

# МАГНИТНОЕ ПОЛЕ АККРЕЦИОННЫХ И ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКОВ

С. А. Хайбрахманов

*Уральский федеральный университет, Челябинский государственный университет*

В работе систематизируются и анализируются наблюдательные данные о магнитных полях аккреционных и протопланетных дисков молодых звезд. Представляется авторская МГД-модель аккреционных дисков с остаточным магнитным полем. С помощью модели показывается, что интенсивность магнитного поля диска уменьшается в процессе его эволюции по мере уменьшения темпа аккреции и укрупнения пылинок. Имеющиеся наблюдательные данные естественным образом объясняются в рамках теории остаточного магнитного поля.

## MAGNETIC FIELD OF ACCRETION AND PROTOPLANETARY DISKS

S. A. Khaibrakhmanov

*Ural Federal University, Chelyabinsk State University*

We compile and analyze observations of the magnetic fields in the accretion and protoplanetary discs of young stars. The author's MHD model of the accretion disk with fossil magnetic field is presented. With the help of the model, we show that the magnetic field strength in the disk decreases during its evolution as the accretion rate decreases and dust grains grow. The existing observation data are naturally explained in the framework of the theory of the fossil magnetic field.

## Введение

Согласно наблюдениям, молодые звезды типа Т Тельца и Ae/Be звезды Хербига окружены аккреционными газопылевыми дисками с характерными размерами 100–1000 а. е. В процессе эволюции диска в течение 1–10 млн лет темп аккреции на звезду уменьшается от  $10^{-7}$  до  $10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$ , и диск рассеивается. Одновременно с этим протекают процессы образования планет, то есть аккреционные диски эволюционируют в протопланетные.

Звезды рождаются в процессе гравитационного коллапса вращающихся магнитных ядер молекулярных облаков. Образование аккреционных дисков молодых звезд обусловлено действием центробежной и электромагнитной сил в процессе коллапса. Эволюция аккреционных дисков определяется эффективностью механизмов переноса углового момента, среди которых основными считаются турбулентные напряжения и натяжения крупномасштабного магнитного поля. Относительная роль этих процессов зависит от интенсивности и геометрии магнитного поля в диске, которые до сих пор мало изучены.

Настоящая работа посвящена систематизации и анализу имеющихся наблюдательных данных об интенсивности магнитного поля аккреционных и протопланетных дисков.

## МГД-модель аккреционных дисков

В рамках теории остаточного магнитного поля Дудоров и Хайбрахманов разработали магнитогазодинамическую (МГД) модель аккреционных дисков с крупномасштабным магнитным полем [1, 2]. В качестве базовой использована модель Шакуры и Сюняева [3], в которой полагается, что основным механизмом перераспределения углового момента является

турбулентность в диске. В дополнение к базовой модели решается уравнение индукции с учетом омической и амбиполярной диффузии, магнитной плавучести [4] и эффекта Холла [5]. Степень ионизации определяется с учетом тепловой ионизации, ударной ионизации космическими и рентгеновскими лучами, а также радиоактивными элементами. Учитываются лучистые рекомбинации и рекомбинации на пылинках.

В случае степенной зависимости степени ионизации от плотности, уравнения модели имеют аналитическое решение (см. [2]). В области замороженности интенсивность магнитного поля пропорциональна поверхностной плотности газа. Для характерного коэффициента поглощения  $\kappa_R = 3 \cdot 10^{-3} T$  [см<sup>2</sup>/г]

$$B_z = 0.29 \text{ Гс} \left( \frac{\alpha}{0.01} \right)^{-3/4} \left( \frac{\dot{M}}{10^{-8} M_\odot / \text{год}} \right)^{1/2} \left( \frac{M}{1 M_\odot} \right)^{1/8} \left( \frac{r}{1 \text{ а. е.}} \right)^{-3/8}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — турбулентный параметр Шакуры и Сюняева;  $\dot{M}$  — темп аккреции. В области эффективной магнитной амбиполярной диффузии

$$B_z = 0.024 \text{ Гс} \left( \frac{\xi}{10^{-17} \text{ с}^{-1}} \cdot \frac{a_d}{0.1 \text{ мкм}} \right)^{1/2} \left( \frac{\alpha}{0.01} \right)^{1/16} \left( \frac{\dot{M}}{10^{-8} M_\odot / \text{год}} \right)^{3/9} \left( \frac{M}{1 M_\odot} \right)^{5/32} \left( \frac{r}{1 \text{ а. е.}} \right)^{-15/32}, \quad (2)$$

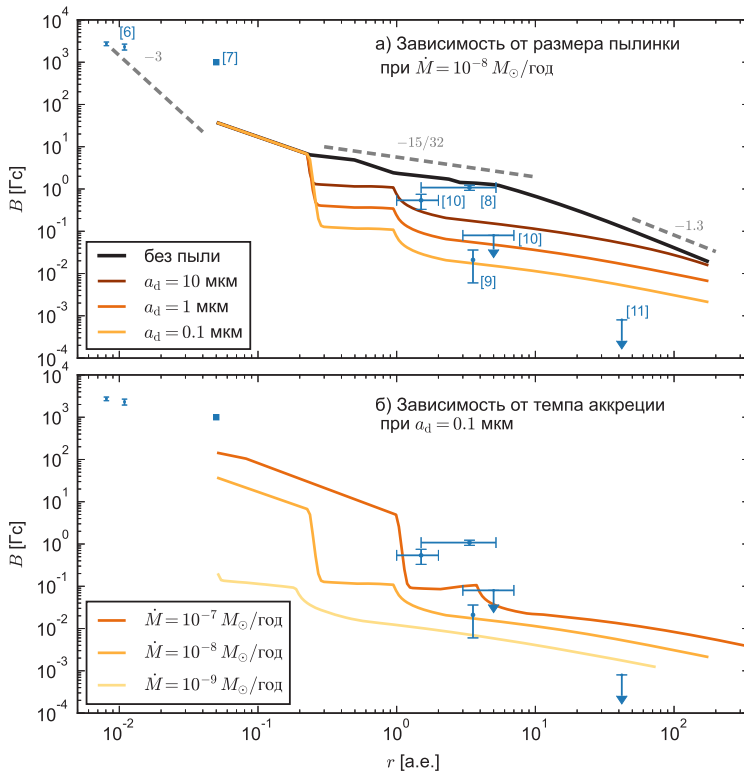
где  $\xi$  — скорость ионизации;  $a_d$  — радиус пылинок. Сравнение решений (1) и (2) показывает, что при типичных параметрах амбиполярная диффузия понижает интенсивность магнитного поля на порядок. Этот эффект имеет место внутри областей низкой степени ионизации — «мертвых» зон.

## Интенсивность магнитного поля в дисках

На рисунке приведены наблюдательные данные о магнитном поле молодых звездных объектов: интенсивность магнитного поля на поверхности звезд типа Т Тельца [6], магнитное поле во внутренней области диска FU Ori [7], данные об остаточной намагниченности метеоритов солнечной системы [8–10], верхняя оценка на интенсивность магнитного поля в атмосфере диска TW Нуа из измерений зеемановского расщепления линий молекул CN [11]. Данные указывают на уменьшение интенсивности магнитного поля с удалением от звезды.

На рисунке изображены также радиальные профили интенсивности остаточного магнитного поля, рассчитанные в рамках модели Дудорова и Хайбрахманова для различных радиусов пылинок и темпов аккреции. Остальные параметры соответствуют типичной звезде Т Тельца солнечной массы (см. [5]). В области тепловой ионизации,  $r = 0.05\text{--}0.2$  а. е., магнитное поле заморожено в газ, и его интенсивность не зависит от радиуса пылинок. В области эффективной амбиполярной диффузии,  $r > 0.2$  а. е., интенсивность магнитного поля увеличивается с радиусом пылинок как  $B \propto a_d^{1/2}$ , в согласии с аналитическим решением (1). В отсутствие пылинок магнитное поле заморожено в газ и его интенсивность в диске максимальна. Согласно рисунку (панель *b*), при уменьшении темпа аккреции форма профиля  $B(r)$  остается неизменной, а сам профиль смещается в сторону звезды. Следовательно, интенсивность магнитного поля на заданном расстоянии  $r$  уменьшается с  $\dot{M}$ .

Сравнение результатов расчетов и наблюдательных данных показывает, что магнитное поле на внутренней границе диска сравнимо с дипольным магнитным полем звезды, интенсивность которого падает с расстоянием как  $B_* \propto r^{-3}$ . Разброс значений остаточной намагниченности метеоритов может свидетельствовать об изменении темпа аккреции и радиуса пылинок в процессе эволюции протосолнечной туманности.



Зависимость индукции магнитного поля от радиального расстояния в аккреционном диске звезды типа Т Тельца солнечной массы, рассчитанная для различных радиусов пылинок (панель а) и темпов аккреции (панель б). Маркеры с барами ошибок указывают наблюдательные данные

## Заключение и обсуждение

Имеющиеся на данный момент наблюдательные данные о магнитных полях аккреционных и протопланетных дисков немногочисленны и являются в основном косвенными. Перспективным инструментом исследований являются измерения зеемановского расщепления линий молекул CN [12].

Наблюдения указывают на то, что интенсивность магнитного поля диска уменьшается с удалением от звезды. Эта зависимость естественным образом объясняется в рамках теории остаточного магнитного поля. Укрупнение пылинок и уменьшение темпа аккреции в процессе эволюции диска приводит к уменьшению интенсивности магнитного поля. Как следствие, эффективность переноса углового момента за счет турбулентности и магнитных

натяжений может меняться.

Необходимо отметить, что в случае крупных пылинок и больших темпов аккреции магнитное поле может быть динамически сильным и влиять на структуру диска [13]. Для детального исследования магнитного потока аккреционных дисков необходимо развитие самосогласованных МГД-моделей дисков с учетом переноса углового момента как турбулентными напряжениями, так и магнитными натяжениями.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2023-0019. Автор благодарит рецензента за полезные замечания.

## Библиографические ссылки

- [1] *Дудоров А. Е., Хайбрахманов С. А.* Кинематическая МГД модель аккреционных дисков молодых звезд. Аналитическое решение // Вестн. Челяб. гос. ун-та. Физика. — 2013. — № 9 (300). — С. 27–39.
- [2] *Dudorov A. E., Khaibrakhmanov S. A.* Fossil magnetic field of accretion disks of young stars // *Ap&SS*. — 2014. — Vol. 352. — P. 103–121. 1403.5513.
- [3] *Шакура Н. И.* Дискковая модель аккреции газа на релятивистскую звезду в тесной двойной системе // *Астрон. журнал*. — 1972. — Т. 49. — С. 921.
- [4] *Khaibrakhmanov S. A., Dudorov A. E.* Magnetic field buoyancy in accretion disks of young stars // *PEPAN Letters*. — 2017. — Vol. 14, № 6. — P. 882–885.
- [5] *Khaibrakhmanov S. A., Dudorov A. E., Parfenov S. Y., Sobolev A. M.* Large-scale magnetic field in the accretion discs of young stars: the influence of magnetic diffusion, buoyancy and Hall effect // *MNRAS*. — 2017. — Vol. 464. — P. 586–598. 1609.03969.
- [6] *Yang Hao, Johns-Krull Christopher M.* Magnetic Field Measurements of T Tauri Stars in the Orion Nebula Cluster // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 729, № 2. — P. 83. 1102.3662.
- [7] *Donati J.-F., Paletou F., Bouvier J., Ferreira J.* Direct detection of a magnetic field in the innermost regions of an accretion disk // *Nature*. — 2005. — Vol. 438. — P. 466–469. astro-ph/0511695.
- [8] *Butler R. F.* Natural remanent magnetization and thermomagnetic properties of the Allende meteorite // *Earth and Planetary Science Letters*. — 1972. — Vol. 17. — P. 120–128.
- [9] *Cournede C., Gattacceca J., Gounelle M. et al.* An early solar system magnetic field recorded in CM chondrites // *Earth and Planetary Science Letters*. — 2015. — Vol. 410. — P. 62–74.
- [10] *Fu R. R., Kehayias P., Weiss B. P. et al.* Weak Magnetic Fields in the Outer Solar Nebula Recorded in CR Chondrites // *Journal of Geophysical Research (Planets)*. — 2020. — Vol. 125, № 5. — P. e06260.
- [11] *Vlemmings W. H. T., Lankhaar B., Cazzoletti P. et al.* Stringent limits on the magnetic field strength in the disc of TW Hya. ALMA observations of CN polarisation // *Astron. Astrophys.* — 2019. — Vol. 624. — P. L7. 1904.01632.
- [12] *Хайбрахманов С. А., Дудоров А. Е., Васюнин А. И., Кискин М. Ю.* Физическая и химическая вертикальная структура магнитостатических аккреционных дисков молодых звезд // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. — 2021. — Т. 48, № 10. — С. 29–36.
- [13] *Хайбрахманов С. А., Дудоров А. Е.* Динамика замагнитченных аккреционных дисков молодых звезд // *Астрон. журнал*. — 2022. — Т. 99, № 10. — С. 832–846.