

УДК 524.338.5-337

ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ АЕ/ВЕ-ЗВЕЗД ХЕРБИГА

© 2019 А. Ф. Холтыгин^{1*}, О. А. Циопа², Е. И. Макаренко¹, И. М. Туманова¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504 Россия

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 25 марта 2018 года; после доработки 8 июля 2019 года; принята к публикации 8 июля 2019 года

Проанализированы измерения магнитного поля звезд Ae/Ве Хербига. Получены функции распределения значений среднеквадратичных магнитных полей \mathcal{B} (в Гс) и магнитных потоков Φ (в Гс см²) для звезд Хербига с измеренными магнитными полями. Распределения значений \mathcal{B} и Φ аппроксимированы логарифм-нормальной функцией со средними значениями $\langle \lg \mathcal{B} \rangle = 2.0$ и $\langle \lg \Phi \rangle = 25.5$ с ширинами $\lg(\sigma_{\mathcal{B}}) = 0.3$ dex и $\lg(\sigma_{\Phi}) = 0.4$ dex соответственно. Полученные значения ширин распределения близки к типичным для АВ-звезд главной последовательности (ГП), в то время как средние значения логарифмов магнитных полей и магнитных потоков оказались значительно (до порядка величины) меньшими, чем соответствующие значения для звезд начальной ГП (соответственно 2.5 и 26.4). Обсуждаются причины этих различий и эволюция магнитных полей звезд промежуточных масс до ГП.

Ключевые слова: *звезды: магнитное поле — звезды: Ae/Ве-звезды Хербига — звезды: статистика*

1. ВВЕДЕНИЕ

Ae/Ве-звезды Хербига являются звездами промежуточных масс (2–10 M_{\odot}), находящимися на стадии эволюции до главной последовательности.

Происхождение магнитных полей у звезд раннего типа на ГП до сих пор остается загадкой. Многие авторы утверждают, что магнитные поля могут быть либо реликтовыми, либо они могут генерироваться при слиянии звезд перед их выходом на ГП [1]. Чтобы пролить свет на происхождение и эволюцию магнитных полей звезд ранних спектральных классов важно изучить магнитные поля Ae/Ве-звезд Хербига (НАЕВЕ), находящихся на стадии эволюции до ГП.

Среди АВ-звезд на ГП доля тех, у которых обнаружено магнитное поле, в больших выборках проектов MIMES и BOB составляет 5–7% [2, 3]. В дальнейшем те звезды, у которых измерено магнитное поле, будем называть магнитными. К магнитным АВ-звездам относятся главным образом химически пекулярные Ар- и Вр-звезды.

Доля магнитных звезд среди Ae/Ве-звезд Хербига равна по разным оценкам 6–7% [4–6] и близка к соответствующей величине для АВ-звезд на ГП. Все остальные звезды Хербига, для которых были выполнены измерения магнитного поля, но магнитное поле не было обнаружено, будем считать

немагнитными. Более подробная классификация как магнитных, так и немагнитных НАЕВЕ-звезд дана в разделе 2.

В статье [7] было уже показано, что средние магнитные поля и магнитные потоки НАЕВЕ-звезд с обнаруженными магнитными полями существенно ниже, чем соответствующие значения у их потомков — магнитных АВ-звезд ГП. В настоящей работе уточняется этот вывод с использованием новых измерений магнитных полей и исследуется, как меняются эти величины в ходе эволюции звезд Хербига.

Настоящая статья организована следующим образом. Источники сведений о магнитных полях и других характеристиках звезд Хербига описаны в разделе 2. В этом же разделе рассчитаны статистические характеристики их магнитных полей. В разделе 3 определены функции распределения магнитных полей и магнитных потоков звезд Хербига. Эволюция магнитных полей и магнитных потоков звезд Хербига рассмотрена в разделе 4. Некоторые выводы представлены в Заключение.

2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЗВЕЗД НАЕВЕ

В результате поляризационных наблюдений звезд может быть определен продольный компонент B_z магнитного поля звезды, также называемый эффективным магнитным полем. К

*E-mail: afkholtygin@gmail.com

настоящему времени проведены поляризационные наблюдения свыше 80 НАЕВЕ-звезд.

Величина эффективного магнитного поля зависит от фазы вращения звезды и меняется в широких пределах от некоторого минимального значения B_{\min} до максимального значения B_{\max} , причем эти величины часто имеют различные знаки. Это означает, что величина B_z непригодна для выполнения статистических исследований магнитного поля большого ансамбля звезд. По этой причине необходимо использовать такую глобальную характеристику поля, которая может быть получена из наблюдений и при этом не подвержена сильным вариациям в зависимости от того, при каких значениях фаз вращения были выполнены измерения поля.

В качестве наиболее подходящей характеристики магнитного поля звезды, слабо зависящей от того, когда именно были выполнены наблюдения, используется определенное Vogra et al. [8] среднеквадратичное магнитное поле (root mean square, rms)

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

где суммируются квадраты всех измеренных значений средних продольных магнитных полей B_z^j для данной звезды. Здесь j — номер наблюдения, а n — их общее число. В работе [9] было показано, что для дипольной конфигурации магнитного поля величина B слабо зависит от фазы вращения звезды ϕ , угла наклона оси вращения i и угла β между осью вращения и осью магнитного диполя. Этот вывод также справедлив для квадрупольных и других конфигураций магнитного поля.

В статье [8] введены также следующие параметры, определяющие точность измерения магнитного поля:

$$\Sigma_B = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sigma_j^2}, \quad (2)$$

где σ_j — среднеквадратичная ошибка j -го измерения поля, и

$$\chi^2/n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{B_z^j}{\sigma_j}\right)^2}. \quad (3)$$

Чем больше отношение B/Σ_B и величина χ^2/n , тем более реалистичны измерения магнитного поля. В практических целях можно использовать следующий критерий [10]:

$$\begin{cases} B > 2\Sigma_B, \\ \chi^2/n > 1. \end{cases} \quad (4)$$

При числе измерений поля $n > 3$ этот критерий эквивалентен условию, что абсолютное значение измеренного магнитного поля $|B_z^j|$ в три раза больше, чем ошибка σ_j , по крайней мере, для одного измерения поля с номером j .

При использовании данных из разных работ может возникнуть ситуация, когда ошибки измерений величины B_z сильно различаются, при этом применение формул (1) и (2) может привести к большим ошибкам в величине B . В этом случае следует заменить эти соотношения на следующие:

$$B = \left(\sum_{j=1}^n g_i (B_z^j)^2 / \sum_{j=1}^n g_i \right)^{1/2} \quad (5)$$

и

$$\Sigma_B = \left(\sum_{j=1}^n g_i \right)^{-1/2} = \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_j^2} \right)^{-1/2}. \quad (6)$$

Здесь для статистических весов j -го измерения использовано стандартное выражение $g_i = 1/\sigma_i^2$ (см., например, [11]).

Все Ae/Be-звезды Хербига, для которых проводились измерения магнитных полей, можно разделить на четыре группы.

К первой группе DDSS (Definite Detection Single Star) отнесем одиночные звезды, для измерений магнитного поля которых выполняется условие (4).

Двойные звезды, для которых выполняется условие (4), составляют группу DDBS (Definite Detection Binary Stars). Все НАЕВЕ-звезды из групп DDSS и DDBS будем считать магнитными звездами (см. таблицу 1).

Третью группу MD (Marginal Detection) составляют звезды, у которых хотя бы для одного измерения магнитного поля выполняется условие $|B_z^k|/\sigma_k > 2$, где k — номер измерения.

Все остальные звезды, для которых были выполнены измерения магнитного поля, однако для всех измерений оказалось, что $|B_z^k|/\sigma_k < 2$, отнесем к группе ND (No Detections).

Звезды групп MD и ND, согласно введенной выше терминологии, относятся к немагнитным звездам.

Отметим, однако, что название «немагнитные звезды» в значительной мере условно. Недавние прецизионные измерения магнитных полей (например, [31] и ссылки в данной работе) показали, что у ряда AB-звезд, считавшихся ранее немагнитными, обнаружены слабые магнитные поля с магнитной индукцией порядка 1–10 Гс.

Таблица 1. Параметры магнитных полей Ае/Ве-звезд Хербига

HD	Object	Sp.type	\mathcal{B} , G	$\sigma_{\mathcal{B}}$, G	χ^2/n	$\mathcal{B}/\Sigma_{\mathcal{B}}$	R_* , R_{\odot}	lg Φ	Ref.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
—	BF Ori	A7III	144	34	17.7	4.21	3.50	26.03	[12, 13]
31648	MWC 480	A5Vep	108	44	6.1	2.47	2.11	25.47	[12–16]
35929	—	F2IV/V	54	27	4.0	2.01	5.33	25.97	[12, 13]
36112	PDS 183	A8Ve	85	39	4.8	2.20	1.91	25.28	[12, 13, 17]
36982	LP Ori	B1.5Vp	222	65	7.9	3.43	2.16	25.80	[12, 13, 16, 17]
58647	—	B9IV	218	69	10.0	3.16	5.01	26.52	[18]
95881	—	A0	64	31	4.2	2.06	8.86	26.48	[13, 19, 20]
97048	CU Cha	A0Vep	124	54	5.2	2.30	1.79	25.38	[13, 19, 21]
98922	—	B9Ve	120	48	3.3	2.52	9.91	26.86	[12, 13, 18]
100546	PDS 340	B9Vne	97	26	5.0	2.54	1.70	25.23	[13, 19]
101412	PDS 57	B9/A0V	185	29	32.6	6.42	2.16	25.72	[13, 19, 21–23]
104237	DX Cha	A0_sh	63	23	30.6	2.67	2.40	25.34	[13, 18, 24–26]
139614	PDS 395	F0V	52	17	6.5	3.07	1.35	24.76	[12–15, 27, 28]
144432	PDS 78	A9/F0V	84	29	6.4	2.94	1.81	25.22	[12, 14, 15, 17, 19, 27, 28]
144668	HR 5999	A7	74	21	29.3	7.12	3.33	25.70	[12–15, 19]
150193	V2307 Oph	B9.5Ve	146	55	7.0	2.65	1.98	25.54	[12, 19, 21]
176386	—	B9V	117	57	4.0	2.01	1.79	25.36	[12, 19, 21]
190073	V1295 Aql	A2IVe	68	17	11.4	4.01	4.46	25.92	[12, 13, 15, 17–19, 28, 29]
—	PDS 2	F3Ve	37	13	7.7	2.83	1.82	24.87	[13, 19, 28, 30]
—	VV Ser	A5Ve	318	126	5.3	2.30	1.65	25.72	[12, 19]

Эти звезды могут быть предшественниками АВ-звезд главной последовательности, у которых заметное магнитное поле не обнаружено. Такие звезды названы в работе [32] слабомагнитными. Слабомагнитные ОБА-звезды могут быть родителями слабомагнитных белых карликов и нормальных пульсаров.

Результаты определения описанных выше характеристик магнитного поля звезд группы DDSS представлены в таблице 1. В первых двух колонках таблицы даны HD-номер и имя звезды, в третьей колонке приведен спектральный тип звезды. Рассчитанные по формулам (5), (6) и (3) средние магнитные поля, величины $\sigma_{\mathcal{B}}$ и χ^2/n и отношение $\mathcal{B}/\sigma_{\mathcal{B}}$ даны в колонках (4)–(7) соответственно. В колонке (8) указаны радиусы звезд R_* , которые были вычислены из стандартного соотношения

$$R_* = \sqrt{\frac{L_*}{4\pi\sigma T_{\text{eff}}^4}}, \quad (7)$$

где L_* — светимость звезды, σ — постоянная Стефана–Больцмана, T_{eff} — эффективная темпе-

ратура звезды. Значения L_* и T_{eff} для звезд в таблице 1 взяты из статьи [33].

Рассчитанные радиусы звезд использовались для оценки магнитных потоков по формуле (см. обсуждение выбора такого приближения для магнитных потоков в статье [34])

$$\Phi = 4\pi R_*^2 \mathcal{B} \quad (8)$$

и приведены в девятой колонке таблицы. В последней колонке даны ссылки на источники измерений магнитных полей Ае/Ве-звезд Хербига.

В настоящее время число известных и предполагаемых Ае/Ве-звезд Хербига составляет 123¹. Измерения магнитного поля выполнены для свыше 80 из них, то есть для большинства известных звезд Хербига. Следовательно, результаты выполненного нами выделения различных типов НАЕВЕ-звезд статистически значимы.

В таблице 1 собраны ссылки на все имеющиеся к настоящему времени измерения магнитного

¹<http://www.eso.org/~mvandena/haebetab1.html>

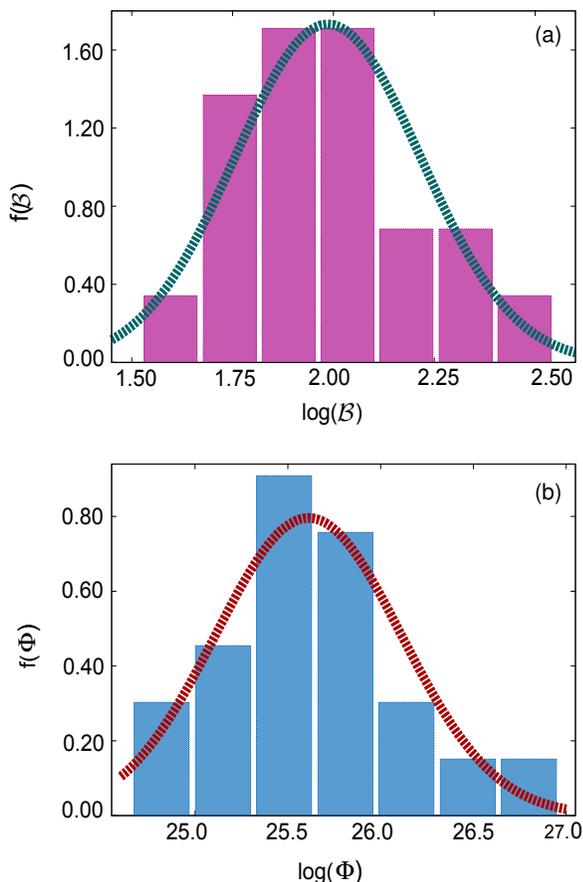


Рис. 1. Функции распределения среднеквадратичных магнитных полей (а) и магнитных потоков (б) для звезд Хербига группы DD с надежно определенными магнитными полями. Прерывистые линии — их аппроксимации логарифм-нормальным распределением.

поля Ae/Be-звезд Хербига. Из 84 НАЕВЕ-звезд, для которых такие измерения выполнены, у 20 представленных в таблице 1 магнитные поля были обнаружены. Таким образом, можно сделать вывод о том, что более 20% звезд Хербига являются магнитными.

3. ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НАЕВЕ-ЗВЕЗД

Дифференциальная функция распределения магнитного поля может быть найдена из следующего соотношения:

$$f(B) \approx \frac{N(B, B + \Delta B)}{N \times \Delta B}, \quad (9)$$

где $N(B, B + \Delta B)$ — число звезд в интервале среднеквадратичных магнитных полей $(B, B + \Delta B)$, N — полное число звезд с измеренным магнитным полем.

Таблица 2. Средние значения магнитных полей и магнитных потоков и их стандартных отклонений для различных групп НАЕВЕ-звезд

Star group	$\langle \lg(B) \rangle$	$\lg(\sigma_B)$	$\langle \lg(\Phi) \rangle$	$\lg(\sigma_\Phi)$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
DDSS	2.00	0.27	25.53	0.37
DDBS	2.10	0.38	25.78	0.73
MD	1.91	0.31	25.59	0.52
AB (ГП)	2.53	0.54	26.42	0.70
AB (M_0)	—	—	26.42	0.50
AB (M_1)	—	—	26.83	0.35

Определенная нами функция $f(B)$ для звезд НАЕВЕ группы DDSS с измеренными магнитными полями представлена на рис. 1а и может быть описана логарифм-нормальным законом. Обозначим $x = \lg(B)$, тогда

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma_x} \right)^2}. \quad (10)$$

Средние значения величин $\langle \lg(B) \rangle$ и соответствующих стандартных отклонений $\lg(\sigma_B)$ для групп звезд DDSS, DDBS и MD даны в колонках (2)–(3) таблицы 2. Средние значения $\langle \lg(B) \rangle$ для группы звезд MD оказались на 0.09 dex меньше, чем для группы DD.

Около половины НАЕВЕ-звезд являются двойными или кратными системами. Во многих случаях в двойных системах с компонентами НАЕВЕ обнаруженное магнитное поле относится не к НАЕВЕ-компонентам. В ряде случаев не удалось определить, какой из компонентов системы является магнитной звездой. К настоящему времени только для пяти звезд с НАЕВЕ-компонентами — HD 135344B, HD 152404, HD 200775, XY Per и V380 Ori — можно говорить, что НАЕВЕ-компонент является магнитной звездой. В силу крайней малости выборки группы двойных НАЕВЕ-звезд с измеренными магнитными полями значения $\langle \lg(B) \rangle$ и $\lg(\sigma_B)$, приведенные в таблице 2 для группы DDBS, очень неопределенны.

В четвертой строке таблицы 2 указаны среднее значение $\langle \lg(B) \rangle$ и соответствующее стандартное отклонение $\lg(\sigma_B)$ для AB-звезд на главной последовательности. Значение $\langle \lg(B) \rangle$ для AB-звезд более чем в три раза превосходит соответствующее среднее значение для НАЕВЕ-звезд.

4. ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ ЗВЕЗД ХЕРБИГА

В работе [33] определены времена жизни t звезд Хербига с использованием расстояний до звезд, уточненных при анализе данных второго релиза DR2 спутника Gaia. Для определения значений t взяты эволюционные треки [35] для звезд различного химического состава на стадии эволюции до ГП. Нуль-пункт модели [35] соответствует положению звезды на треке Хаяши с центральной температурой звезды в центре звезды $T_c = 10^5$ К.

Использование новых значений t позволяет изучить зависимость параметров Ае/Ве-звезд Хербига от времени. Скорость эволюции звезд Хербига сильно зависит от их начальных масс, поэтому удобнее исследовать зависимость параметров от относительного возраста звезды $\tau_{\text{rel}} = t/\tau_{\text{PMs}}$, где τ_{PMs} — время жизни звезды на стадии до ГП.

Химический состав звезд Хербига близок к солнечному, поэтому следует использовать значения τ_{PMs} , полученные в модели [35] для $Z = 0.017$. Зависимость τ_{PMs} от массы звезды M в модели [35] для этого значения Z можно аппроксимировать следующей формулой:

$$\lg(\tau_{\text{PMs}}) = 7.28 - 2.44q + 0.42q^2 - 0.13q^3, \quad (11)$$

где $q = \lg(M/M_\odot)$. На Рис. 2а представлена зависимость средних магнитных полей звезд Хербига от относительных возрастов τ_{rel} . Как видно, средние магнитные поля звезд Хербига возрастают за время эволюции звезды до главной последовательности примерно в четыре раза. Такое поведение может быть связано с уменьшением радиусов звезд в ходе эволюции до ГП при предположении, что магнитные потоки Φ мало меняются в ходе эволюции звезд. Значение τ_{rel} для звезды HD 36982 превышает единицу, что скорее всего объясняется ошибками в определении возраста звезды. Однако не исключено и то, что HD 36982 на самом деле является звездой главной последовательности, сохранившей спектральные особенности звезды Хербига.

Распределение магнитных потоков АЕ/ВЕ-звезд было нами получено путем замены B на Φ в формуле (9) и представлено на рис. 1б.

В таблице 2 приведено среднее для группы DDSS звезд АЕ/ВЕ с уверенно измеренными магнитными потоками значение логарифма магнитного потока $\langle \lg(\Phi) \rangle = 25.53$ с шириной $\langle \lg(\sigma_\Phi) \rangle = 0.37$ dex. Это значение на 0.89 dex меньше, чем определенное в статье [36] значение $\langle \lg(\Phi) \rangle = 26.42$ для АВ-звезд ГП, приведенное в четвертой строке таблицы 2.

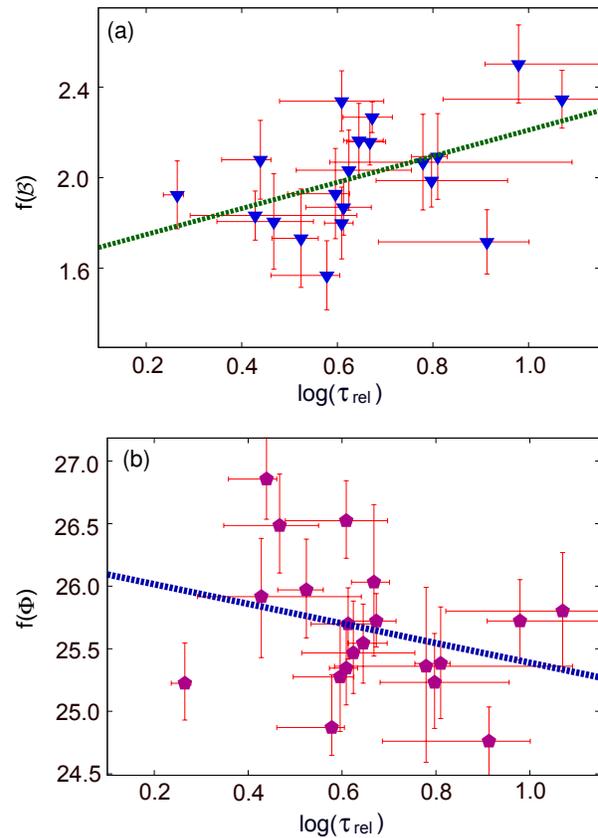


Рис. 2. Зависимость среднего магнитного поля (а) и магнитных потоков Ае/Ве-звезд Хербига (б) от их относительного возраста.

Более правильно сравнивать среднее значение $\langle \lg(\Phi) \rangle = 25.53$ для АЕ/ВЕ-звезд со средним значением магнитного потока АВ-звезд — потомков звезд Хербига — на начальной ГП. В работе [36] определена эта величина в моделях M_0 и M_1 популяционного синтеза ОВА-звезд главной последовательности.

В модели M_0 магнитный поток звезды не меняется в ходе ее эволюции на ГП, а в модели M_1 предполагается экспоненциальный распад магнитного потока со временем полураспада $\tau_d = 0.5\tau_{\text{MS}}$, где τ_{MS} — время жизни звезды на ГП. Значения $\langle \lg(\Phi) \rangle$ для моделей M_0 и M_1 даны в последних строках таблицы 2. Для модели M_0 , в которой предполагается сохранение магнитного потока, значение $\langle \lg(\Phi) \rangle$ такое же, как и для АВ-звезд ГП, тогда как для модели M_1 соответствующее значение на 0.41 dex выше.

Из данных таблицы 2 следует вывод, что средние магнитные потоки звезд АЕ/ВЕ примерно на порядок меньше соответствующих значений для АВ-звезд на начальной ГП.

Зависимость логарифмов средних магнитных потоков звезд Хербига от их относительно возраста

представлена на Рис. 2b. Как видно на рисунке, предположение о постоянстве магнитных потоков звезд Хербига не выполняется. Средние магнитные потоки звезд Хербига убывают за время эволюции звезды на стадии до ГП почти на порядок величины. Такая зависимость средних магнитных потоков звезд Хербига от их возраста означает, что магнитный поток звезд НАЕВЕ резко возрастает почти до 10 раз, когда звезда выходит на главную последовательность.

Столь большая разница в магнитных потоках звезд Хербига до ГП и при выходе на ГП не имеет простого объяснения. В какой-то степени эта разница может быть связана с тем, что магнитные поля НАЕВЕ-звезд имеют сложную, отличающуюся от дипольной топологию, поэтому усредненный по всей видимой поверхности продольный компонент оказывается относительно слабым, в то время как в реальности поле на поверхности сильное.

Кроме того, структура магнитного поля звезды может быть сильно искажена в результате аккреции вещества из околозвездного диска, поэтому использование простой формулы (8) для магнитного потока может привести к получению недостаточно точных значений этой величины.

Нельзя также исключить возможность того, что указанные выше различия в магнитных потоках могут (по крайней мере, частично) быть объяснены неточностью в определении радиусов НАЕВЕ-звезд. Радиусы звезд входят в выражение (8) для магнитного потока звезды во второй степени, поэтому даже относительно небольшие ошибки в их определении существенно влияют на значения магнитных потоков.

Новые поляризационные наблюдения звезд Хербига, равно как и уточнение их радиусов, помогут разрешить проблему расхождения магнитных потоков звезд промежуточных масс до и после их выхода на главную последовательность.

В настоящее время популярна гипотеза, изложенная в работе [1], о том, что слияние протозвезд может сыграть важную роль в усилении начального, относительно слабого магнитного поля звезды. Это означает, что одним из возможных сценариев образования магнитных АВ-звезд ГП может быть слияние двух компонентов тесной двойной системы звезд промежуточных масс, находящихся на стадии эволюции до ГП. Эта гипотеза хотя и может объяснить увеличение магнитного потока, не объясняет убывание магнитного потока звезды до главной последовательности и резкое возрастание его в момент выхода ее на ГП.

Предположение же о том, что слияния протозвезд происходят для всех магнитных Ae/Be-звезд Хербига именно в момент их выхода на ГП, представляется нам слишком экзотичным.

Требуется объяснения и тот факт, что доля магнитных НАЕВЕ-звезд среди звезд Хербига с измеренными магнитными полями составляет более 20% (см. раздел 2) и существенно выше, чем предполагалось ранее (см. ссылки во Введении к статье) и выше, чем у их потомков — АВ-звезд ГП.

В то же время следует отметить, что в момент выхода звезды на ГП происходит существенная перестройка ее внутренней структуры вследствие начала горения водорода в ядре звезды и резкого увеличения энерговыделения. Следствием этого может быть перераспределение зарядов и токов во внутренних слоях звезды и, следовательно, ее поверхностного магнитного поля.

Возможно, что именно с процессами, происходящими в момент выхода звезд промежуточных масс на ГП, и связаны главным образом столь необычные свойства ансамбля магнитных НАЕВЕ-звезд.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

- Магнитные потоки звезд промежуточных масс с обнаруживаемыми магнитными полями на ГП возрастают на порядок после выхода звезды на ГП. Этот вывод сильно зависит от точности измерений радиусов звезд Хербига и их магнитных полей.
- Возможно, что у магнитных звезд Хербига, потомками которых являются химически пекулярные Ar- и Vr-звезды, во время выхода на ГП и зажигания водорода в ядре происходит перестройка их внутренней структуры, приводящая к усилению их магнитного поля. В свою очередь, слабомагнитные звезды Ae/Be Хербига становятся немагнитными или слабомагнитными АВ-звездами главной последовательности.
- Доля магнитных звезд среди НАЕВЕ-звезд с измеренными магнитными полями превышает 20%. Резкое уменьшение этой доли при выходе звезды на ГП также может быть связано с перестройкой ее внутренней структуры.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы благодарны Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку грантом № 18-52-06004 Az_a.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. Ferrario, J. E. Pringle, C. A. Tout, and D. T. Wickramasinghe, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **400**, L71 (2009).
2. G. A. Wade, J. Grunhut, S. E. Alecian, et al., *IAU Symp.* **302**, 265 (2014).
3. A. F. Kholtygin, N. Castro, L. Fossati, et al., *ASP Conf. Ser.* **494**, 79 (2015).
4. G. A. Wade, E. Alecian, J. Grunhut, et al., *ASP Conf. Ser.* **449**, 262 (2011).
5. E. Alecian, in *Proc. Conf. on Putting A Stars into Context: Evolution, Environment, and Related Stars, Moscow, Russia, 2013*, Ed. by G. Mathys, E. Griffin, O. Kochukhov, et al. (Publ. house «Pero», Moscow, 2014), pp. 84–92.
6. W.-J. de Wit, R. D. Oudmaijer, M. E. van den Ancker, and N. Calvet, *Messenger* **157**, 50 (2014).
7. A. F. Kholtygin, A. S. Akhnevsky, and O. A. Tsiopa, *ASP Conf. Ser.* **518**, 83 (2019).
8. E. F. Borra, J. D. Landstreet, and I. Thompson, *Astrophys. J. Suppl.* **151**, 5 (1983).
9. A. F. Kholtygin, S. N. Fabrika, N. A. Drake, et al., *Astronomy Letters* **36**, 370 (2010).
10. A. F. Kholtygin, N. A. Drake, and S. N. Fabrika, in *Proc. Intern. Conf. on Magnetic Stars, Nizhnij Arkhyz, Russia, 2010*, Ed. by D. O. Kudryavtsev and I. I. Romanyuk (SAO RAS, Nizhnij Arkhyz, 2011), pp. 239–252.
11. J. R. Taylor, *An introduction to error analysis* (Univ. Sci. Books, Mill Valley, 1982).
12. E. Alecian, G. A. Wade, C. Catala, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **429**, 1001 (2013).
13. G. A. Wade, S. Bagnulo, D. Drouin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **376**, 1145 (2007).
14. S. Hubrig, R. V. Yudin, M. Schöller, et al., *Astron. and Astrophys.* **446**, 1089 (2006).
15. S. Hubrig, M. A. Pogodin, R. V. Yudin, et al., *Astron. and Astrophys.* **463**, 1039 (2007).
16. G. A. Wade, S. E. Alecian, C. Catala, et al., *Contr. Astron. Obs. Scalnate Pleso* **38**, 251 (2008).
17. Yu. V. Glagolevskij and G. A. Chountonov, *ASP Conf. Ser.* **248**, 535 (2001).
18. S. Hubrig, I. Ilyin, M. Schöller, and G. Lo Curto, *Astronomische Nachrichten* **334**, 1093 (2013).
19. S. Hubrig, B. Stelzer, M. Schöller, et al., *Astron. and Astrophys.* **502**, 283 (2007).
20. S. P. Järvinen, T. A. Carroll, S. Hubrig, et al., *Astrophys. J.* **858**, L18 (2018).
21. S. Hubrig, M. Schöller, I. Ilyin, et al., *Astron. and Astrophys.* **536**, A45 (2011).
22. M. Reiter, N. Calvet, T. Thanathibodee, et al., *Astrophys. J.* **852**, 5 (2018).
23. G. A. Wade, D. Drouin, S. Bagnulo, et al., *Astron. and Astrophys.* **442**, L31 (2005).
24. G. A. Wade, D. Drouin, S. Bagnulo, et al., *ASP Conf. Ser.* **358**, 369 (2006).
25. J. F. Donati, M. Semel, B. D. Carter, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **291**, 658 (1997).
26. M. A. Pogodin, J. A. Cahuasqui, N. A. Drake, et al., *ASP Conf. Ser.* **494**, 175 (2015).
27. S. Hubrig, M. Schöller, and R. V. Yudin, *Astron. and Astrophys.* **428**, L1 (2004).
28. S. Bagnulo, L. Fossati, J. D. Landstreet, and C. Izzo, *Astron. and Astrophys.* **583**, A115 (2015).
29. C. Catala, E. Alecian, J.-F. Donati, et al., *Astron. and Astrophys.* **462**, 293 (2007).
30. S. Hubrig, T. A. Carroll, M. Schöller, and I. Ilyin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **449**, L118 (2015).
31. C. Neiner, M. Oksala, C. Georgy, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **471**, 1926 (2017).
32. A. F. Kholtygin and E. I. Makarenko, *ASP Conf. Ser.* **518**, 108 (2019).
33. M. Vioque, R. D. Oudmaijer, D. Baines, et al., *Astron. and Astrophys.* **620**, A128 (2018).
34. A. F. Kholtygina, S. N. Fabrika, N. A. Drake, et al., *Kin. Phys. Cel. Bodies*, **26**, 181 (2010).
35. A. Bressan, P. Marigo, L. Girardi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **427**, 127 (2012).
36. A. S. Medvedev, A. F. Kholtygin, S. Hubrig, et al., *Astronomische Nachrichten* **338**, 910 (2017).

Evolution of Magnetic Fields of Herbig Ae/Be Stars

A. F. Kholtygin, O. A. Tsiopa, E. I. Makarenko, and I. M. Tumanova

Magnetic-field measurements for Herbig Ae/Be stars are analyzed to determine the distribution functions of root-mean-squared magnetic field strengths \mathcal{B} (in G) and magnetic fluxes Φ (in G cm^2) for Herbig stars with measured magnetic field. The \mathcal{B} and Φ values are approximated by log-normal functions with the means equal to $\langle \log \mathcal{B} \rangle = 2.0$ and $\langle \log \Phi \rangle = 25.5$, respectively, and with the widths of $\log(\sigma_{\mathcal{B}}) = 0.3$ dex and $\log(\sigma_{\Phi}) = 0.4$ dex, respectively. The inferred distribution widths are close to the typical values for main-sequence (MS) AB-type stars, whereas the mean logarithms of magnetic fields and magnetic fluxes proved to be significantly (by up to one order of magnitude) lower than the corresponding values for MS stars (2.5 and 26.4, respectively). The origin of these differences and the evolution of magnetic fields for intermediate-mass pre-MS stars are discussed.

Keywords: stars: magnetic field—stars: Ae/Be Herbig—stars: statistics