

УДК 524.312

## Статистика магнитных полей ОВА-звезд

*А.Ф. Холтыгин, Д.Н. Мокшин*

Санкт-Петербургский государственный университет, Университетский пр., 28, Санкт-Петербург, 198504, Россия

*afkholtugin@gmail.com*

Поступила в редакцию 22 октября 2021 г.

**Аннотация.** Недавние измерения магнитных полей ОВА-звезд показывают, что их магнитные поля распределены по логарифм-нормальному закону со средним значением  $\log(\mathcal{B}) \sim 2.6-2.8$  и стандартным отклонением  $\sigma \sim 0.25-0.66$ , где  $\mathcal{B}$  – среднеквадратичное магнитное поле в Гс.

Доля ОВ-звезд с зарегистрированными магнитными полями от  $\sim 100$  Гс до  $\sim 50$  кГс (магнитных ОВ-звезд) составляет 7–12%. У остальных ОВА-звезд магнитных полей до недавнего времени не было обнаружено. Усовершенствование методики измерения магнитных полей за последние 5–7 лет позволило зарегистрировать слабые магнитные поля у  $\sim 10$  ВА-звезд со значениями  $\log(\mathcal{B})$  в промежутке от  $\sim 0.2$  до  $\sim 15$  Гс. Распределение магнитных полей этих слабомагнитных звезд также может быть описано логарифм-нормальным законом с такой же дисперсией, что и для магнитных ОВ-звезд, но со средним  $\log(\mathcal{B}) \sim 0.10$ . По аналогии с магнитными ОВА-звездами мы предположили, что это распределение справедливо для всех ОВА-звезд с неизмеренными магнитными полями.

По данным о радиусах этих звезд построены функции распределения магнитных потоков и магнитных моментов как магнитных, так и слабомагнитных звезд. Показано, что эти величины для всех магнитных ОВА-звезд могут быть описаны едиными функциями распределения. Средние магнитные потоки  $\Phi$  (в Гс·см<sup>2</sup>) магнитных и слабомагнитных ОВ-звезд составляют  $\log(\Phi) \sim 26.3$  и  $\sim 23.1$ , что близко к соответствующим величинам для магнитаров и радиопульсаров соответственно. Полученные данные позволяют сделать вывод о существовании общей функции распределения магнитных полей всех ОВА-звезд, как магнитных, так и слабомагнитных. Приводятся возможные представления такой функции распределения в зависимости от доли магнитных звезд. Показано, что магнитные моменты радиопульсаров и магнитаров в среднем на 5 порядков меньше соответствующих величин для слабомагнитных и магнитных звезд.

**Ключевые слова:** звезды, магнитные поля, статистика

## 1 Введение

Происхождение магнитных полей ОВА-звезд во многом остается загадкой. Гипотеза о том, что звездное магнитное поле может быть реликтовым, была впервые высказана Cowling (1945), который показал, что время омической диссипации магнитного поля в звездах с массами  $M > 1.5 M_{\odot}$  превышает время их жизни, и пришел к выводу, что звездные магнитные поля могут быть реликтом магнитного поля протозвездных облаков. Идея о реликтовой природе магнитных полей звезд ранних спектральных классов также аргументировалась Moss (2003).

Численное моделирование Braithwaite and Spruit (2004), Braithwaite and Nordlund (2006), а также Duez et al. (2010), Duez and Mathis (2010) показало, что существуют стабильные конфигурации поля, сохраняющиеся в течение всего времени жизни звезды, для различных начальных конфигураций магнитного поля. В то же время доля магнитных ОВА-звезд<sup>1</sup> среди всех звезд этих спектральных классов составляет всего лишь 7–12% согласно, например, Alecian et al. (2019).

<sup>1</sup> Традиционно к магнитным звездам (magnetic stars) относят химически пекулярные ВА-звезды с сильным магнитным полем от нескольких сотен гаусс и более. В настоящей статье мы считаем магнитными все ОВА-звезды с зарегистрированным магнитным полем  $\mathcal{B} > 30$  Гс. Так как термин “магнитные звезды” используется нами только в этом значении, то его расширенное толкование не должно вызвать неправильного понимания.

Относительная малость доли магнитных звезд среди всех звезд ранних спектральных классов пока не имеет убедительного объяснения. Одним из объяснений этого эффекта может быть гипотеза [Ferrario et al. \(2009\)](#), предположивших, что магнитные поля звезд ранних спектральных классов образуются в конце их формирования при слиянии протозвезд в результате работы механизма быстрого динамо.

Новые методики измерения магнитных полей и усовершенствование приемников излучения за последние 5–10 лет позволили детектировать слабые магнитные поля у примерно 10 ВАF-звезд со значениями продольных компонент магнитных полей в промежутке от 0.2 до  $\sim 15$  Гс ([Alecian et al., 2016](#); [Blazère et al., 2016a, b](#)). Тем самым весь массив звезд ранних спектральных классов можно представить в виде совокупности относительно малочисленной группы магнитных звезд и основной массы звезд с малыми значениями магнитных полей или слабомагнитных (Weak-Magnetic, WM) звезд.

[Kholtygin and Makarenko \(2019\)](#) отметили подобие двух групп ОВА-звезд по отношению к величине их магнитного потока и двух групп нейтронных звезд – нормальных нейтронных звезд (радиопульсаров) и магнитаров – и предположили, что радиопульсары являются потомками слабомагнитных звезд, а магнитары – потомками группы магнитных звезд. [Makarenko et al. \(2021b\)](#) показали, что такое подобие не вполне точно.

Следует отметить также, что относительная доля магнитаров в полном числе нейтронных звезд составляет всего 1% по сравнению с долей  $\sim 99\%$  нормальных нейтронных звезд, что требует отдельного объяснения.

Пролить свет на эту проблему может помочь статистическое исследование магнитных полей ОВА-звезд и сравнение распределений их магнитных полей, магнитных потоков и магнитных моментов с распределениями, полученными из анализа магнитных свойств их потомков – нейтронных звезд. Такая задача рассмотрена в настоящей работе.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 рассмотрено распределение магнитных полей и магнитных потоков ОВА- и нейтронных звезд и их аппроксимации. Распределение магнитных моментов этих групп звезд анализируется в разделе 3. Выводы к статье даны в Заключении.

## 2 Распределение магнитных полей и магнитных потоков

### 2.1 Статистические характеристики магнитных полей

В результате спектрополяриметрических наблюдений звезд может быть определен продольный компонент  $B_z$  магнитного поля звезды, усредненный по видимой поверхности звезды, также называемый эффективным магнитным полем. Величина  $B_z$  существенно зависит от фазы вращения звезды и не пригодна для выполнения статистических исследований магнитного поля больших ансамблей 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 [Borra et al. \(1983\)](#) среднеквадратичное магнитное поле:

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

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 [Kholtygin et al. \(2010b\)](#) было показано, что для дипольной конфигурации магнитного поля величина  $\mathcal{B}$  слабо зависит от фазы вращения звезды  $\phi$ , угла наклона оси вращения  $i$  и угла  $\beta$  между осью вращения и осью магнитного диполя. Этот вывод также справедлив для квадрупольных и других конфигураций магнитного поля.

В статье [Borra et al. \(1983\)](#) определены также следующие параметры, характеризующие точность измерения магнитного поля:

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

где  $\sigma_j$  – 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  $\mathcal{B}/\Sigma_{\mathcal{B}}$  и величина  $\chi^2/n$ , тем более статистически значимы измерения магнитного поля. Для подтверждения реальности измерений можно использовать критерий, предложенный в статье ([Kholtygin et al., 2011](#), формула 4). При  $n > 3$  среди выполненных измерений мы будем иметь как минимум одно статистически значимое абсолютное значение измеренного магнитного поля  $|B_z|$ .

## 2.2 Источники измерений магнитных полей и радиусов звезд

Сведения об измерениях магнитных полей ОВА-звезд взяты нами из статей [Alecian et al. \(2014\)](#), [Aurière et al. \(2007\)](#), [Briquet et al. \(2007\)](#), [Castro et al. \(2015\)](#), [Elkin et al. \(2010\)](#), [Folsom et al. \(2013\)](#), [Grunhut et al. \(2009\)](#), [Grunhut et al. \(2012\)](#), [Grunhut et al. \(2013\)](#), [Henrichs et al. \(2012\)](#), [Hubrig et al. \(2008\)](#), [Hubrig et al. \(2012b\)](#), [Hubrig et al. \(2012a\)](#), [Hubrig et al. \(2014\)](#), [Mathys \(2017\)](#), [Järvinen et al. \(2017\)](#), [Landstreet et al. \(2008\)](#), [Neiner et al. \(2015\)](#), [Shultz and Wade \(2017\)](#), [Romanyuk et al. \(2017\)](#), [Sikora et al. \(2016\)](#), [Sikora et al. \(2019\)](#), [Stütz et al. \(2003\)](#), [Wade et al. \(2011\)](#), [Wade et al. \(2012a\)](#), [Wade et al. \(2012b\)](#), [Wade et al. \(2012c\)](#), [Wade et al. \(2015\)](#).

Также были использованы данные каталога [Bychkov et al. \(2009\)](#). Сведения о магнитных полях слабомагнитных звезд извлечены из статей [Alecian et al. \(2016\)](#), [Blazère et al. \(2016a\)](#), [Blazère et al. \(2016b\)](#), [Lignières et al. \(2009\)](#), [Neiner et al. \(2017\)](#), [Petit et al. \(2011\)](#), [Petit et al. \(2013\)](#), [Seach et al. \(2020\)](#).

Радиусы звезд взяты из публикаций [Aurière et al. \(2007\)](#), [Castro et al. \(2015\)](#), [Neiner et al. \(2017\)](#), [Rhee et al. \(2007\)](#), [Pasinetti Fracassini et al. \(2001\)](#), [Shulyak et al. \(2014\)](#), [Wade et al. \(2012a\)](#), [Wade et al. \(2015\)](#).

Параметры нормальных нейтронных звезд (радиопульсаров) брались из каталога [Manchester et al. \(2005b\)](#), а характеристики магнитаров – из каталога [Olausen and Kaspi \(2014\)](#). Из рассмотрения были исключены миллисекундные пульсары, природа и возраст которых существенно отличаются от тех, что характерны для нормальных пульсаров на стадии эволюции до *dead line*. Для всех нейтронных звезд, как нормальных пульсаров, так и магнитаров, было взято среднее значение радиуса  $R = 10$  км.

Для определения поверхностных магнитных полей радиопульсаров и магнитаров (в Гс) использовалась стандартная формула [Manchester et al. \(2005a\)](#):

$$B_s = 3.2 \cdot 10^{19} \sqrt{P\dot{P}}, \quad (4)$$

где  $P$  – период вращения пульсара или магнитара в секундах, а  $\dot{P}$  – производная периода вращения (безразмерная),  $B_s$  – поверхностное магнитное поле в гауссах.

## 2.3 Распределение магнитных полей ОВА-звезд

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

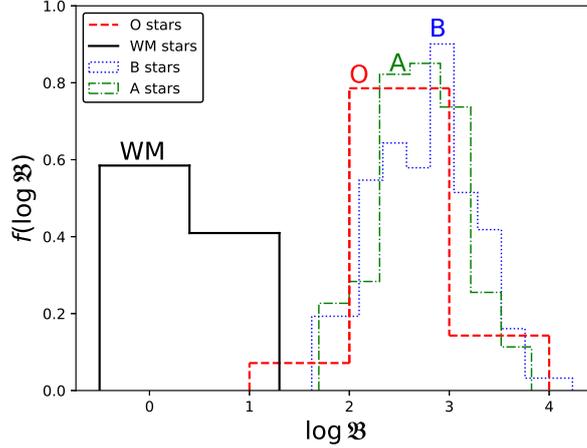
$$f(\mathcal{B}) \approx \frac{N(\mathcal{B}, \mathcal{B} + \Delta\mathcal{B})}{N \cdot \Delta\mathcal{B}}, \quad (5)$$

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

Определенные нами функции распределения  $f(\mathcal{B})$  для ОВА-звезд и группы слабомагнитных звезд с измеренными магнитными полями представлены на рис. 1 и могут быть описаны логарифм-нормальным законом. Обозначим  $\eta = \log(\mathcal{B})$ , тогда

$$f(\eta) = f(\log \mathcal{B}) = \frac{1}{\sigma_\eta \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\eta - \bar{\eta}}{\sigma_\eta} \right)^2}, \quad (6)$$

где  $\bar{\eta}$  – среднее значение, а  $\sigma_\eta = \sigma_{\log \mathcal{B}}$  – стандартное отклонение случайной величины  $\eta$ .



**Рис. 1.** Функции распределения среднеквадратичного магнитного поля ОВА- и слабомангнитных звезд

При аппроксимации реального распределения магнитных полей логарифм-нормальным следует учесть, что получаемое из анализа наблюдений какой-либо звезды значение среднеквадратичного магнитного поля  $\mathcal{B}'$  может отличаться от значения  $\bar{\mathcal{B}}$ . В первом приближении ошибки определения среднеквадратичного магнитного поля распределены по нормальному закону, тогда условная вероятность того, что измеренное значение равно  $\mathcal{B}'$  для какой-либо звезды при реальном значении среднеквадратичного магнитного поля для этой звезды  $\mathcal{B}$  равна

$$P(\mathcal{B}' | \mathcal{B}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\mathcal{B} - \mathcal{B}'}{\sigma} \right)^2}, \quad (7)$$

где  $\sigma$  – ошибка определения величины  $\bar{\mathcal{B}}$  для рассматриваемой звезды. Для вычисления значения  $\sigma$  можно использовать формулу (2).

Полная вероятность того, что среднеквадратичное магнитное поле звезды с номером  $i$  в списке звезд с измеренным магнитным полем принимает значение  $\mathcal{B}'_i$  при заданных параметрах  $\mathcal{B}$  и  $\sigma_{\mathcal{B}}$  получается умножением вероятностей (6) и (7) и интегрированием по всем возможным значениям  $\mathcal{B}$ :

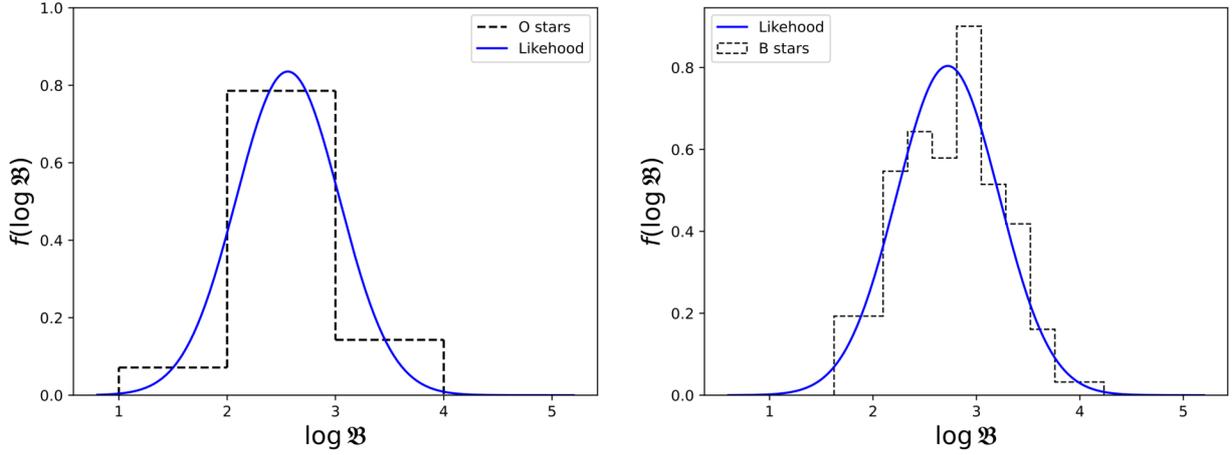
$$P(\mathcal{B}'_i | \overline{\log \mathcal{B}}, \sigma_{\log \mathcal{B}}, \sigma_i) = \frac{1}{2\pi \sigma_{\log \mathcal{B}} \sigma_i \ln 10} \int_{\mathcal{B}_{\min}}^{\mathcal{B}_{\max}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{(\log \mathcal{B} - \overline{\log \mathcal{B}})^2}{\sigma_{\log \mathcal{B}}^2} + \frac{(\mathcal{B} - \mathcal{B}'_i)^2}{\sigma_i^2} \right)} \frac{d\mathcal{B}}{\mathcal{B}}, \quad (8)$$

где мы перешли для удобства от интегрирования по  $\eta = \log \mathcal{B}$  к интегрированию по  $\mathcal{B}$ . Пределы интегрирования  $\mathcal{B}_{\min}$  и  $\mathcal{B}_{\max}$  определяются возможными значениями  $\mathcal{B}$  при заданной величине  $\mathcal{B}'_i$  (см., например, [Kholtygin et al., 2010a](#)).

Пусть для какой-либо группы звезд определен набор значений  $\{\mathcal{B}_i\}$ , значений среднеквадратичных магнитных полей. Введем *функцию правдоподобия*  $\mathcal{L}$  как произведение вероятностей (8) для всех звезд данной группы. Тогда

$$-\ln \mathcal{L} = \sum_{i=1}^n -\ln P(\mathcal{B}'_i | \overline{\log \mathcal{B}}, \sigma_{\log \mathcal{B}}, \sigma_i), \quad (9)$$

где  $n$  – число звезд в группе.



**Рис. 2.** Функции распределения среднеквадратичного магнитного поля (пунктир) О-звезд (слева) и В-звезд (справа). Сплошная линия показывает аппроксимацию логарифм-нормальным распределением

Параметры функции распределения  $\bar{\eta} = \overline{\log \mathcal{B}}$  и  $\sigma_{\eta} = \sigma_{\log \mathcal{B}}$  среднеквадратичных магнитных полей рассматриваемой группы звезд могут быть найдены из условия максимума логарифма *функции правдоподобия* (с обратным знаком)  $-\ln \mathcal{L}$ . На рис. 2 показаны аппроксимации функции распределения магнитного поля О- и В-звезд, полученные методом наименьших квадратов. Такие же аппроксимации были получены нами для других групп звезд. Ошибка средних значений  $\log \mathcal{B}$  и  $\sigma_{\log \mathcal{B}}$  не превосходит 0.12 dex, что свидетельствует о хорошем качестве полученных нами аппроксимаций.

**Таблица 1.** Средние значения магнитных полей и магнитных потоков и их стандартных отклонений для магнитных ОВА-звезд, WM-звезд, пульсаров и магнитаров

Группа звезд	Число звезд	$\overline{\log(\mathcal{B})}$	$\sigma_{\log \mathcal{B}}$	$\overline{\log(\Phi)}$	$\sigma_{\log \Phi}$	Ссылка
О-звезды	14	$2.56 \pm 0.13$	$0.48 \pm 0.10$	$27.6 \pm 0.12$	$0.62 \pm 0.01$	Наст. раб.
–	10	$2.62 \pm 0.16$	$0.26^{+0.24}_{-0.11}$	–	–	M21
В-звезды	141	$2.70 \pm 0.04$	$0.49 \pm 0.03$	$26.6 \pm 0.04$	$0.49 \pm 0.03$	Наст. раб.
–	90	$2.83 \pm 0.10$	$0.65 \pm 0.09$	–	–	M21
А-звезды	121	$2.70 \pm 0.04$	$0.44 \pm 0.03$	$26.3 \pm 0.01$	$0.47 \pm 0.01$	Наст. раб.
–	93	$3.06 \pm 0.11$	$0.66 \pm 0.07$	–	–	M21
WM-звезды	19	$0.10 \pm 0.12$	$0.51 \pm 0.09$	$23.1 \pm 0.11$	$1.23 \pm 0.09$	Наст. раб.
–	5	$0.15 \pm 0.50$	$0.65^{+0.57}_{-0.27}$	–	–	M21
ОВ-звезды	51	$2.57 \pm 0.07$	$0.51 \pm 0.05$	$27.0 \pm 0.05$	$0.70 \pm 0.04$	Наст. раб.
ОВА-звезды	276	$2.69 \pm 0.03$	$0.47 \pm 0.02$	$26.5 \pm 0.02$	$0.52 \pm 0.02$	Наст. раб.
Радиопульсары	2061	$12.09 \pm 0.01$	$0.51 \pm 0.01$	$24.1 \pm 0.03$	$0.51 \pm 0.01$	Наст. раб.
Магнитары	21	$14.38 \pm 0.08$	$0.53 \pm 0.07$	$26.6 \pm 0.11$	$0.41 \pm 0.07$	Наст. раб.

M21 = Makarenko et al. (2021b)

Средние значения величин  $\overline{\log(\mathcal{B})}$  и соответствующих стандартных отклонений  $\sigma_{\log \mathcal{B}}$  для групп О-, В- и А-звезд, а также для всех магнитных ОВА-звезд и слабомагнитных звезд даны в таблице 1 (3 и 4 столбцы). Во втором столбце таблицы указаны числа звезд с измеренными магнитными полями для указанных групп звезд. Эти значения сравниваются с полученными Makarenko et al. (2021b).

Значения  $\overline{\log(\mathcal{B})}$  и  $\sigma_{\log \mathcal{B}}$ , полученные в настоящей работе, слегка отличаются от рассчитанных в статье Makarenko et al. (2021b) вследствие увеличения числа объектов в наших выборках ОВА- и слабомагнитных звезд. Однако во всех случаях эти различия не превышают трех стандартных отклонений.

Также мы добавили в таблице 1 характеристики функций распределения магнитных полей для ансамбля магнитных ОВ-звезд, в который мы включили О- и В0–В2-звезды, большинство из которых взрываются как сверхновые и становятся нейтронными звездами.

В последних строках таблицы представлены параметры функций распределения магнитных полей нейтронных звезд, отдельно для нормальных нейтронных звезд (радиопульсаров) и магнитаров.

## 2.4 Распределение магнитных потоков

Магнитные потоки звезд с известными значениями среднеквадратичного магнитного поля  $\mathcal{B}$  рассчитывались по следующей формуле (Kholtygin et al., 2010a):

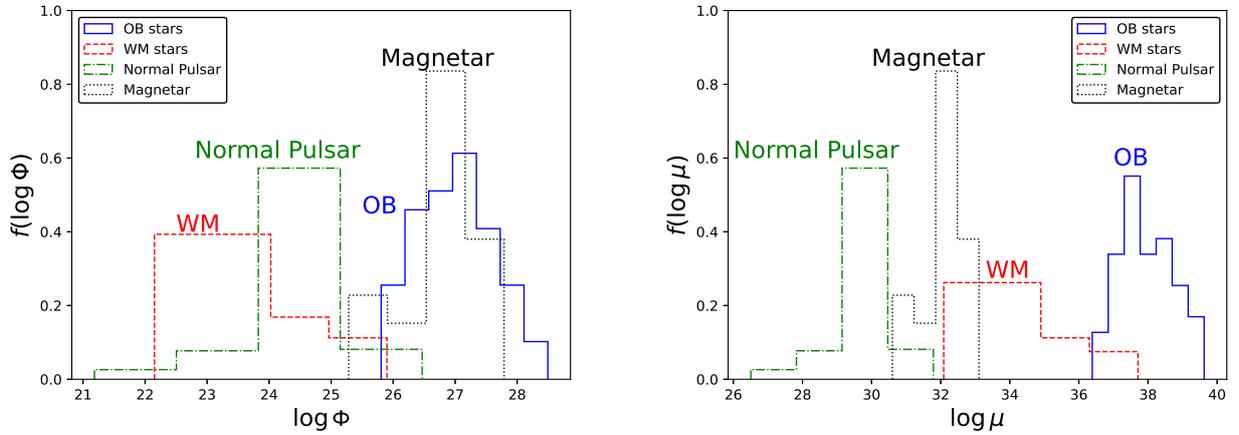
$$\Phi \approx 4\pi\mathcal{B}R_*^2. \quad (10)$$

Радиусы звезд  $R_*$  были взяты из публикаций, цитированных в подразделе 2.2.

При расчете магнитных потоков нейтронных звезд (радиопульсаров и магнитаров) следует учитывать отличие поверхностного магнитного поля  $B_s$ , определенного формулой (4), от среднеквадратичного магнитного поля  $\mathcal{B}$ . Согласно (Ferrario and Wickramasinghe, 2006, их формула (2), см. также Kholtygin et al., 2010b)  $B_s = \Phi/\pi R_*^2$ , то есть  $B_s \approx 4\mathcal{B}$ . В этом случае для нейтронных звезд следует использовать следующее соотношение:

$$\Phi = \pi B_s R_*^2. \quad (11)$$

Функции распределения магнитных потоков были получены таким же способом, как и в случае магнитных полей. На рисунке 3 (слева) даны такие функции распределения для ОВА- и слабомагнитных звезд, а также нормальных пульсаров и магнитаров, полученные по измеренным магнитным полям.

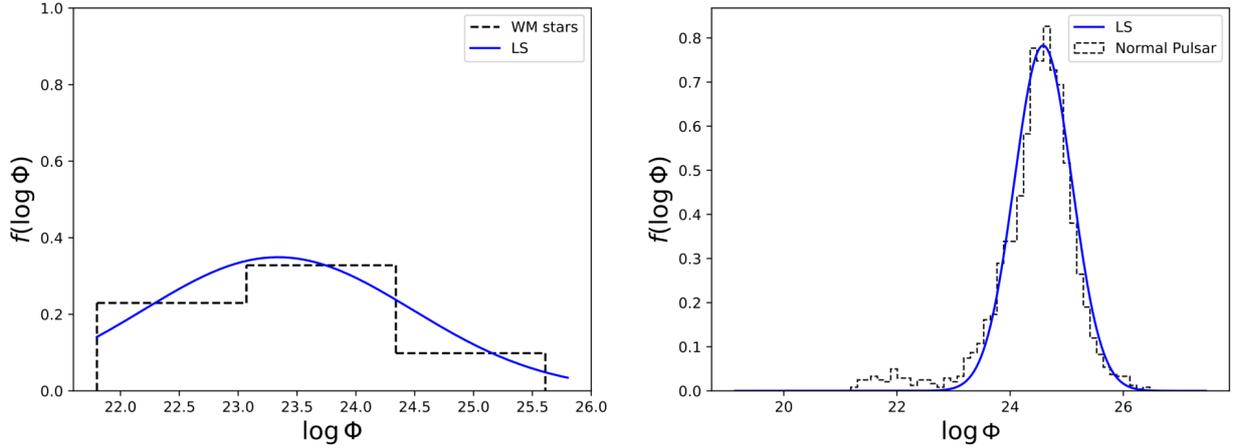


**Рис. 3.** Функции распределения магнитных потоков (слева) и магнитных моментов (справа) ОВА-звезд, слабомагнитных звезд, нормальных пульсаров и магнитаров

Результаты нашего анализа показали, что магнитные потоки, также как и среднеквадратичные магнитные поля, могут быть описаны логарифм-нормальным распределением. Параметры распределения для всех рассматриваемых групп звезд были определены методом, описанным в подразделе 2.3.

В 5 и 6 столбцах таблицы 1 приводятся определенные нами параметры распределения магнитных потоков  $\log(\Phi)$  и  $\sigma_{\log \Phi}$  для всех анализируемых нами групп звезд. В последних строках таблицы даны средние значения магнитных потоков и соответствующие стандартные отклонения для пульсаров и магнитаров. Полученные аппроксимации иллюстрируются на рис. 4 для WM-звезд и нормальных пульсаров.

Средние значения магнитных потоков для магнитаров и ОВ-звезд близки. Такая близость была отмечена ранее Igoshev and Kholtygin (2011), Kholtygin and Makarenko (2019), Makarenko et al. (2020),



**Рис. 4.** Функции распределения магнитных потоков (пунктир) слабомагнитных звезд (слева) и нормальных пульсаров (справа). Аппроксимации логарифм-нормальным распределением показаны сплошной линией

Makarenko et al. (2021a), Makarenko et al. (2021b). Kholtygin and Makarenko (2019) отметили близость магнитных потоков нормальных пульсаров и слабомагнитных звезд.

В то же время полученные в настоящей работе средние магнитные потоки радиопулсаров превышают магнитные потоки слабомагнитных звезд на порядок величины. Возможно такое превышение связано с увеличением магнитных потоков во время гравитационного коллапса магнитных звезд в результате быстрых динамо-процессов. Отметим также, что выборка слабомагнитных звезд пока мала и такое превышение, по крайней мере частично, может быть связано с малостью выборки.

## 2.5 Совместные распределения магнитных полей и магнитных потоков для магнитных и слабомагнитных звезд

Представленные в подразделах 2.3 и 2.4 распределения магнитных полей и магнитных потоков относятся отдельно к магнитным и слабомагнитным звездам. В то же время представляется целесообразным рассматривать все звезды данных спектральных классов (типов) по отношению к величине их магнитного поля (магнитного потока) как единый ансамбль.

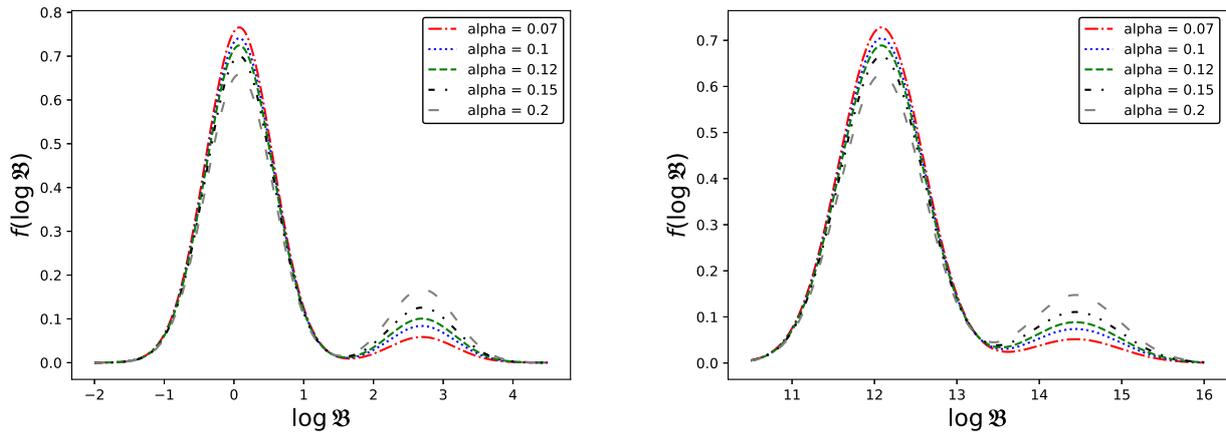
Пусть нам известны функция распределения магнитных полей магнитных ОВА-звезд  $f_M(\overline{\log \mathcal{B}})$  и соответствующая функция распределения для слабомагнитных звезд  $f_{WM}(\overline{\log \mathcal{B}})$ . Предположим, что доля магнитных звезд в полном ансамбле звезд какого-либо типа составляет  $\alpha$ , тогда доля  $1 - \alpha$  относится к слабомагнитным звездам. Полная функция распределения магнитных полей всего ансамбля ОВА-звезд может быть выражена следующим образом:

$$f_{\text{ОВА}}(\overline{\log \mathcal{B}}) = (1 - \alpha)f_{WM}(\overline{\log \mathcal{B}}) + \alpha f_M(\overline{\log \mathcal{B}}). \quad (12)$$

Результаты применения формулы (12) к ансамблям ОВА- и нейтронных звезд иллюстрируются на рис. 5. Доля магнитаров среди известных нейтронных звезд составляет  $\sim 1\%$ . В то же время вследствие крайне короткого времени жизни самих магнитаров и трудности обнаружения магнитаров по сравнению с детектированием радиопулсаров реальная доля магнитаров должна быть значительно больше. По этой причине в этом и следующем рисунке мы используем для нейтронных звезд те же значения параметра  $\alpha$ , что и для ОВА-звезд.

На рисунке видно ярко выраженное бимодальное распределение магнитных полей для этих групп звезд. Формы распределения для этих существенно различных групп звезд близки, хотя абсолютные значения среднеквадратичных магнитных полей различаются на  $\sim 12$  порядков.

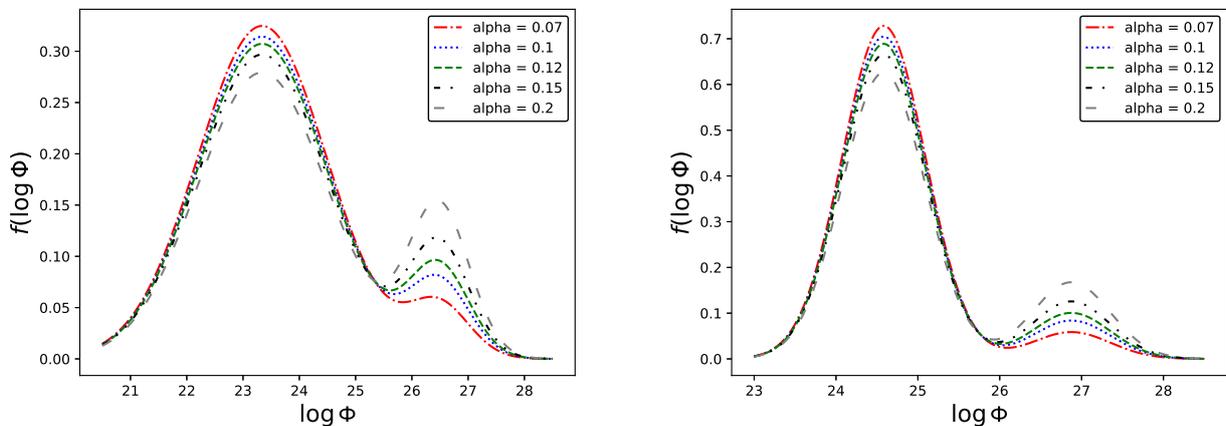
В то же время разность максимумов распределения среднеквадратичных магнитных полей для магнитных и слабомагнитных ОВ-звезд, а также для радиопулсаров и магнитаров составляет  $\sim 2.2$ – $2.5$  dex. Почти такая же разность значений средних магнитных полей нормальных пульсаров и магнитаров получена Makarenko et al. (2021b). То есть в первом приближении распределение магнитных



**Рис. 5.** Полные функции распределения среднеквадратичных магнитных полей ОВА-звезд (слева) и нейтронных звезд (справа) для различных значений параметра  $\alpha$

полей нейтронных звезд представляет собой распределение магнитных полей ОВА-звезд, сдвинутое на  $\sim 12$  порядков.

Важная особенность рассматриваемых функций распределения – существенно большая высота пика распределения магнитных полей для слабомагнитных звезд по сравнению с магнитными звездами. В то же время число звезд с измеренными магнитными полями в этой области не превышает двух десятков. То есть область среднеквадратичных магнитных полей до нескольких десятков гаусс является *terra incognita* физики магнитных полей и поэтому представляет большой интерес для будущих исследователей.



**Рис. 6.** То же, что на рис. 5, но для магнитных потоков

На рис. 6 представлены полные функции распределения магнитных потоков ОВА- и нейтронных звезд для различных значений параметра  $\alpha$ . Также как для магнитных полей, формы распределений похожи, однако в данном случае как распределения магнитных потоков, так и положения пиков распределений близки.

Близость магнитных потоков ОВА- и нейтронных звезд свидетельствует в пользу предположения о сохранении магнитных потоков после взрыва сверхновых звезд и формирования нейтронных звезд. Такая гипотеза была предложена ранее Ferrario et al. (2009). В то же время полученное в указанной работе распределение магнитных потоков (их рис. 4) соответствует распределению магнитных потоков только слабых магнитных звезд.

В предложенном в настоящей работе подходе возможно описать функции распределения магнитных полей и магнитных потоков как магнитных, так и слабомагнитных звезд единым образом.

### 3 Распределение магнитных моментов

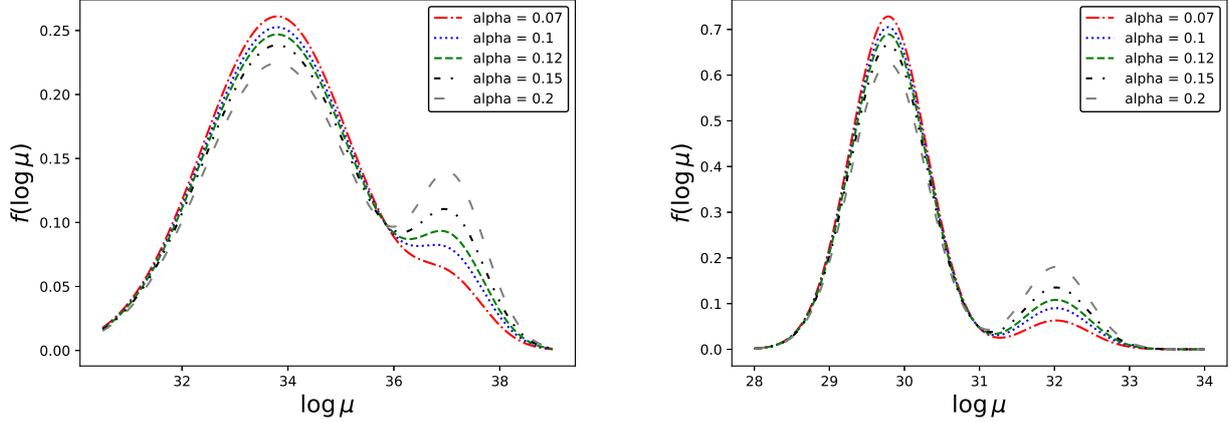


Рис. 7. То же, что на рис. 5, но для магнитных моментов

Важной величиной, характеризующей глобальные магнитные свойства звезд, являются их магнитные моменты  $\mu$ . Согласно [Arge et al. \(1995\)](#), магнитный момент звезды с полярным полем  $B_p$  и радиусом  $R_*$

$$\mu = \frac{1}{2} B_p R_*^3. \quad (13)$$

Для проверки гипотезы о сохранении магнитных моментов массивных звезд во время их эволюции от главной последовательности до формирования нейтронных звезд построим функции распределения магнитных моментов согласно методике, описанной в подразделе 2.3. Полученные распределения, рассчитанные согласно данным, цитированным в подразделе 2.2, представлены на рис. 3 (справа). Из анализа рисунка видно, что средние магнитные потоки нормальных пульсаров и магнитаров на  $\sim 5$  порядков меньше, чем соответствующие величины для их предшественников – слабомагнитных и магнитных массивных звезд, – что противоречит гипотезе о сохранении магнитных моментов.

Таблица 2. Средние значения магнитных моментов и их стандартных отклонений для ОВА-, WM-звезд, пульсаров и магнитаров

Группа звезд	Число звезд	$\overline{\log \mu}$	$\sigma_{\log \mu}$
О-звезды	14	$38.8 \pm 0.04$	$0.62 \pm 0.04$
В-звезды	141	$37.3 \pm 0.04$	$0.55 \pm 0.03$
А-звезды	121	$36.9 \pm 0.01$	$0.51 \pm 0.01$
WM-звезды	19	$33.6 \pm 0.14$	$1.33 \pm 0.11$
ОВ-звезды	51	$37.9 \pm 0.14$	$0.89 \pm 0.12$
ОВА-звезды	276	$37.1 \pm 0.03$	$0.62 \pm 0.02$
Радиопулсары	2061	$29.9 \pm 0.01$	$0.51 \pm 0.01$
Магнитары	21	$32.1 \pm 0.02$	$0.44 \pm 0.02$

Проведенный нами анализ показал, что функции распределения магнитных моментов можно, как и в случае магнитных полей и магнитных потоков, описать логарифм-нормальным распределением:

$$f(\log \mu | \overline{\log \mu}, \sigma_{\log \mu}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\log \mu}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\log \mu - \overline{\log \mu}}{\sigma_{\log \mu}} \right)^2}. \quad (14)$$

Параметры распределения (14) для всех рассмотренных нами групп звезд получены также как и для среднеквадратичных магнитных полей и магнитных потоков и даны в таблице 2.

Полные функции распределения магнитных моментов ОВА- и нейтронных звезд представлены на рис. 7.

## 4 Заключение

На основе анализа выполненных в последнее время измерений магнитных полей ОВА-звезд, а также оценок магнитных полей нейтронных звезд исследованы статистические свойства среднеквадратичных магнитных полей, магнитных потоков и магнитных моментов перечисленных групп звезд.

Показано, что распределение указанных величин является логарифм-нормальным. Построены полные функции распределения этих величин.

Полученные данные позволяют сделать вывод о существовании общей функции распределения магнитных полей всех ОВА-звезд, как магнитных, так и слабомагнитных. Приведены свидетельства в пользу ранее сделанного вывода, что магнитары являются потомками магнитных ОВ-звезд, а предшественниками нормальных пульсаров являются слабомагнитные ОВ-звезды.

Показано, что в ходе эволюции массивных звезд от главной последовательности до образования нейтронных звезд их магнитные моменты уменьшаются в среднем на 5 порядков.

**Благодарности.** Авторы статьи выражают признательность за поддержку грантом РФФИ 19-02-00311 А. Также авторы благодарны рецензенту за полезные замечания, способствовавшие улучшению текста статьи.

## Литература

- Alecian E., Kochukhov O., Petit V., et al., 2014. *Astron. Astrophys.*, vol. 567, A28.
- Alecian E., Tkachenko A., Neiner C., Folsom C.P., Leroy B., 2016. *Astron. Astrophys.*, vol. 589, A47.
- Alecian E., Villebrun F., Grunhut J., et al., 2019. In Brun A., Mathis S., Charbonnel C., Dubrulle B. (Eds), EAS Publications Series. vol. 82, pp. 345–355, doi:10.1051/eas/1982030 (arXiv:1705.10650).
- Arge C.N., Mullan D.J., Dolginov A.Z., 1995. *Astrophys. J.*, vol. 443, p. 795.
- Aurière M., Wade G.A., Silvester J., et al., 2007. *Astron. Astrophys.*, vol. 475, no. 3, pp. 1053–1065.
- Blazère A., Neiner C., Petit P., 2016a. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 459, no. 1, pp. L81–L84.
- Blazère A., Petit P., Lignières F., et al., 2016b. *Astron. Astrophys.*, vol. 586, A97.
- Borra E.F., Landstreet J.D., Thompson I., 1983. *Astrophys. J. Suppl.*, vol. 53, pp. 151–167.
- Braithwaite J., Nordlund Å., 2006. *Astron. Astrophys.*, vol. 450, no. 3, pp. 1077–1095.
- Braithwaite J., Spruit H.C., 2004. *Nature*, vol. 431, no. 7010, pp. 819–821.
- Briquet M., Hubrig S., Schöller M., De Cat P., 2007. *Astron. Nachr.*, vol. 328, no. 1, pp. 41–45.
- Bychkov V.D., Bychkova L.V., Madej J., 2009. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 394, no. 3, pp. 1338–1350.
- Castro N., Fossati L., Hubrig S., et al., 2015. *Astron. Astrophys.*, vol. 581, A81.
- Cowling T.G., 1945. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 105, p. 166.
- Duez V., Braithwaite J., Mathis S., 2010. *Astroph. J. Lett.*, vol. 724, no. 1, pp. L34–L38.
- Duez V., Mathis S., 2010. *Astron. Astrophys.*, vol. 517, A58.
- Elkin V.G., Mathys G., Kurtz D.W., Hubrig S., Freyhammer L.M., 2010. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 402, no. 3, pp. 1883–1891.
- Ferrario L., Pringle J.E., Tout C.A., Wickramasinghe D.T., 2009. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 400, no. 1, pp. L71–L74.
- Ferrario L., Wickramasinghe D., 2006. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 367, no. 3, pp. 1323–1328.
- Folsom C.P., Likuski K., Wade G.A., et al., 2013. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 431, no. 2, pp. 1513–1527.
- Grunhut J.H., Rivinius T., Wade G.A., et al., 2012. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 419, no. 2, pp. 1610–1627.
- Grunhut J.H., Wade G.A., Leutenegger M., et al., 2013. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 428, no. 2, pp. 1686–1695.

- Grunhut J.H., Wade G.A., Marcolino W.L.F., et al., 2009. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 400, no. 1, pp. L94–L98.
- Henrichs H.F., Kolenberg K., Plaggenborg B., et al., 2012. *Astron. Astrophys.*, vol. 545, A119.
- Hubrig S., Kurtz D.W., Schöller M., et al., 2012a. In Shibahashi H., Takata M., Lynas-Gray A.E. (Eds), *Progress in Solar/Stellar Physics with Helio- and Asteroseismology*. *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.*, vol. 462, p. 318.
- Hubrig S., Schöller M., Kholtygin A.F., 2014. doi:10.1093/mnras/stu388, vol. 440, no. 2, pp. 1779–1785.
- Hubrig S., Schöller M., Kholtygin A.F., et al., 2012b. *Astron. Astrophys.*, vol. 546, L6.
- Hubrig S., Schöller M., Schnerr R.S., et al., 2008. *Astron. Astrophys.*, vol. 490, no. 2, pp. 793–800.
- Igoshev A.P., Kholtygin A.F., 2011. *Astron. Nachr.*, vol. 332, p. 1012.
- Järvinen S.P., Hubrig S., Ilyin I., Schöller M., Briquet M., 2017. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 464, no. 1, pp. L85–L89.
- Kholtygin A.F., Drake N.A., Fabrika S.N., 2011. In Romanyuk I., Kudryavtsev D. (Eds), *Magnetic Stars*. pp. 239–252.
- Kholtygin A.F., Fabrika S.N., Drake N.A., et al., 2010b. *Astron. Lett.*, vol. 36, no. 5, pp. 370–379.
- Kholtygin A.F., Fabrika S.N., Drake N.A., et al., 2010a. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*, vol. 26, no. 4, pp. 181–191.
- Kholtygin A.F., Makarenko E.I., 2019. In Kudryavtsev D.O., Romanyuk I.I., Yakunin I.A. (Eds), *Physics of Magnetic Stars*. *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.*, vol. 518, p. 108.
- Landstreet J.D., Silaj J., Andretta V., et al., 2008. *Astron. Astrophys.*, vol. 481, no. 2, pp. 465–480.
- Lignières F., Petit P., Böhm T., Aurière M., 2009. *Astron. Astrophys.*, vol. 500, no. 3, pp. L41–L44.
- Makarenko E.I., Igoshev A.P., Kholtygin A.F., 2021b. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 504, no. 4, pp. 5813–5828.
- Makarenko E.I., Igoshev A.P., Kholtygin A.F., 2020. In Neiner C., Weiss W.W., Baade D. et al. (Eds), *Stars and their Variability Observed from Space*. pp. 375–376.
- Makarenko E.I., Igoshev A.P., Kholtygin A.F., 2021a. In Makarenko E.I., Igoshev A.P., Kholtygin A.F. (Eds), *MOBSTER-1 virtual conference: Stellar Variability as a Probe of Magnetic Fields in Massive Stars*. p. 21, doi:10.5281/zenodo.5525449.
- Manchester R.N., Hobbs G.B., Teoh A., Hobbs M., 2005b. *VizieR Online Data Catalog*, VII/245.
- Manchester R.N., Hobbs G.B., Teoh A., Hobbs M., 2005a. *Astron. J.*, vol. 129, no. 4, pp. 1993–2006.
- Mathys G., 2017. *Astron. Astrophys.*, vol. 601, A14.
- Moss D., 2003. *Astron. Astrophys.*, vol. 403, pp. 693–697.
- Neiner C., Buysschaert B., Oksala M.E., Blazère A., 2015. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 454, no. 1, pp. L56–L60.
- Neiner C., Oksala M.E., Georgy C., et al., 2017. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 471, no. 2, pp. 1926–1935.
- Olausen S.A., Kaspi V.M., 2014. *VizieR Online Data Catalog*, J/ApJS/212/6.
- Pasinetti Fracassini L.E., Pastori L., Covino S., Pozzi A., 2001. *Astron. Astrophys.*, vol. 367, pp. 521–524.
- Petit P., Lignières F., Aurière M., et al., 2011. *Astron. Astrophys.*, vol. 532, L13.
- Petit V., Owocki S.P., Wade G.A., et al., 2013. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 429, no. 1, pp. 398–422.
- Rhee J.H., Song I., Zuckerman B., McElwain M., 2007. *Astrophys. J.*, vol. 660, no. 2, pp. 1556–1571.
- Romanyuk I.I., Semenko E.A., Yakunin I.A., Kudryavtsev D.O., Moiseeva A.V., 2017. *Astron. Nachr.*, vol. 338, no. 8, pp. 919–925.
- Seach J.M., Marsden S.C., Carter B.D., et al., 2020. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 494, no. 4, pp. 5682–5703.
- Shultz M., Wade G.A., 2017. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 468, no. 4, pp. 3985–3992.
- Shulyak D., Paladini C., Li Causi G., Perraut K., Kochukhov O., 2014. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 443, no. 2, pp. 1629–1642.
- Sikora J., Wade G.A., Bohlender D.A., et al., 2016. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 460, no. 2, pp. 1811–1828.
- Sikora J., Wade G.A., Power J., Neiner C., 2019. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 483, no. 3, pp. 3127–3145.
- Stütz C., Ryabchikova T., Weiss W.W., 2003. *Astron. Astrophys.*, vol. 402, pp. 729–731.

- Wade G.A., Barbá R.H., Grunhut J., et al., 2015. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 447, no. 3, pp. 2551–2567.
- Wade G.A., Grunhut J., Gräfener G., et al., 2012a. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 419, no. 3, pp. 2459–2471.
- Wade G.A., Grunhut J., Gräfener G., et al., 2012b. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 419, no. 3, pp. 2459–2471.
- Wade G.A., Howarth I.D., Townsend R.H.D., et al., 2011. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 416, no. 4, pp. 3160–3169.
- Wade G.A., Maíz Apellániz J., Martins F., et al., 2012c. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 425, no. 2, pp. 1278–1293.

## Statistics of OBA star magnetic fields

*A.F. Kholtygin, D.N. Mokshin*

St. Petersburg State University, Universitetskii pr. 28, Saint-Petersburg 198504, Russia  
*afkholtygin@gmail.com*

**Abstract.** Recent measurements of the OBA star magnetic fields show that these are distributed according to the logarithm-normal law with an average value of  $\log(\mathcal{B}) \sim 2.6-2.8$  and a standard deviation of  $\sigma \sim 0.25-0.66$ , where  $\mathcal{B}$  is the *rms* magnetic field in G.

The fraction of magnetic OBA stars with measured magnetic fields (*magnetic stars* in the present paper) is 7–12%. No magnetic fields were detected in the remaining array of OBA stars until recently. Improvement of the technique for measuring magnetic fields over the past 5–7 years made it possible to detect weak magnetic fields for  $\sim 10$  BA stars with a  $\mathcal{B}$  from  $\sim 0.2$  to  $\sim 15$  G. The distribution of the magnetic fields of these weakly magnetic stars is also logarithm-normal with the same variance as for magnetic OB stars but with an average  $\log(\mathcal{B}) \sim 0.15$ . We assumed that this distribution is valid for all OBA stars with unmeasured magnetic fields.

With the radii of these stars we obtain the distribution of the magnetic fluxes and magnetic moments of both magnetic and weakly magnetic stars. It is shown that the magnetic fields, magnetic fluxes, and magnetic moments of all magnetic OBA stars can be described by common distribution functions. The average magnetic fluxes  $\Phi$  (in  $\text{G}\cdot\text{cm}^2$ ) of magnetic and weakly magnetic OB stars are  $\log(\Phi) \sim 26.3$  and  $\sim 23.1$ , which is close to the corresponding values for magnetars and radio pulsars, respectively.

The data obtained allow us to conclude that there is a common distribution for the magnetic fields of all OB stars, both magnetic and weakly magnetic. Such distributions in dependence of a fraction of magnetic stars are presented. The magnetic moments of radio pulsars and magnetars are shown to be 5 orders of magnitude smaller than the corresponding values for weakly magnetic and magnetic stars.

**Key words:** stars, magnetic fields, statistics