

УДК 524.35-327-14:52-123

## О ВОЗМОЖНОЙ ПРИЧИНЕ СВЕРХМЕДЛЕННОГО ВРАЩЕНИЯ НЕКОТОРЫХ АР-ЗВЕЗД

© 2026 В. Д. Бычков<sup>1\*</sup>, Л. В. Бычкова<sup>1\*\*</sup><sup>1</sup> Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 5 февраля 2026 года; после доработки 10 сентября 2025 года;

принята к публикации 3 декабря 2025 года

В данной работе мы рассматриваем один из возможных механизмов, приводящих к сверхмедленному вращению отдельных магнитных звезд, называемых ssgAr-звездами (super-slowly rotating Ar stars). Периоды таких объектов иногда превышают сотни лет. Считается, что они приобрели свое медленное вращение еще до выхода звезд на главную последовательность. Для объяснения этого феномена мы обратились к модели пропеллерного механизма для магнитной звезды, движущейся в межзвездной среде. В качестве примера возможной эффективности предлагаемого механизма рассмотрели типичную ssgAr-звезду 33 Lib (HD 137949). Детальное обоснование с помощью моделирования требует решения многопараметрической задачи. В то же время можно утверждать, что в отдельных случаях рассматриваемый вариант «магнитного» торможения способен эффективно замедлять вращение звезды.

Ключевые слова: *звезды: фундаментальные параметры* — *звезды: магнитные поля* — *звезды: вращение*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследователям магнитных Ар-звезд известно, что одной из характерных особенностей этих объектов является медленное вращение, скорости которого в среднем в 4–5 раз меньше, чем у нормальных звезд тех же спектральных классов (Abt and Morrell, 1995; Glagolevskij, 2021b). Этот факт подтверждают результаты наблюдений (см. работы Metlova et al. (2014), Bychkov et al. (2016a), Hubrig et al. (2018), Giagusso et al. (2022) и ряд других). Одна из наиболее интересных проблем — очень большие периоды вращения Ар-звезд, достигающие сотен, а, возможно, и тысяч лет (Mathys, 2017a). Она неоднократно рассматривалась на большом статистическом материале и подробно обсуждалась Glagolevskij (2016; 2021b; 2022). Ее возможное решение теоретически исследовали также Mouschovias and Paleologou (1979). В указанной работе обосновывалась потеря импульса вращения в замагниченном протозвездном облаке в случае, если магнитное поле ориентировано перпендикулярно плоскости вращения протозвездного облака. Вполне вероятен вклад и этого фактора, но он не объясняет наличие быстро вращающихся магнитных звезд с

осью магнитного диполя, лежащего вблизи плоскости экватора вращения звезд.

Мы обращаемся к другому механизму, который, по нашему мнению, при совпадении ряда благоприятных условий может объяснить очень редкое явление — сверхдлинные периоды вращения у некоторых магнитных звезд. С этой целью мы используем выборку магнитных Ар-звезд, для которых получены средние магнитные фазовые кривые (МФК) и следовательно известны с высокой достоверностью периоды вращения установленные на основании фотометрических или поляриметрических (магнитных) измерений. Рассматриваются уже сформировавшиеся звезды, пришедшие на ГП нулевого возраста (ZAMS, Zero Age Main Sequence), и их вероятное торможение вследствие взаимодействия с межзвездной средой, через которую они движутся.

Изучение фотометрической переменности позволяет с высокой точностью оценивать период вращения химически peculiарных (CP) звезд (Metlova et al., 2014; Renson and Catalano, 2001; Stibbs, 1950, и многие другие). Существенно расширила возможности определения этого параметра высокоточная фотометрия космических миссий Kepler, TESS и других (Balona et al., 2019; David-Uraz et al., 2019; Sikora et al., 2019). Исследователи (см., например, Labadie-Bartz et al., 2023) получили доступ к высокоточным оценкам периодов

\*E-mail: vbych@sao.ru

\*\*E-mail: lbych@sao.ru

mCP-звезд (magnetic chemically peculiar stars), что существенно облегчило построение МФК (Yakunin et al., 2023). Таким образом, количество звезд с изученным магнитным поведением возросло. Ведутся также активные поиски и отбор кандидатов в вероятные долгопериодические магнитные переменные (Mathys, 2017b; Mathys et al., 2024a). Однако следует обратить внимание на некоторую сложность, возникающую при использовании высокоточной внеатмосферной фотометрии для поиска сверхдлинных периодов у Ap-звезд. Несмотря на очень высокую точность фотометрических данных, полученных с помощью космических миссий (в среднем на полтора порядка выше, чем у наземных измерений), длительность наблюдений ограничена по времени; кроме того, такие измерения стали доступны недавно. Вследствие этого поиск периодов более 100 дней с использованием спутниковой фотометрии практически невозможен (Mathys et al., 2024b).

## 2. ПЕРИОДЫ ВРАЩЕНИЯ AP-ЗВЕЗД

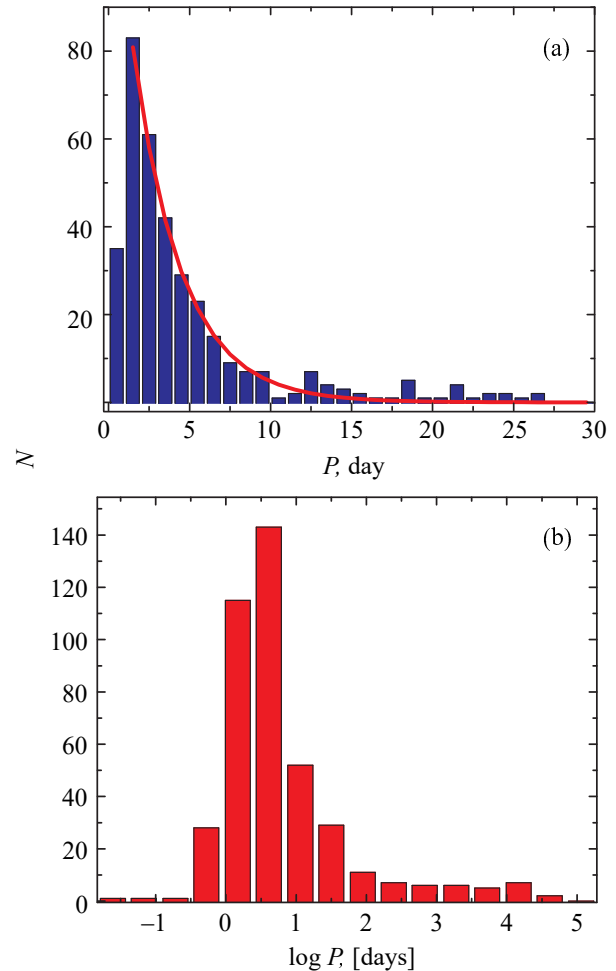
Рассмотрим выборку из 258 магнитных Ap-звезд, для которых известны периоды вращения, получены МФК и определены параметры переменности магнитного поля (Bychkov et al., 2003; 2021a). Диапазон наблюдаемых периодов вращения лежит в пределах от долей суток до сотен лет, то есть разброс составляет пять порядков (Mathys, 2017b, и ряд других исследователей). По этой причине мы приводим для Ap-звезд с известными МФК две гистограммы распределения периодов по частоте встречаемости: для звезд с периодами в диапазоне от 1 до 30 дней и в логарифмической шкале для всей выборки (см. рис. 1).

Как видно на рис. 1а, наиболее часто встречаются периоды 1–4 суток с максимумом от 1 до 2 суток. На основе этого распределения по интервалу периодов в диапазоне от 1.5 до 15.5 суток мы нашли эмпирическую зависимость  $N(P)$ . Она относительно хорошо описывается степенной функцией

$$N = 133.374 \exp(-0.333276 P) \quad (1)$$

и показана на рис. 1а красной линией. Если продлить ее до 30 суток, то мы заметим некоторый избыток звезд с периодами больше 13 суток. Конечно, это весьма условное допущение.

В отличие от работы Glagolevskij (2019), в которой рассматривался полный диапазон периодов, мы в данной статье сосредоточились исключительно на ssgAp-звездах с периодами вращения более 100 дней ( $\log P \geq 2$ ). Их список включает 24 Ap-звезды с МФК (см. таблицу 1). Основные



**Рис. 1.** Панель (а): частота встречаемости периодов всех магнитных Ap-звезд, для которых получены средние МФК в интервале периодов от диапазона  $P = 1$ –30 дней с шагом один день. Красной линией показана эмпирическая зависимость  $N(P)$ , относительно хорошо описываемая степенной функцией. Панель (б): распределение периодов всех магнитных Ap-звезд (258 объектов), для которых мы получили средние МФК, в логарифмической шкале.

физические параметры этих звезд, взятые из каталога Glagolevskij (2019), приведены в таблице 2. Следует отметить, что при поиске кандидатов в ssgAp-звезды одним из критериев является максимально малое значение величины  $v_e \sin i$ . Однако, поскольку проекция скорости вращения включает множитель  $\sin i$ , зависящий от угла наклона оси вращения звезды к лучу зрения, малость величины  $v_e \sin i$  является необходимым, но недостаточным условием, указывающим на возможное медленное вращение. В частности, по этой причине в список не вошла звезда HD 110066, у которой угол наклона составляет  $i = 9^\circ 1 \pm 0^\circ 9$  и истинный период вращения равен 6.4769 дня (Bychkov et al., 2021b), а

**Таблица 1.** Ap/Vp-звезды с периодом вращения более 100 дней. В колонках: (1) и (2) — название объекта; (3) — оценка периода и ее точность; (4) — спектральный класс и тип пекулярности (из базы данных SIMBAD); (5) и (6) — тип переменности и ссылка на источник, в котором тип определен

HD	Name	$P \pm \sigma$ , day	Sp pec	Variability	
				Type	Ref.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
965	HIP 1127	6212±200	A8p Sr	$\alpha^2$ CVn variable	[1]
2453	GR And	518.5±0.7	A1 SrEuCr	$\alpha^2$ CVn variable	[2]
9996	GY And	7718±55	B9p SrCrEuSi	$\alpha^2$ CVn variable	[3]
18078	BD+55 726	1352±6	A0p SrCr	$\alpha^2$ CVn variable	[1]
29578	CPD–54 685	6583±280	A5p SrEuCr	$\alpha^2$ CVn variable	[2]
50169	HIP 32965	10 870±300	A3pe SrCrEu	$\alpha^2$ CVn variable, emission-line star	[2]
51684	PPM 311290	366±1	Ap SrEuCr	$\alpha^2$ CVn variable	[2]
55719	CD–26 13816	14 000±1000	A5p SrCrEu	$\alpha^2$ CVn variable	[1]
59435	V827 Mon	1370±30	A5p SrCrEu	$\alpha^2$ CVn variable, SB	[2]
61468	CPD–27 4341	320±32	A3p EuCr	$\alpha^2$ CVn variable	[1]
93507	CPD–67 1494	562±2	A0p SiCr	$\alpha^2$ CVn variable	[1]
94660	KQ Vel	2830±140	A0p EuCrSi	$\alpha^2$ CVn variable	[1]
101065	V816 Cen	68 620±7500	F3 SrCrEu	$\alpha^2$ CVn variable	[4]
116114	BD –17 3829	17 700±1000	F0p SrCrEu	$\alpha^2$ CVn variable	[1]
116458	67 Mus	148±3	A0p SrEuCrSiHe-w	$\alpha^2$ CVn variable, SB	[4]
126515	FF Vir	129.95±0.02	A2p CrSr	$\alpha^2$ CVn variable	[5]
137949	33 Lib	28 902±455	F0p SrCrEu	$\alpha^2$ CVn variable	[6]
150562	V835 Ara	2100±150	A5p EuSi?	$\alpha^2$ CVn variable	[1]
165474	PPM 13424B	9990±760	A7p SrCrEu	$\alpha^2$ CVn variable	[2]
166473	PPM 749478	3836±30	A5p SrCrEu	$\alpha^2$ CVn variable	[7]
177765	HR 2727	13 500±950	A3p CrSrEu	$\alpha^2$ CVn variable, SB	[1]
187474	V3961 Sgr	2345±59	A0p EuCrSi	$\alpha^2$ CVn variable	[2]
188041	V1291 Aql	223.82±0.32	A0p SrCrEuKsn	$\alpha^2$ CVn variable	[1]
201601	$\gamma$ Equ	35 463±1149	F0p SrCrEu	$\alpha^2$ CVn variable	[4]

[1] Giarrusso et al. (2022), [2] Bychkov and Bychkova (2025), [3] Bychkov and Bychkova (2024), [4] Bychkov et al. (2021a), [5] Pyper and Adelman (2017), [6] Landstreet et al. (2014), [7] Mathys et al. (2020).

не 2900 дней, как предполагалось ранее (Adelman, 1981).

Рассмотрим возможную зависимость периодов ssgAp-звезд от их массы и возраста. Подобное исследование, но для всех известных Ap-звезд, уже проводилось ранее Glagolevskij (2021a; 2022). В нашей работе для построения зависимостей мы использовали данные из каталога Glagolevskij (2019). Они приведены в таблице 2.

Полученное распределение периодов в зависимости от масс исследуемых ssgAp-звезд изображе-

но на рис. 2а. Как видно из рисунка, можно только заподозрить некоторую тенденцию роста периода с уменьшением массы, что согласуется с результатами Glagolevskij (2022), полученными по более полной выборке, включающей все известные Ap-звезды. Заметим, что в нашем случае тенденцию определяют три совершенно уникальных объекта: HD 101065 (звезда Пшебильского), HD 201601 ( $\gamma$  Equ), HD 137949 (33 Lib), которые составляют 1% от всех Ap-звезд, имеющих МФК, или около 0.1% от всех A-звезд.

**Таблица 2.** Физические параметры звезд со сверхдлинными периодами. В колонках: (1) и (2) — название; (3) — эффективная температура; (4) — логарифм силы тяжести; (5) — радиус; (6) — логарифм возраста; (7) — масса. Данные взяты из каталога, опубликованного Glagolevskij (2019)

HD	Name	$T_{\text{eff}}$ , K	$\log g$	$R, R_{\odot}$	$\log t$	$M, M_{\odot}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
965	HIP 1127	7480	3.84	2.75	8.95	2.18
2453	GR And	8230	3.83	2.88	8.88	2.25
9996	GY And	10 150	3.91	2.33	8.40	1.94
18078	BD +55 726	9200	3.67	3.37	8.70	1.83
29578	CPD–54 685	7800	4.10	2.22	8.95	2.60
50169	HIP 32965	8620	3.76	2.95	8.70	2.16
51684	PPM 311290	7800	3.86	2.73	8.94	2.30
55719	CD–26 13816	8720	4.11	1.82	8.78	1.88
59435	V827 Mon	8600	3.81	3.00	8.78	2.22
61468	CPD–27 4341	8970	3.75	2.98	8.78	2.20
93507	CPD–67 1494	9170	3.89	2.70	8.60	2.21
94660	KQ Vel	10 650	3.91	2.43	8.34	2.09
101065	V816 Cen	6530	4.20	1.70	8.80	1.83
116114	BD–17 3829	7870	3.88	2.77	8.94	2.46
116458	67 Mus	10 000	3.90	2.29	8.18	1.74
126515	FF Vir	9260	4.10	2.07	8.65	2.40
137949	33 Lib	7520	4.01	2.09	8.98	2.04
150562	V835 Ara	7000	4.25	1.55	8.75	1.58
165474	PPM 13424B	8350	3.98	2.49	8.90	2.50
166473	PPM 749478	7760	4.00	2.25	9.00	2.29
177765	HR 2727	7420	3.79	2.57	8.98	1.81
187474	V3961 Sgr	10 240	3.98	2.51	8.48	2.53
188041	V1291 Aql	8450	3.98	2.25	8.78	2.09
201601	$\gamma$ Equ	7660	4.20	1.57	8.75	1.74

На рис. 2b изображена зависимость продолжительности периода от возраста звезды. На этом рисунке достаточно отчетливо видна тенденция увеличения периода вращения с возрастом звезды, что согласуется с результатами, полученными Glagolevskij (2022). Эволюционные изменения периодов вращения Ар-звезд происходят вследствие трансформации внутреннего строения (перераспределения массы внутри звезды) и увеличения радиуса при сохранении механического момента вращения. Эти эффекты подробно рассмотрены в статье Glagolevskij (2019) для Ар-звезд различных типов пекулярности. В указанной работе

нас интересуют зависимости, которые относятся к звездам с избытками Sr, Cg и Eu в атмосферах, так как наша выборка состоит именно из таких объектов (см. таблица 1). Сделанный Glagolevskij (2019) вывод о том, что в ходе эволюции период не увеличивается более чем в два раза, означает, что данный фактор не способен объяснить появление сверхмедленно вращающихся Ар-звезд. Возможную эволюцию периода этих объектов рассмотрим на примере 33 Lib (HD 137949) — типичной ssgAr-звезды.

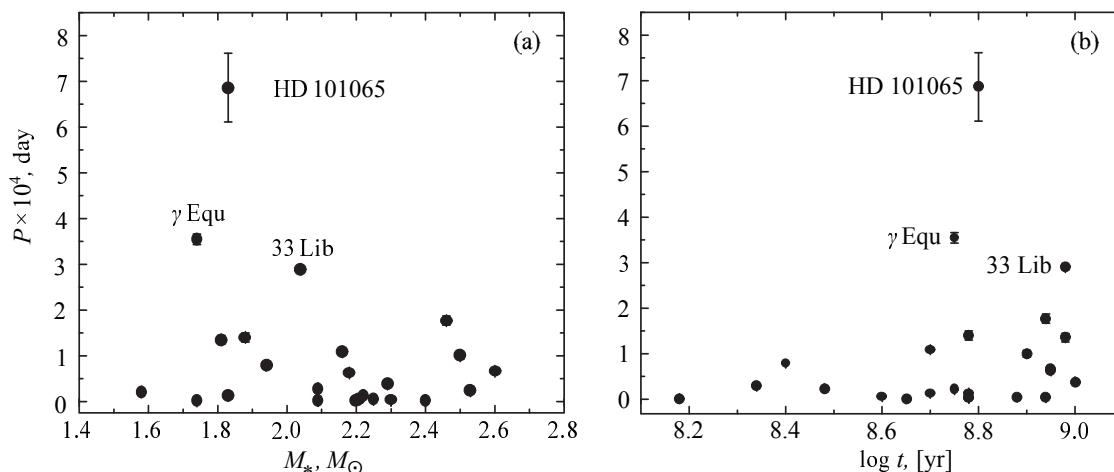
### 3. ЭВОЛЮЦИЯ ПЕРИОДА ВРАЩЕНИЯ ЗВЕЗДЫ 33 Lib И ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЕЕ ФАКТОРЫ

#### 3.1. Магнитное поле

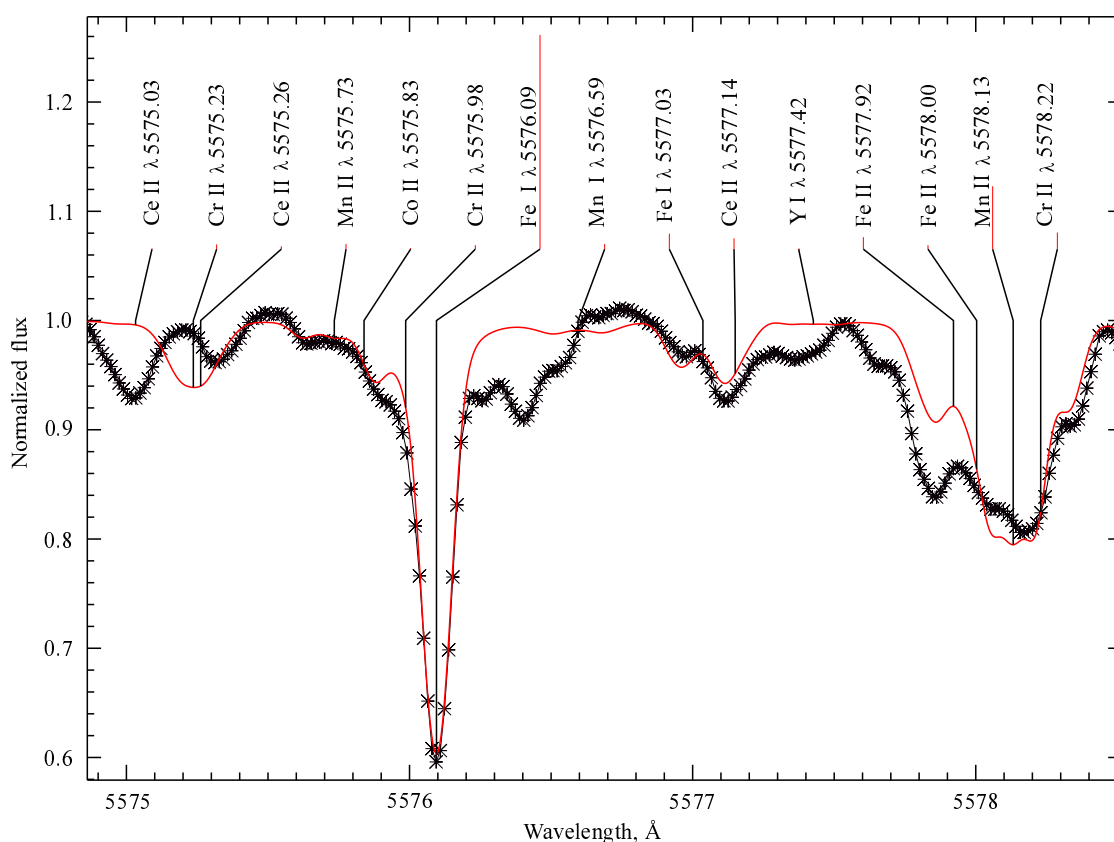
Один из вероятных периодов вращения 33 Lib ранее оценивался в 83.5 года (30 478 дней) на основании ряда из 21 измерения  $B_I$ , охватывающего 20.6 года (7528 дней). Позже по 77 измерениям  $B_s$ , полученным за интервал 29 лет (10 583 дней) была найдена более точная оценка периода — 79.2 года (28 902 дня) (Giarrusso et al., 2022). В дальнейшем мы будем использовать именно эту оценку. Основные фундаментальные параметры звезды возьмем из каталога Glagolevskij (2019):  $T_{\text{eff}} = 7520$  K,  $\log g = 4.01$ ,  $R = 2.09 R_{\odot}$ ,  $M = 2.04 M_{\odot}$  и  $\log t = 8.98$ . Чтобы оценить величину магнитного поля на полюсах этой звезды, нам необходимо знать величины углов наклона оси вращения к лучу зрения  $i$  и оси магнитного диполя к оси вращения  $\beta$ . Угол  $i$  можно оценить, измерив наблюдаемую величину  $v_e \sin i$ . Для относительно холодных магнитных Ар-звезд с богатым спектром (к каким относится 33 Lib) есть только несколько линий, не блендированных, с практически нулевым фактором Ланде, по которым можно правильно оценить проекцию скорости вращения, например Fe I  $\lambda$  5434.524 и Fe I  $\lambda$  5576.089. Кроме того, линии железа не показывают пульсаций, поэтому оценка их уширения дает достаточно корректную величину проекции скорости вращения.

Используя архивный спектр, полученный на спектрометре UVES (VLT ESO) со спектральным разрешением  $R = 80\,000$ , мы провели фитирование этих линий, которое дало оценку  $v_e \sin i = 0.6$  км с<sup>-1</sup>. Пример описания линии Fe I  $\lambda$  5576.09 теоретическим спектром представлен на рис. 3.

Зная радиус звезды и ее период вращения, можно определить экваториальную скорость:  $v_e = 0.0034$  км с<sup>-1</sup>. Видно, что в настоящее время оценить угол  $i$  из наблюдений  $v_e \sin i$  для этой звезды таким способом невозможно. В целом определение угла наклона оси вращения к лучу зрения



**Рис. 2.** Зависимости периода вращения от массы (а) и от возраста (б) для ssgAr-звезд. Вероятная точность оценки массы вычислялась стандартным способом с использованием данных взятых из базы данных SIMBAD.

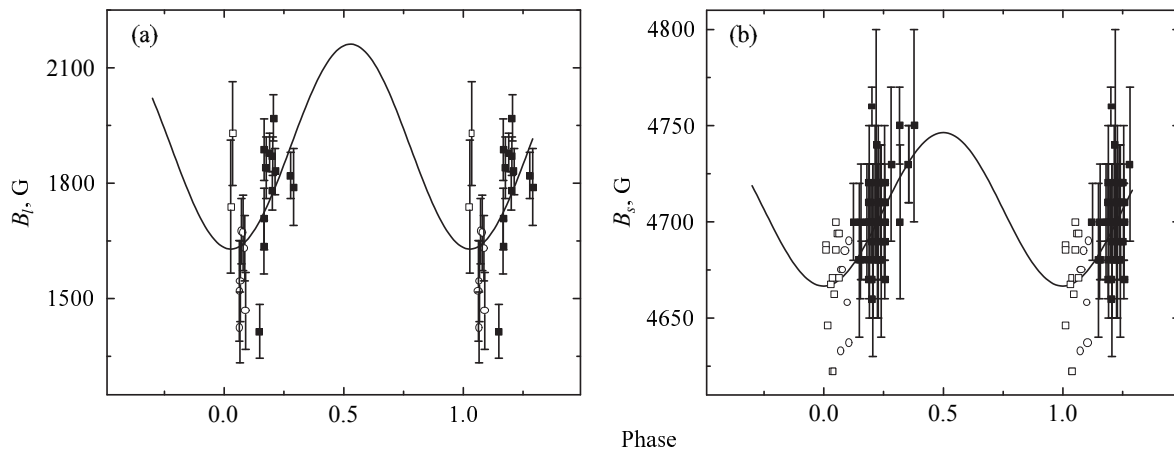


**Рис. 3.** Участок спектра звезды 33 Lib в районе линии FeI5576.09. Видно хорошее согласие между наблюдаемым спектром (черная сплошная линия) и теоретическим (красная линия).

для ssgAr-звезд с периодами более 120–140 дней представляет серьезную проблему. Неопределенность в оценке угла  $i$  затрудняет построение модели глобального магнитного поля и, соответственно, определение напряженности поля на полюсе  $B_p$ . По оценкам магнитных полей  $B_l$  и  $B_s$  для 33 Lib с периодом 79.2 года (28 902 дня) (Giarrusso et al., 2022) были построены средние МФК (рис. 4). Их

параметры были определены методом, описанным Bychkov et al. (2005), и приведены в таблице 3.

Полученные МФК близки к простым гармоническим зависимостям, что позволяет предположить дипольную структуру глобального магнитного поля и определить его параметры. Следует отметить, что поверхностное магнитное поле  $B_s$  у этой звезды меняется незначительно с периодом вращения,



**Рис. 4.** Средние МФК для 33 Lib, полученные по оценкам  $B_l$  из работ Mathys and Hubrig (1997) — open square, Romanyuk et al. (2014) — open circles и Mathys (2017b) (a) — filled square и по оценкам  $B_s$  из работ Mathys et al. (1997) — open square, Mathys (2017b) — open circles и Giarrusso et al. (2022) (b) — filled square.

**Таблица 3.** Параметры средних МФК, полученных по оценкам магнитных полей  $B_l$  и  $B_s$ , согласно Bychkov et al. (2005). Юлианская дата нулевой фазы  $JD = 2\,400\,000 + T_0$ . В столбце (1) указано, по каким оценкам получены параметры МФК. Далее следуют постоянная составляющая (2), полуамплитуда переменности (3), период (4) и начальная эпоха с оценками точности (5)

Method	$B_0 \pm \sigma$ , G	$B_1 \pm \sigma$ , G	$P \pm \sigma$ , day	$T_0 \pm \sigma$ , day
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
$B_l$	$1893 \pm 158$	$295 \pm 126$	$28\,902 \pm 450$	$48\,013 \pm 2457$
$B_s$	$4706 \pm 14$	$42 \pm 10$	$28\,902 \pm 455$	$48\,013 \pm 1599$

поэтому имеет смысл получить оценку средней величины наблюдаемых значений  $B_s$  по данным из работы Giarrusso et al. (2022). Среднее значение  $B_s$  по 77 измерениям составляет  $4693 \pm 27$  Гс, что очень близко к оценке в 4676 Гс, полученной Glagolevskij (2019). Поэтому, зная из наблюдений, что величина  $B_s$  меняется слабо, для оценки  $B_p$  мы можем воспользоваться выражением из работы Schwarzschild (1950):

$$B_p = \frac{B_s}{0.63}. \quad (2)$$

На основании этого находим  $B_p \approx 7450$  Гс. Как видно из таблицы 3, полуамплитуда МФК, оцененная по  $B_s$ , составляет всего 42 Гс, что может привести к неопределенности в оценке  $B_p$  в 67 Гс.

### 3.2. Торможение вращения

Мы предположили, что период вращения этой звезды в момент ее нахождения на ZAMS может составлять 2.5 дня, так как это наиболее характерный период для звезд такого типа. Важным фактором, влияющим на время замедления вращения, является скорость движения звезды относительно

межзвездной среды. Согласно Eggen (1962), величина вектора пекулярной скорости 33 Lib составляет  $V_0 = 49$  км с<sup>-1</sup>. Полный набор благоприятных условий для эффективного магнитного торможения вращающихся звезд (пропеллерный механизм), как показано в работе Illarionov and Sunyaev (1975), возникает при выполнении следующих неравенств:  $R_G > R_A > R_C$ , где  $R_G$  — радиус гравитационного захвата,  $R_A$  — альфвеновский радиус<sup>1)</sup>,  $R_C$  — радиус коротации.

Радиус захвата определяется как

$$R_G = \frac{2GM}{\xi^2 V_0^2}, \quad (3)$$

где  $V_0$  — пространственная скорость звезды относительно межзвездной среды,  $\xi$  — параметр, описывающий отношение скорости звука к скорости

<sup>1)</sup>Радиус сферы, в пределах которой движение заряженных частиц определяется магнитным полем звезды, или расстояние от центра звезды, на котором давление магнитного поля звезды равно плотности кинетической энергии плазмы.

движения звезды через межзвездную среду:

$$\xi = \sqrt{1 + \left(\frac{C_s}{V_0}\right)^2}. \quad (4)$$

Здесь  $C_s$  — скорость звука в межзвездной среде. Принимая характерное значение  $C_s = 9 \text{ км с}^{-1}$ , можно предположить в расчетах, что для 33 Lib  $\xi \approx 1$ .

Радиус коротации  $R_C$  — расстояние от центра звезды, на котором скорость вращения магнитного диполя равна первой космической скорости звезды, определяемой выражением

$$V_s^2 = \frac{GM}{R_C}. \quad (5)$$

Тогда

$$R_C = \left(\frac{GM}{\Omega^2}\right)^{1/3}, \quad (6)$$

где  $\Omega$  — угловая скорость вращения.

Согласно Fabrika and Bychkov (1988), альфвеновский радиус можно найти как

$$R_A = 2^{2/7} \mu^{4/7} \dot{M}^{-2/7} \times (2GM)^{-1/7} \left(1 + \left(\frac{V_s}{V_{\text{ff}}}\right)^2\right)^{-2/7}. \quad (7)$$

Здесь  $\mu$  — магнитный момент,  $V_{\text{ff}}$  — вторая космическая скорость для звезды,  $\dot{M}$  — темп аккреции межзвездной материи.

Считая глобальное магнитное поле звезды близким к дипольному, ее магнитный момент можно оценить как

$$\mu = \frac{H_0 R_0^3}{2}, \quad (8)$$

где  $H_0$  — напряженность на магнитном полюсе, а  $R_0$  — радиус звезды. Вследствие очень медленного вращения и относительно небольшой величины  $H_0$ , мы считали 33 Lib сферически симметричной.

Для оценки темпа аккреции межзвездной материи  $\dot{M}$ , которая определяется массой звезды, плотностью межзвездной среды и скоростью движения звезды, воспользуемся выражением

$$\dot{M} = \pi R_G^2 \rho \sqrt{C_s^2 + V_0^2} = \frac{4\pi G^2 M^2 \rho}{\xi^3 V_0^3} \approx \frac{4\pi G^2 M^2 \rho}{V_0^3}, \quad (9)$$

где  $\rho$  — плотность материи в межзвездной среде.

Звезда находится относительно близко к Солнцу; измеренный годовой параллакс  $\pi_{\text{Gaia}} = 0''.013$ , согласно Vallenari et al. (2023), соответствует примерному расстоянию 80 пк, поэтому мы принимаем параметры межзвездной среды, близкие к около-солнечным. В таком случае концентрация частиц

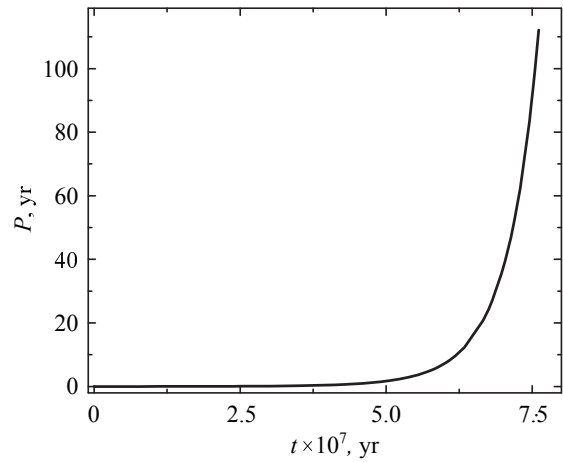


Рис. 5. Вероятная скорость изменения периода ssrAr-звезды 33 Lib в режиме «жесткого» пропеллера за время жизни звезды.

составляет  $n = 1 \text{ см}^{-3}$ , а средняя масса одной частицы —  $\langle m \rangle = 2.37 \times 10^{-24} \text{ г}$ , и, следовательно,  $\rho = 2.37 \times 10^{-24} \text{ г см}^{-3}$ . Как видим, темп аккреции очень сильно зависит от скорости движения звезды через межзвездное вещество. Для принятых параметров 33 Lib мы оценили его как

$$\dot{M} = 1.86 \times 10^6 \text{ г с}^{-1} = 2.94 \times 10^{-20} M_{\odot} \text{ год}^{-1}. \quad (10)$$

Механизм торможения проявляет свою эффективность в зависимости от отношения скорости вращения и скорости убегания или  $V_s/V_{\text{ff}}$ .

При выполнении условия  $V_s \gg V_{\text{ff}}$  звезда действует как «жесткий» пропеллер, и происходит эффективная потеря энергии вращения, то есть звезда «разбрасывает» вращающейся дипольной магнитосферой ионизованное аккрецируемое вещество в окружающее пространство. В режиме «мягкого» пропеллера ( $V_s \ll V_{\text{ff}}$ ) звезда «раздвигает» аккрецируемое вещество, при этом темп потери энергии вращения существенно уменьшается (Illarionov and Sunyaev, 1975). В этом случае альфвеновский радиус составит

$$R_A = 2^{2/13} \mu^{4/13} \dot{M}^{-2/13} 2(GM)^{1/13} \Omega^{-4/13}. \quad (11)$$

Изменение режима пропеллера с «жесткого» на «мягкий» происходит при условии  $V_s \approx V_{\text{ff}}$ . Соответственно, критический период вращения (при  $R_A = R_C$ ) в этот момент может быть определен по следующей формуле:

$$P_A = \frac{\pi^{4/7} (H_0 R_0^3)^{6/7} (GM)^{-11/7} (\xi V_0)^{9/7}}{2^{13/14} \rho^{3/7}}. \quad (12)$$

Расчеты для 33 Lib дают численное значение этого параметра:  $P_A = 2.37 \times 10^9 \text{ с} \approx 75 \text{ лет}$ .

Зависимость периода вращения от времени находится из решения следующего уравнения (Fabrika and Bychkov, 1988):

$$I \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{3} \frac{\mu^2}{R_m^3}, \quad (13)$$

где  $I$  — момент инерции звезды, который в общем случае можно выразить через массу и радиус,

$$I = k M R^2, \quad (14)$$

где коэффициент  $k$  зависит от распределения вещества внутри звезды и меняется с возрастом, а  $R_m$  — радиус магнитосферы звезды.

Принимая  $R_m = R_A$ , находим решение дифференциальных уравнений для режима «жесткого» пропеллера ( $V_s \gg V_{\text{ff}}$ ), не учитывая реальные изменения радиуса, момента инерции и магнитного поля звезды, происходящие со временем, а только переменный период вращения:

$$P = \frac{P_0}{\left(1 - A \left(\frac{P_0}{2\pi}\right)^{1/13} t\right)^{13}}, \quad (15)$$

где

$$A = \frac{\pi^{6/13} \rho^{6/13} (R_0)^{16/13} (H_0)^{14/13} (G)^{9/13}}{2^{11/13} 3k M^{4/13} (\xi V_0)^{18/13}}. \quad (16)$$

Замедление вращения в режиме «жесткого пропеллера» может происходить достаточно быстро. Зависимость периода вращения от времени в этом режиме показана на рис. 5. Время, необходимое для смены режима, найдем из равенства  $P = P_A$ :

$$t = \frac{1}{A} \left(\frac{2\pi}{P_0}\right)^{1/13} \left(1 - \left(\frac{P_0}{P_A}\right)^{1/13}\right), \quad (17)$$

где

$$A \approx 9.81 \times 10^{-17} c^{-14/13}. \quad (18)$$

После подстановки всех параметров оказалось, что для 33 Lib смена режима может произойти за время  $t \approx 7.5 \times 10^7$  лет.

Следует отметить, что это очень грубые оценки, а выводы, которые можно сделать на их основании, требуют продолжения исследований для подтверждения.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Мы рассмотрели одну из возможных причин, по которой встречаются столь редкие по продолжительности, уникальные даже на фоне остальных медленно вращающихся Ар-звезд, периоды вращения. На примере 33 Lib мы продемонстрировали, что при определенных благоприятных условиях

звезды с сильными глобальными магнитными полями при движении через межзвездное вещество, в принципе, могут быстро замедлять вращение. Возможно, поэтому мы наблюдаем некоторые, довольно редко встречающиеся магнитные СР-звезды как сверхмедленные ротаторы.

Основная масса Ар-звезд, как было показано ранее в исследованиях Glagolevskij (2019; 2022), не испытала существенного воздействия предполагаемого механизма торможения. Большой разброс по скоростям вращения может быть обусловлен неоднородным распределением межзвездного вещества и различием пекулярных пространственных скоростей звезд.

В настоящее время накапливается информация о движении звезд в межзвездном пространстве (наблюдения Hipparchos, Gaia), о свойствах межзвездной среды, уточняются физические параметры звезд и магнитного поля, что, несомненно, позволит в будущем точнее определять характеристики магнитного торможения для конкретных объектов.

Перечислим варианты возможных причин наблюдаемых сверхдлительных периодов у некоторых Ар-звезд:

1. Магнитное торможение из-за взаимодействия вращающейся магнитной звезды с межзвездным веществом посредством работы пропеллерного механизма. Ниже обсудим такой вариант подробнее.
2. Прецессия оси вращения магнитной звезды в двойной системе, возможная в некоторых (вероятно, очень редких) случаях. Тогда, в соответствии с периодом прецессии, должны наблюдаться медленные изменения наклона оси вращения к лучу зрения  $i$  и, как следствие, среднего значения продольного компонента магнитного поля  $B_l$ . На фоне этого тренда могут быть видны изменения  $B_l(t)$ , связанные с периодом вращения Ар-звезды, которые, естественно, будут значительно короче периода прецессии.
3. «Физическая» переменность (Bychkov et al., 2017). Однако такое предположение требует серьезного отдельного рассмотрения и в настоящее время не имеет достаточного количества прямых наблюдательных подтверждений.

Наблюдательным тестом для проверки перечисленных сценариев могут стать высокоточные широкополосные (возможно, в  $UBV$ -фильтрах) измерения линейной поляризации на протяжении некоторого времени. Скорость вращения плоскости линейной поляризации однозначно указывала бы на продолжительность периода. Это позволило бы нам без вариантов сказать, как в случае  $\gamma$  Equ (HD 201601) (Leroy et al., 1994; Bychkov et al., 2016b), связаны ли столь длительные периоды

непосредственно с вращением звезд или имеют иную природу.

Проблема магнитного торможения в результате взаимодействия вращающейся и движущейся магнитной звезды с межзвездной средой рассматривалась в работах Navnes and Conti (1971) и Hartoog (1977). Наиболее детальное и подходящее для нашей задачи исследование этой проблемы можно найти в статьях Strittmatter and Norris (1971), Fabrika and Bychkov (1988) и ряда других авторов.

Решение этой задачи сопряжено со многими трудностями, так как модель включает в себя большое количество параметров. Необходимо учитывать:

- 1) массу звезды и скорость ее вращения — для оценки механического момента вращения звезды;
- 2) структуру глобального магнитного поля — дипольная, квадрупольная;
- 3) ориентацию магнитного поля относительно оси вращения;
- 4) скорость движения звезды через межзвездную среду;
- 5) ориентацию оси вращения относительно направления движения звезды;
- 6) плотность, температуру и состав межзвездной среды;
- 7) радиус Альфвена, на котором энергия глобального магнитного поля звезды будет равна кинетической энергии движения заряженных частиц;
- 8) коротационный радиус.

Определив все перечисленные параметры, можно оценить скорость потери механического момента вращения и эволюцию периода звезды. Аналогичные вычисления могут быть сделаны для наиболее распространенных случаев.

Следует отметить, что радиус Альфвена и радиус коротации будут нелинейно зависеть от скорости вращения звезды, а также от скорости движения через межзвездную среду при прочих равных параметрах (таких как ориентация магнитного поля относительно оси вращения и ориентация оси вращения относительно направления движения звезды).

Некоторые оценки эффективности этого механизма на примере типичной ssgAr-звезды 33 Lib (HD 137949), приведенные в разделе 3, позволяют сделать предварительные выводы об эффективности механизма магнитного торможения при определенных условиях. Стоит обратить внимание, что в данном рассмотрении потеря скорости вращения звезды (энергии механического вращения) является нелинейным процессом (см. раздел 3.2, рис. 5). Вполне возможно, что звезде ко времени прихода на ГП уже было свойственно медленное вращение (см., например, Stępień, 2000),

что увеличило эффективность работы механизма «пропеллера» и ускорило торможение. Однако для полного понимания природы таких уникальных и редко встречающихся объектов, как ssgAr-звезды, необходимо изучить и другие возможные сценарии магнитного торможения.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны коллегам И. Мадэю (Варшавский университет), М. В. Баркову (ИНАСАН), Г. П. Топильской (СКФУ) за полезную дискуссию и ценные замечания, а также Т. А. Рябчиковой (ИНАСАН) — за выполнение расчетов синтетического спектра звезды 33 Lib. Авторы выражают благодарность рецензенту за конструктивные комментарии, которые позволили существенно улучшить содержание текста работы. В этой работе мы использовали сведения из базы данных SIMBAD (CDS, Страсбург, Франция).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. A. Abt and N. I. Morrell, *Astrophys. J. Suppl.* **99**, 135 (1995). DOI:10.1086/192182
2. S. J. Adelman, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **44**, 265 (1981).
3. L. A. Balona, G. Handler, S. Chowdhury, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **485** (3), 3457 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz586
4. V. D. Bychkov and L. V. Bychkova, in *Proc. All Russian Conf. on Modern Astronomy: From the Early Universe to Exoplanets and Black Holes (VAK2024)*, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020, Ed. by Yu. Yu. Balega, A. M. Cherepashchuk et al. (RIOR, Moscow, 2024), pp. 335–339. DOI:10.26119/VAK2024.051
5. V. D. Bychkov and L. V. Bychkova, *Astrophysical Bulletin* **80** (4), 582 (2025). DOI:10.1134/S1990341325600644
14. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, J. Madej, et al., *Astrophysical Bulletin* **76** (3), 297 (2021b). DOI:10.1134/S1990341321030032

7. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *Astron. and Astrophys.* **407**, 631 (2003). DOI:10.1051/0004-6361:20030741
8. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *Astron. and Astrophys.* **430**, 1143 (2005). DOI:10.1051/0004-6361:20034563
9. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, J. Madej, and G. P. Topilskaya, arXiv e-prints astro/ph:1506.06234 (2015). DOI:10.48550/arXiv.1506.06234
10. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **455** (3), 2567 (2016a). DOI:10.1093/mnras/stv2416
11. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **455** (3), 2567 (2016b). DOI:10.1093/mnras/stv2416
12. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *ASP Conf. Ser.*, **510**, 233 (2017).
13. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *Astron. and Astrophys.* **652**, id. A31 (2021a). DOI:10.1051/0004-6361/202040215
14. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, J. Madej, et al., *Astrophysical Bulletin* **76** (3), 297 (2021b). DOI:10.1134/S1990341321030032
15. A. David-Uraz, C. Neiner, J. Sikora, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **487** (1), 304 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz1181
16. O. J. Eggen, *Royal Greenwich Observatory Bulletins* **51**, 79 (1962).
17. S. N. Fabrika and V. D. Bychkov, in *Proc. Intern. Conf. on Magnetic Stars, Nizhnij Arkhyz, Russia, 1987*, Ed. by Yu. Glagolevskij (Nauka, Leningrad, 1988), p. 241.
18. M. Giarrusso, M. Cecconi, R. Cosentino, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **514** (3), 3485 (2022). DOI:10.1093/mnras/stac1488
19. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **59** (3), 321 (2016). DOI:10.1007/s10511-016-9438-5
20. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **74** (1), 66 (2019). DOI:10.1134/S1990341319010073
21. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **76** (4), 435 (2021a). DOI:10.1134/S1990341321040052
22. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **76** (1), 91 (2021b). DOI:10.1134/S1990341321010089
23. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **77** (2), 167 (2022). DOI:10.1134/S1990341322020031
24. M. R. Hartoog, *Astrophys. J.* **212**, 723 (1977). DOI:10.1086/155097
25. O. Havnes and P. S. Conti, *Astron. and Astrophys.* **14**, 1 (1971).
26. S. Hubrig, S. P. Järvinen, J. Madej, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **477** (3), 3791 (2018). DOI:10.1093/mnras/sty889
27. A. F. Illarionov and R. A. Sunyaev, *Astron. and Astrophys.* **39**, 185 (1975).
28. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, and L. Fossati, *Astron. and Astrophys.* **572**, id. A113 (2014). DOI:10.1051/0004-6361/201424749
29. J. Labadie-Bartz, S. Hümmerich, K. Bernhard, et al., *Astron. and Astrophys.* **676**, id. A55 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202346657
30. J. L. Leroy, S. Bagnulo, M. Landolfi, and E. Landi Degl'Innocenti, *Astron. and Astrophys.* **284**, 174 (1994).
31. G. Mathys, *Astron. and Astrophys.* **601**, id. A14 (2017a). DOI:10.1051/0004-6361/201628429
32. G. Mathys, *Astron. and Astrophys.* **601**, id. A14 (2017b). DOI:10.1051/0004-6361/201628429
33. G. Mathys, D. L. Holdsworth, M. Giarrusso, et al., arXiv e-prints astro/ph:2409.08060 (2024a). DOI:10.48550/arXiv.2409.08060
34. G. Mathys, D. L. Holdsworth, and D. W. Kurtz, *Astron. and Astrophys.* **683**, id. A227 (2024b). DOI:10.1051/0004-6361/202348259
35. G. Mathys and S. Hubrig, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **124**, 475 (1997). DOI:10.1051/aas:1997366
36. G. Mathys, S. Hubrig, J. D. Landstreet, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **123**, 353 (1997). DOI:10.1051/aas:1997103
37. N. V. Metlova, V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 315 (2014). DOI:10.1134/S1990341314030067
38. G. Mathys, V. Khalack, and J. D. Landstreet, *Astron. and Astrophys.* **636**, id. A6 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/201936624
39. T. C. Mouschovias and E. V. Paleologou, *Astrophys. J.* **230**, 204 (1979). DOI:10.1086/157077
40. D. M. Pyper and S. J. Adelman, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **129** (980), 104203 (2017). DOI:10.1088/1538-3873/aa7c9e
41. P. Renson and F. A. Catalano, *Astron. and Astrophys.* **378**, 113 (2001). DOI:10.1051/0004-6361:20011065
42. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **69** (4), 427 (2014). DOI:10.1134/S1990341314040051
43. M. Schwarzschild, *Astrophys. J.* **112**, 222 (1950). DOI:10.1086/145336
44. J. Sikora, A. David-Uraz, S. Chowdhury, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **487** (4), 4695 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz1581
45. K. Stępień, *Astron. and Astrophys.* **353**, 227 (2000).
46. D. W. N. Stibbs, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **110**, 395 (1950). DOI:10.1093/mnras/110.4.395
47. P. A. Strittmatter and J. Norris, *Astron. and Astrophys.* **15**, 239 (1971).
48. A. Vallenari (Gaia Collab.) et al., *Astron. and Astrophys.* **674**, id. A1 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202243940
49. I. A. Yakunin, E. A. Semenko, I. I. Romanyuk, et al., *Astrophysical Bulletin* **78** (2), 141 (2023). DOI:10.1134/S1990341323020128

## On the Possible Reason for the Super-Slow Rotation of Some Ap Stars

V. D. Bychkov<sup>1</sup> and L. V. Bychkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167, Russia

In this paper, we consider one possible mechanism leading to the ultra-slow rotation of individual magnetic stars called super-slowly rotating Ap stars (ssrAp stars). The periods of such objects sometimes exceed hundreds of years. It is believed that they acquired their slow rotation even before the stars entered the main sequence (MS). To explain this phenomenon, we turned to a propeller mechanism model for a magnetic star moving in the interstellar medium. As an example of the potential efficiency of the proposed mechanism, we considered the typical ssrAp star, 33 Lib (HD 137949). A detailed justification using modeling requires solving a multiparameter problem. At the same time, it can be argued that in certain cases, the considered version of “magnetic” braking is capable of effectively slowing the rotation of a star.

Keywords: *stars: fundamental parameters; stars: magnetic fields; stars: rotation*