_{\odot}$ ,  $T_{\text{eff}} = 10^4$  K. На рисунке также показаны градиент температуры в сравнении с адиабатическим градиентом, а также параметр ионизации.

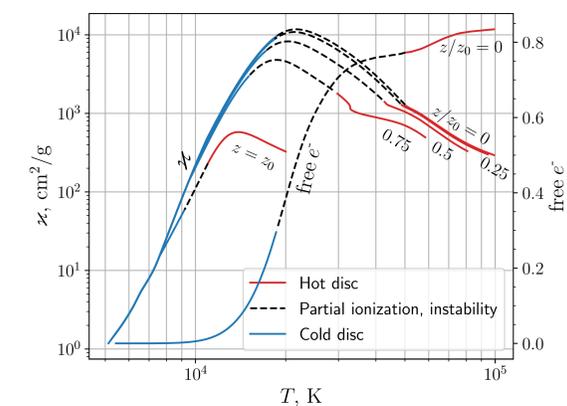
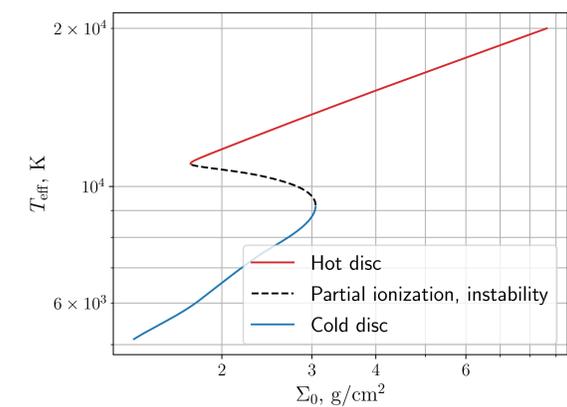


Рис. 2: Сверх-S-кривая, полученная для  $r = 1, \cdot 10^8$  см,  $\alpha = 0,01$ ,  $M = 6M_{\odot}$  и табличных непрозрачностей с солнечным химсоставом. Снизу — коэффициент непрозрачности как функция температуры для тех же параметров на разной глубине. Также нарисована зависимость параметра ионизации от температуры в плоскости симметрии диска.

На Рис. 1 показан пример вертикальной структуры, рассчитанной нашим кодом. Эта структура была получена при  $r = 1,8 \cdot 10^8$  см,  $\alpha = 0,01$ ,  $M = 6M_{\odot}$ ,  $T_{\text{eff}} = 10^4$  K, использовались непрозрачности из MESA с солнечным химсоставом. Видно, что при таких температурах из-за ионизации водорода (параметр ионизации больше нуля) в диске развивается конвекция ( $\nabla > \nabla_{\text{ad}}$ ), охватывающая весь диск. Конвекция не влияет на сам факт неустойчивости, но изменяет вид S-кривой.

На Рис. 2 представлена S-кривая, полученная для  $r = 1,8 \cdot 10^8$  см,  $\alpha = 0,01$ ,  $M = 6M_{\odot}$  в сравнении с коэффициентом непрозрачности на разных глубинах (при  $z/z_0 = 0, 0,25, 0,5, 0,75$ ) и параметром ионизации в диске. Разным стилем отмечены область холодного диска, область частичной ионизации (в которой имеет место неустойчивость) и об-

ласть горячего диска. Видно, что ионизация вещества в центре диска стартует при температуре  $T_c \approx 10^4$  K. Когда ионизация достигает  $\sim 0,3$ , начинается неустойчивость. Она заканчивается, когда диск почти полностью ионизован (ионизация в центре  $\sim 0,75$ ).

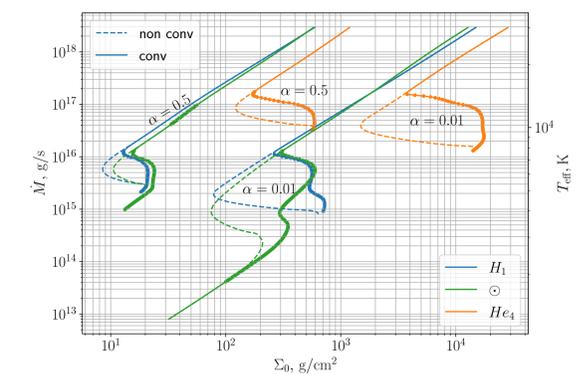


Рис. 3: S-кривые для разного химсостава,  $\alpha$ , с учётом и без учёта конвекции. Всё посчитано для  $M = M_{\odot}$  и  $r = 10^{10}$  см. Жирные точечные участки — зоны, где диск конвективен (условие  $\nabla_{\text{rad}} > \nabla_{\text{ad}}$  выполняется на интервале высот, составляющем более 50% по  $z$ ).

Влияние химсостава, параметра турбулентности  $\alpha$  и конвекции в диске можно проследить на Рис. 3, на котором показаны S-кривые для разного химсостава и параметра  $\alpha$ . Также показаны кривые с учётом и без учёта конвекции. Точками на рисунке выделены области, где конвекция в диске доминирует (условие существования конвекции  $\nabla_{\text{rad}} > \nabla_{\text{ad}}$  выполняется на интервале высот, составляющем более 50% по  $z$ ). Видно, что диск конвективен в неустойчивой области.

При учёте конвекции неустойчивость наступает при больших темпах аккреции. При больших  $\alpha$  участки с конвекцией «оттягиваются» в сторону больших  $\Sigma$ , образуется почти вертикальный участок. При малых  $\alpha$  конвективный участок разбивается на две неустойчивые ветви. При этом верхняя неустойчивая ветвь связана с пиком в непрозрачности, на ней водород частично ионизован. Нижняя ветвь связана с конвекцией [5] и с образованием молекулярного водорода [6]. При больших  $\alpha$  нижняя неустойчивая ветвь не появляется, так как температура не достигает таких низких значений, при которых начинается образование молекул. На гелиевой кривой и при больших  $\alpha$  не появляется второй неустойчивый участок, лишь деформируется основной участок.

## Заключение

- Разработан современный гибкий код для расчёта вертикальной структуры аккреционного диска (код доступен по ссылке <https://github.com/Andrey890/Vertical-structure-of-accretion-discs>);
- Используются разные уравнения состояния и модели непрозрачности, в том числе табличные значения, присутствует возможность менять химический состав вещества диска. Для получения табличных непрозрачностей с разным химсоставом разработан и включен в код интерфейс взаимодействия с кодом MESA;
- Отлажен метод анализа устойчивости вертикальной структуры диска на основе построения S-кривых;

## Список литературы

- [1] J.-M. Hameury, K. Menou, G. Dubus, J.-P. Lasota, and J.-M. Hure. MNRAS, 298:1048–1060, August 1998. 1
- [2] N. I. Shakura, G. V. Lipunova, K. L. Malanчев, V. V. Zhuravlev, D. N. Razdoburdin, P. K. Abolmasov, A. Chashkina, K. A. Postnov, A. Yu. Kochetkova, and L. Hjalmarsson. *Accretion flows in astrophysics*. New York, New York, 2018. 1
- [3] N. I. Shakura and R. A. Sunyaev. A&A, 24:337–355, 1973. 1
- [4] B. Paxton, P. Marchant, J. Schwab, E. B. Bauer, L. Bildsten, M. Cantiello, L. Dessart, R. Farmer, H. Hu, N. Langer, R. H. D. Townsend, D. M. Townsley, and F. X. Timmes. ArXiv, 220:15, September 2015. 1
- [5] John K. Cannizzo. *Accretion Disks in Active Galactic Nuclei: Vertically Explicit Models*. ArJ, 385:94, January 1992. 1
- [6] J. Smak. Dwarf Novae. *Communications of the Konkoly Observatory Hungary*, 83:195, January 1982. 1