

Фрол Дарья¹, Хайбрахманов Сергей^{2,1}

¹) Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург
²) Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Введение

Исследования в области аккреционных и протопланетных дисков молодых звезд необходимы для построения теории образования планет и объяснения наблюдательных данных о множестве экзопланет.

Анализ наблюдательных данных позволяет утверждать, что аккреционные диски и протопланетные диски молодых звезд имеют крупномасштабное магнитное поле, которое имеет остаточную природу [1]. Современные модели указывают на то, что магнитогазодинамические (МГД) эффекты могут влиять на структуру аккреционных и протопланетных дисков, в частности: омический нагрев может повышать температуру газа вблизи границ областей низкой степени ионизации («мертвых» зон) [2].

В настоящей работе исследуются условия, при которых омический нагрев влияет на тепловую структуру диска. Для демонстрации наблюдаемых проявлений дисков с магнитным полем выполняются расчеты и анализ спектральных распределений энергии (spectral energy distribution, SED) дисков. SED являются полезным инструментом для анализа свойств молодых звезд с дисками (см. рис.1).

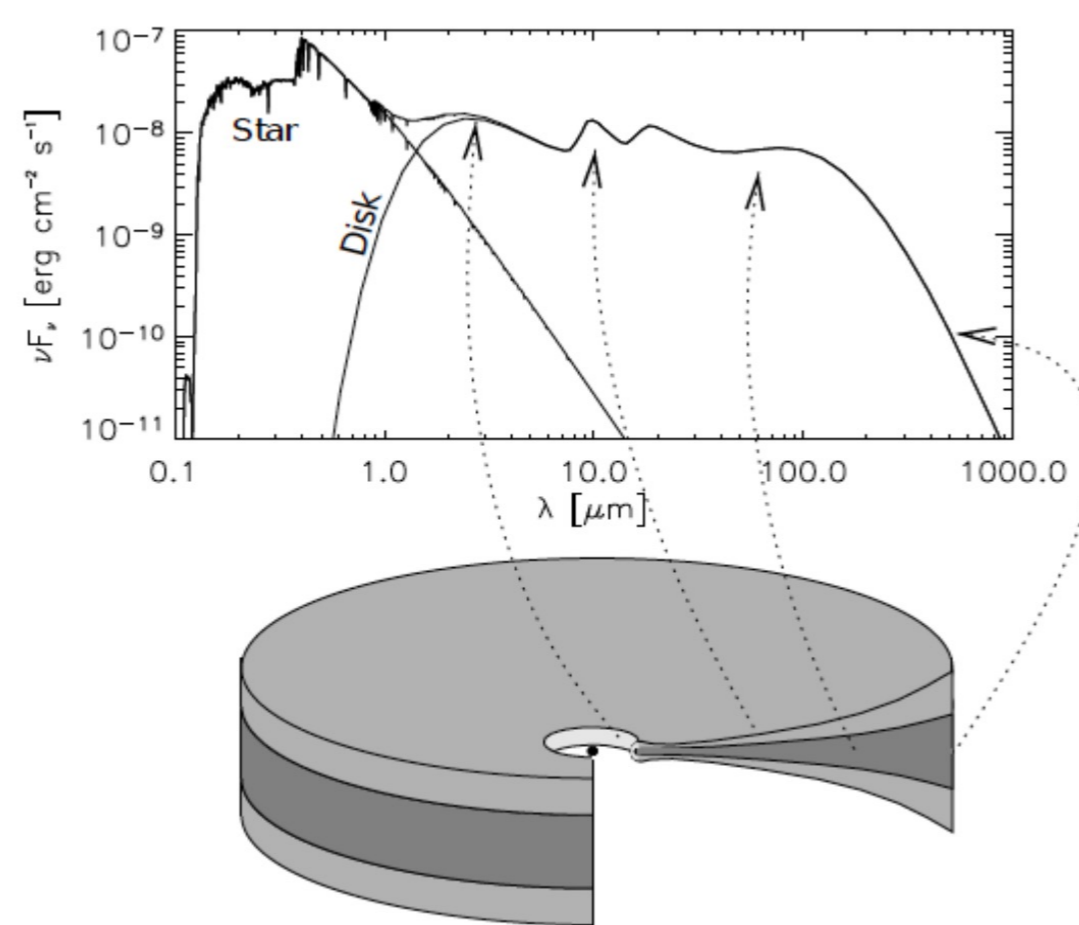


Рис. 1 – Схематическое представление аккреционного диска и его спектрального распределения энергии (SED). На схеме указано приблизительное соответствие участков SED различным частям диска. (Waters, EPJ Web of Conferences, 102, 00003)

Модель

Для расчета структуры диска используется МГД-модель Дудорова и Хайбрахманова [2]. Рассматривается стационарный геометрически тонкий и оптически толстый диск в центробежном и гидростатическом равновесии. В соответствии с моделью Шакуры и Сюняева [3], полагается, что угловой момент переносится турбулентностью. Магнитное поле рассчитывается с учетом омической и амбиполярной диффузии и магнитной плавучести. Учитывается влияние омического нагрева на тепловую структуру диска [4]. Основными параметрами модели являются турбулентный параметр α , который описывает эффективность турбулентности в процессе переноса углового момента, и темп аккреции \dot{M} .

Для расчетов SED используется модель Берту [5], в которой предполагается, что звезда и диск излучают как абсолютно черные тела заданных размеров.

Рассматривается звезда типа Т Тельца спектрального класса K7 с параметрами $M_{\star} = 1M_{\odot}$, $R_{\star} = 2R_{\odot}$, $T = 4000 K$, $L_{\star} = 2L_{\odot}$. Полагается, что молодой звездный объект располагается на расстоянии 140 пк от Земли, плоскость диска перпендикулярна лучу зрения, диск имеет внутренний и внешний радиусы $R_{in} = 0.1$ и $R_{out} = 100$ a.e., соответственно.

Результаты

Рассмотрим две серии численных расчетов: 1) с учетом вязкого нагрева, нагрева излучением звезды и космическими лучами, 2) с дополнительным учетом омического нагрева. В процессе моделирования варьировались параметр турбулентности α и темп аккреции \dot{M} .

При стандартных значениях $\alpha = 0.01$ и $\dot{M} = 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$ решения без учета магнитного поля и с учетом МГД-эффектов совпадают. При данных параметрах скорость МГД-нагрева намного меньше скорости вязкого нагрева, поэтому диссипация токов не дает вклад в тепловую структуру диска.

На рисунках 2а) и 2б) приведены результаты для расчета с параметрами $\alpha = 0.0001$ и $\dot{M} = 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$. Сравнение профилей температур (рис.2а) показывает, что омический нагрев (линия «1») приводит к локальному повышению температуры на ~ 100 K в области от 0.2 до 0.8 а.е. от центра звезды. Рисунок 2б) демонстрирует, что повышение температуры за счет омического нагрева приводит к увеличению потока излучения в области от 20 мкм до 1 мм.

Результаты расчетов с $\alpha = 0.01$ и $\dot{M} = 10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$ приведены на рис. 2с) и 2д). В случае низкого (по сравнению со стандартным) темпа аккреции также наблюдается локальное повышение температуры на 100 K за счет омического нагрева (линия «3») во внутренних областях диска, $r = 0.1 - 0.2$ а.е. Данное повышение температуры приводит к увеличению потока излучения диска в области примерно от 20 мкм до 1 мм.

Сравнение рисунков 2б) и 2д) показывает, что наибольшее отличие в потоках излучения заметно в случае дисков с низким и стандартным темпами аккреции.

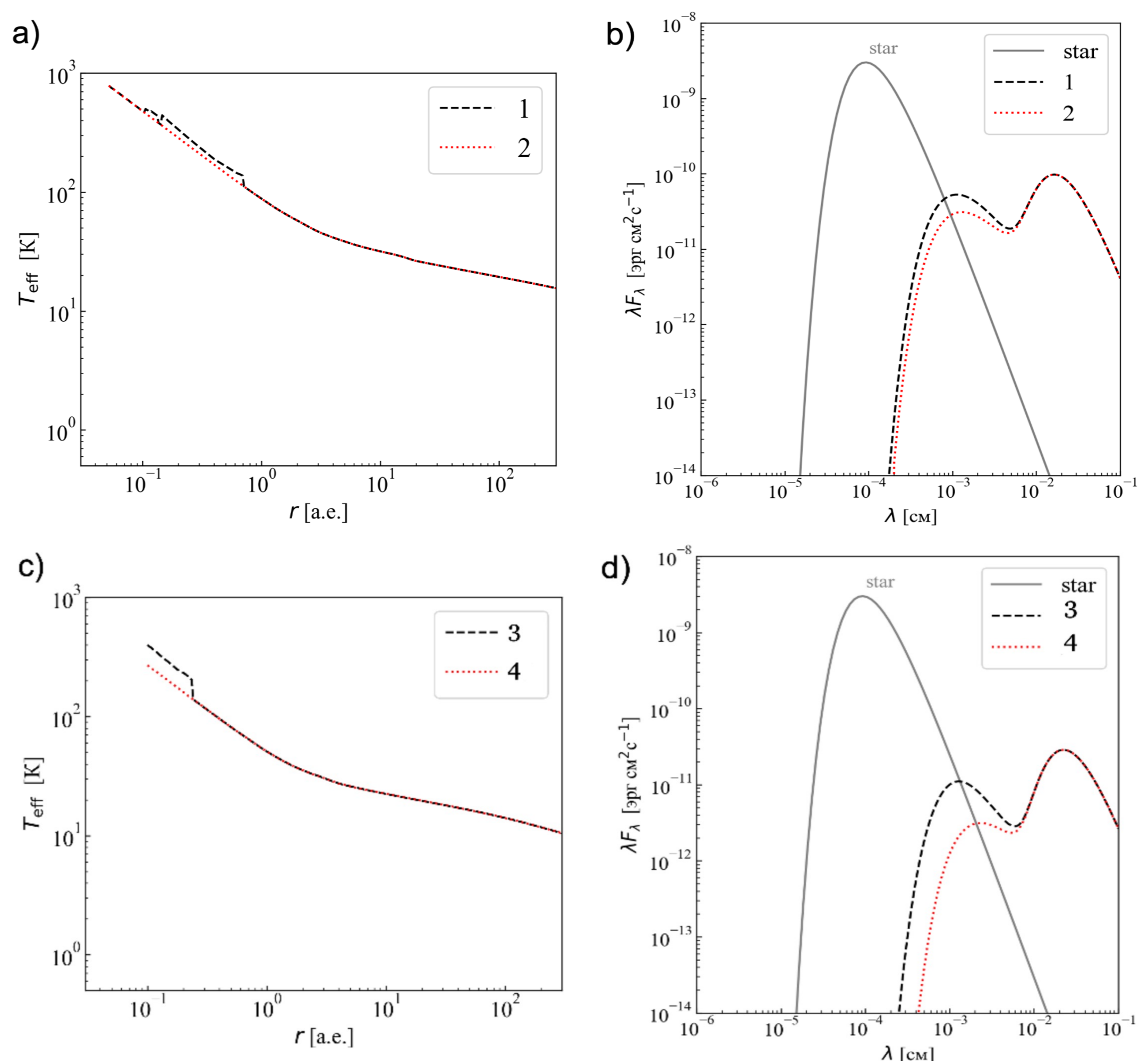


Рис. 2 – Слева: радиальные профили эффективной температуры диска, справа: спектральные распределения энергии звезды и протопланетного диска. Линии, соответствующие решениям с учетом омического нагрева, обозначены цифрами 1 и 3, без его учета – цифрами 2 и 4. Верхняя панель: $\alpha = 0.0001$ и $\dot{M} = 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$. Нижняя панель: $\alpha = 0.01$ и $\dot{M} = 10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$.

Заключение

В работе показано, что омический нагрев влияет на температуру диска и форму его спектра в случае малых значений параметра турбулентности (меньше $\alpha = 0.01$) и темпа аккреции (меньше $\dot{M} = 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$). Такие условия соответствуют звездам с замедлившейся аккрецией, то есть звездам, имеющим большой возраст по сравнению с типичной звездой Т Тельца. Расчеты показывают, что исследование SED объектов с такими характеристиками может быть важным инструментом для анализа влияния МГД-эффектов на их структуру и определения роли остаточного магнитного поля в их эволюции.

- [1] Khaibrakhmanov Sergey A., Magnetic fields of protoplanetary disks // arXiv e-prints. – 2024. — P. arXiv:2401.14180. 2401.14180.
[2] Khaibrakhmanov S., Dudorov A., 2022, Astronomy Reports, v. 66, no 10, p. 872–885.
[3] Shakura N., 1973, Sov. Ast., v. 16, p. 756.
[4] Khaibrakhmanov S., Dudorov A., 2018, Magnetohydrodynamics, p. 65–72,
[5] Bertout C., 1988, The Astrophysical Journal, p. 350–373.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект FEUZ-2020-0038).