

АККРЕЦИЯ И МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ЗВЕЗД Ае/Ве ХЕРБИГА

А.Ф.ХОЛТЫГИН¹, О.А.ЦИОПА², Я.А.ДОРОНИНА¹, И.М.ТУМАНОВА²,
Е.Б.РЫСПАЕВА³, О.А.МЕРКУЛОВА¹

Поступила

Принята к печати

Исследования магнитных полей Ае/Ве звезд Хербига (НАеВе) могут помочь в понимании того, как создаются и эволюционируют магнитные поля АВ звезд промежуточных масс. Показано, что магнитные поля и магнитные потоки звезд НАеВе перед их выходом на Главную последовательность значительно меньше, чем у их потомков, звезд АВ Главной последовательности. Чтобы объяснить эту загадку, изучено влияние аккреции на звезды Хербига и на их магнитные поля. Обнаружены свидетельства в пользу предположения, что у магнитных НАеВе звезд с большей скоростью аккреции магнитные поля в среднем меньше. Однако в силу того, что скорости аккреции экспоненциально убывают с возрастом звезды, этот эффект, даже если он будет подтвержден, не может полностью объяснить скачкообразное возрастание магнитных полей и магнитных потоков при выходе НАеВе звезд на Главную последовательность.

Ключевые слова: *звезды; магнитное поле - звезды; Ае/Ве звезды Хербига; аккреция*

1. Введение. Происхождение магнитных полей у звезд ранних спектральных классов до сих пор остается загадочным. Обычно считается, что магнитные поля могут быть либо реликтовыми, либо они могут генерироваться при слиянии звезд перед их выходом на Главную последовательность (ГП) [1]. Изучение магнитных полей Ае/Ве звезд Хербига (НАеВе), находящихся на стадии эволюции до ГП, может пролить свет на происхождение и эволюцию магнитных полей их потомков, АВ звезд ГП.

В статье [2] было уже показано, что средние магнитные поля и магнитные потоки НАеВе звезд существенно ниже, чем соответствующие значения у их потомков, АВ звезд ГП. Недавнее исследование [3] показало, что магнитные поля звезд Хербига слабо возрастают с возрастом, тогда как соответствующие магнитные потоки убывают, достигая минимального значения непосредственно перед выходом на ГП. Удивительным фактом явилось то, что магнитные потоки звезд промежуточных масс с обнаружимыми магнитными полями на ГП возрастают на порядок после выхода звезды на ГП.

В работе [4] показано, что скорость аккреции на звезды Хербига зависит от величины их магнитного поля. Тем самым можно предположить, что

скорость аккреции на НАеВе звезду в существенной мере определяет величину ее магнитного поля. В настоящей работе исследуется влияние аккреции на величину магнитных полей звезд Ae/Be Хербига.

Статья организована следующим образом. Источники сведений о магнитных полях и других характеристиках звезд Хербига описаны в разделе 2. В разделе 3 исследуется зависимость скорости аккреции от возраста звезды Хербига. Обсуждение полученных результатов представлено в разделе 4. Некоторые выводы даны в заключении к работе.

2. Средние значения магнитных полей и масс звезд Хербига. Обзор данных измерений магнитных полей НАеВе звезд сделан недавно в работе [3]. Дополнительно к данным, используемым в настоящей работе, добавлены недавние измерения магнитных полей в работах [6,7], вышедших после опубликования статьи [3]. В качестве наиболее подходящей характеристики магнитного поля звезды будем использовать, как и в работе [3], среднеквадратичное магнитное поле, определенное Borra et al. [5]:

$$\mathcal{B} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (B_z^j)^2}, \quad (1)$$

где суммируются квадраты всех измеренных продольных магнитных полей B_z^j для данной звезды. Здесь j - номер наблюдения, а n - их общее число.

Аналогично подходу, используемому в статье [3], разделим все Ae/Be звезды Хербига на 4 группы. К первой группе DD (Definite Detection) отнесем одиночные звезды, у которых по крайней мере для одного измерения поля с номером j абсолютное значение измеренного магнитного поля $|B_z^j|$ в 3 раза больше ошибки его измерения σ_j . Двойные звезды, для НАеВе компонентов которых выполняется это условие, отнесем к группе BS (Binary Stars). Третью группу MD (Marginal Detection) составляют звезды, для которых хотя бы для одного измерения с номером j магнитного поля выполняется условие $|B_z^j|/\sigma_j > 2$.

Все остальные звезды отнесем к группе ND (No Detections). К этой большой (свыше 200) группе звезд относятся как звезды, у которых магнитное поле измерялось, но не было зарегистрировано, так и звезды, магнитное поле которых еще не было измерено.

Во 2 и 3 столбцах табл.1 даны средние значения магнитных полей $\overline{\log(\mathcal{B})}$ для указанных групп звезд и соответствующие стандартные отклонения $\log(\sigma_{\mathcal{B}})$. Представленные в таблице значения $\overline{\log(\mathcal{B})}$ и $\log(\sigma_{\mathcal{B}})$ слегка отличаются от приведенных в статье [3] вследствие добавления новых измерений магнитных полей. Для сравнения в последней строке таблицы даны характеристики функции распределения магнитных полей магнитных АВ звезд ГП, взятые из статьи [3].

Отметим также, что ввиду сложной конфигурации магнитных полей Ae/Be звезд Хербига и возможным значительным вкладам локальных магнитных полей, реальное магнитное поле может отличаться от получаемого усреднением нескольких измерений по формуле (1) ввиду компенсации вкладов магнитных полей магнитных силовых трубок разного знака.

В работе Vioque et al. [9] дана обширная сводка определений масс звезд Хербига. Средние значения масс и соответствующих стандартных отклонений для указанных выше групп звезд Хербига приведены в двух последних столбцах табл.1.

Таблица 1

СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, МАСС И ИХ СТАНДАРТНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГРУПП НАЕВЕ ЗВЕЗД

Группа звезд	$\overline{\log(B)}$	$\sigma_{\log(B)}$	$\overline{M/M_{\odot}}$	$\sigma_{M/M_{\odot}}$
DD	1.96	0.30	2.54	1.27
BS	2.00	0.33	2.51	1.17
MD	1.91	0.31	2.47	0.72
NM	-	-	3.78	3.14
AB	2.53	0.54	-	-

3. *Влияние аккреции на магнитные поля звезд Хербига.* Скорости аккреции на звезды Хербига определены в недавней работе [8]. В статье [9] представлены возраста t звезд Хербига с использованием уточненных расстояний до звезд, определенных из анализа данных второго релиза DR2 спутника Gaia. Для определения значений t использованы треки модели эволюции [10] звезд различного химического состава на стадии эволюции до ГП. Нуль-пункт данной модели соответствует положению звезды на треке Хаяши с центральной температурой звезды в центре звезды $T_c = 10^5$ K.

Использование значений t позволяет изучить зависимость характеристик Ae/Be звезд Хербига от времени. Скорость эволюции звезд Хербига сильно зависит от их начальных масс, поэтому удобнее использовать вместо абсолютного относительный возраст звезды $\tau_{\text{rel}} = t/\tau_{\text{PMS}}$, где τ_{PMS} - полное время жизни звезды на стадии до ГП.

Так как химический состав звезд Хербига близок к солнечному, то следует использовать значения τ_{PMS} , полученные в модели [10] для солнечного значения $Z = 0.017$. Зависимость полного времени жизни звезды Хербига от ее массы M в модели [10] для данного значения Z можно представить таким образом:

$$\log(\tau_{\text{PMS}}) = 7.66 - 2.27q - 1.02q^2 + 0.90q^3, \quad (2)$$

где $q = \log(M/M_{\odot})$. Параметры зависимости (2) уточнены по сравнению с данными в работе [3]. Необходимые для расчета величин τ_{PMS} массы звезд Хербига взяты из работы [9].

На рис.1 показана зависимость скоростей аккреции $\dot{M}$ на звезды Хербига от относительного возраста звезды. Видно, что максимальные значения величин $\dot{M}$ соответствуют самым молодым звездам.

Из рисунка видно, что скорости аккреции убывают с увеличением относительного возраста звезды. При исключении из выборки звезд со скоростями аккреции $\log \dot{M} < -6.5$, имеющими низкую точность, зависимость скоростей аккреции от относительного возраста звезд Хербига можно аппроксимировать следующей формулой:

$$\log(\dot{M}) = -3.65 \pm 0.21 - (3.41 \pm 0.37)\tau_{\text{rel}}. \quad (3)$$

Эта зависимость показана пунктирной линией на рис.1.

Рассмотрим влияние аккреции на магнитные поля звезд Хербига. При большой скорости аккреции силовые линии магнитного поля могут стать ближе к фотосфере звезды по сравнению с аналогичной звездой с низкой скоростью аккреции. Это может привести к тому, что звезды с одинаковой величиной магнитного поля, но с разным темпом аккреции могут иметь различные величины измеряемого магнитного поля.

Чтобы проверить это предположение мы проанализировали зависимость величины среднеквадратичного магнитного поля звезд от скорости аккреции. Указанная зависимость представлена на рис.2. Для одиночных магнитных

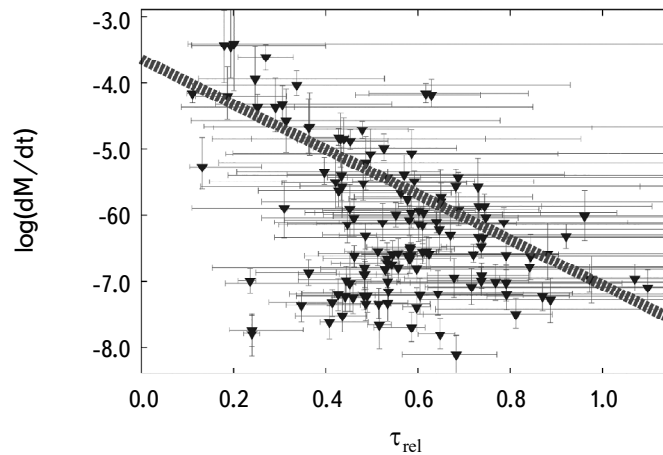


Рис.1. Зависимости скоростей аккреции на звезды Хербига от возраста звезды. Пунктирной линией показана линейная аппроксимация этой зависимости.

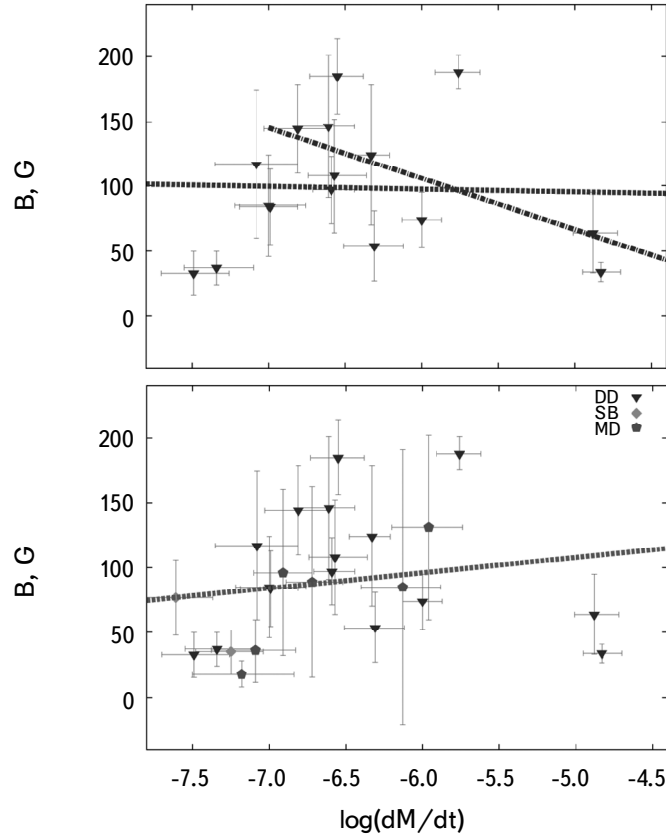


Рис.2. Слева: зависимость среднеквадратичного магнитного поля звезд Хербига от скоростей аккреции для группы звезд DD. Пунктирной линией показана ее линейная аппроксимация, штрих-пунктирной - линейная аппроксимация для значений $\log M > -7.0$. Справа: то же, что на левом рисунке, но для группы DD+BS+MD. Пунктирная линия - линейная аппроксимация данной зависимости.

звезд Хербига группы DD (рис.2, слева) зависимость среднеквадратичных магнитных полей от скоростей аккреции незначима (коэффициент корреляции $R = -0.03$).

В то же время, если ограничиться только звездами со скоростью аккреции $\log \dot{M} > -7.0$, то зависимость между скоростями аккреции и среднеквадратичными магнитными полями, показанная штрих-пунктирной кривой, становится лучше выраженной. Видно, что у звезд с большей скоростью аккреции магнитные поля в среднем меньше. В то же время коэффициент корреляции между этими величинами $R = -0.5$ с уровнем значимости $\alpha = 0.15$, что не позволяет сделать достаточно надежный вывод об уменьшении магнитного поля с ростом скорости аккреции.

Если же добавить к одиночным магнитным звездам Хербига магнитные

НАеВе звезды в двойных системах и звезды с маргинально определенными магнитными полями групп DD и MD (рис.2, справа), то зависимость среднеквадратичных магнитных полей от скорости аккреции меняется на обратную. Впрочем, учитывая, что в данном случае коэффициент корреляции $R=0.18$ и уровень значимости $\alpha=0.40$, то следует, что эта зависимость также является незначимой.

4. *Обсуждение результатов.* Резюмируя, можно сделать вывод, что имеющих на настоящее время данных о магнитных полях НАеВе звезд и соответствующих скоростях аккреции недостаточно для того, чтобы сделать сколь-либо определенный вывод об их корреляции. В то же время, даже если такая зависимость будет установлена, она не сможет в полной мере объяснить скачок величины магнитных полей НАеВе звезд при их выходе на ГП, так как у звезд Хербига скорости аккреции непосредственно перед выходом на ГП минимальны.

По этой причине важно обсудить другие возможные причины такого феномена. Одним из возможных механизмов формирования звездных магнитных полей является, как отмечено во *Введении*, слияние протозвезд перед их выходом на ГП и генерация магнитного поля при этом процессе динамо-механизмом [1].

Очевидно, что в этом случае массы одиночных магнитных звезд будут существенно выше масс немагнитных звезд, как установлено, например, для одиночных магнитных белых карликов [12]. По этой причине следует выяснить, выполняется ли это соотношение для НАеВе звезд. Средние массы различных групп звезд Хербига даны в пятом столбце табл.1. Анализ этих данных показывает, что средние массы немагнитных НАеВе звезд значимо выше средних масс различных групп звезд Хербига. Тем самым можно сделать вывод, что гипотеза [1] генерации звездных магнитных полей вряд ли справедлива для звезд Хербига.

Пролить свет на загадку генерации магнитных полей звезд Хербига могло бы их исследование не только в оптическом, но и в других диапазонах спектра. Недавний анализ архивных рентгеновских спектров восьми звезд Хербига, полученных на спутнике XMM [11], показал, что 2 звезды из этой выборки, а именно HD104237 и HD144668, у которых было измерено магнитное поле, характеризуются наиболее жесткими рентгеновскими спектрами.

Жесткости их спектров, определяемые как отношение рентгеновских потоков в интервалах энергий 2 - 8 кэВ и 0.2 - 2 кэВ, составляют 0.75 и 0.71, соответственно, что существенно выше, чем у звезд Хербига, у которых магнитное поле не обнаружено. Столь высокие значения жесткости спектров возможно

свидетельствуют о присутствии дополнительного источника нетеплового рентгеновского излучения, связанного, возможно, с локальными магнитными полями НАеВе звезд.

Подводя итоги нашего исследования магнитных полей звезд Хербига, можно высказать предположение, что именно во время выхода НАеВе звезды на ГП во время загорания водорода в ядре звезды происходит перестройка распределения зарядов в звезде, приводящая к усилению начального магнитного поля звезды, включающего как глобальное магнитное поле, так и локальные магнитные поля.

Для проверки этого предположения было бы важно исследовать свойства звезд Хербига непосредственно перед выходом на ГП и во время этого процесса.

5. Заключение. В настоящей работе выполнен анализ зависимости среднеквадратичного магнитного поля звезд Хербига от скоростей аккреции на звезду. В результате анализа можно сделать следующие выводы:

- Скорости аккреции на Ае/Ве звезды Хербига экспоненциально убывают с увеличением возраста звезды.
- Магнитные НАеВе звезды с большими скоростями аккреции возможно обладают в среднем меньшими магнитными полями.

Настоящее исследование поддержано грантом Российского научного фонда 18-02-00554.

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, С.-Петербург, Россия, e-mail: afkholygin@gmail.com

² Главная (Пулковская) Астрономическая обсерватория, Россия

³ Крымская астрофизическая обсерватория, Россия

ACCRETION AND MAGNETIC FIELDS OF Ae/Be HERBIG STARS

A.F.KHOLTYGIN¹, O.A.TSIOPA², Ya.A.DORONINA¹, I.M.TUMANOVA²,
E.B.RYSPAeva³, O.A.MERKULOVA¹

Studies of magnetic fields in Herbig Ae/Be (HAeBe) stars can help us to improve our understanding how the magnetic fields of these stars are generated and evolve. As recently shown by Kholtygin et al. (2019) the magnetic fields and

magnetic fluxes of HAeBe stars just before the main sequence are significantly smaller than those for main sequence AB stars, the descendants of Ae/Be Herbig stars. To explain this enigma we study the impact of accretion onto Herbig star on their magnetic fields. It appears that the role of the accretion is not enough strong to explain this enigma.

Keywords: *stars: magnetic field - stars: Ae/Be Herbig stars: accretion*

ЛИТЕРАТУРА

1. *L.Ferrario, J.E.Pringle, C.A.Tout et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **400**, L71, 2009.
2. *A.F.Kholtygin, A.S.Akhnevsky, O.A.Tsiopa*, ASP Conf. Ser., **518**, 83, 2019.
3. *A.F.Kholtygin, O.A.Tsiopa, E.I.Makarenko et al.*, Astrophys. Bull., **74**, 293, 2019.
4. *A.Kholtygin, O.Tsiopa, E.Makarenko et al.*, AJ Azerbaijan, 15, (in press), 2020.
5. *E.F.Borra, J.D.Landstreet, I.Thompson*, Astrophys. J. Suppl., **151**, 5, 1983.
6. *S.Jarvinen, T.A.Carroll, S.Hubrig et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **486**, 5499, 2019.
7. *S.Jarvinen, T.A.Carroll, S.Hubrig et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **489**, 886, 2019.
8. *C.Wichittanakom, R.D.Oudmaijer, J.R.Fairlamb et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **493**, 234, 2020.
9. *M.Vioque, R.D.Oudmaijer, D.Baines et al.*, Astron. Astrophys., **620**, A128, 2018.
10. *A.Bressan, P.Marigo, L.Girardi et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **427**, 127, 2012.
11. *E.Ryspaeva, A.Kholtygin*, (готовится к печати), 2020.
12. *L.Ferrario, D.T.Wickramasinghe*, Adv. Space Res., **66**, 1025, 2020.