

УДК 524.3-337

ТРИ ТРЕХДИПОЛЬНЫЕ ЗВЕЗДЫ

© 2017 Ю. В. Глаголевский*, А. Ф. Назаренко

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 01 февраля 2017 года; принята в печать 30 июня 2017 года

Рассмотрены структуры магнитных полей трех трехдипольных магнитных звезд HD 18078, HD 37776 и HD 149438. Совпадение модельных и наблюдаемых фазовых зависимостей $B_e(\Phi)$ и $B_s(\Phi)$ у звезды HD 18078 при одних и тех же параметрах диполей убедительно показывает, что глобальные магнитные структуры формируются именно дипольными структурами. Магнитные полюса четко выделяются на меркаторских картах распределения магнитного поля, и в них наблюдается максимальная величина поля, равная у перечисленных звезд соответственно $B_p = 3577, 10\,700$ и 275 Гс. Применение дипольных моделей позволяет рассмотреть структуры магнитных полей внутри звезд.

Ключевые слова: *звезды: магнитные поля — звезды: индивидуальные: HD 18078, HD 37776, HD 149438*

1. ВВЕДЕНИЕ

Систематические работы по моделированию крупномасштабных структур магнитных полей химически пекулярных звезд начались в САО РАН в 1997 г. Методика моделирования описана в работах [1, 2]. В ее основу положена гипотеза, что глобальные магнитные структуры формируются намагниченными фрагментами внутри звезд и могут быть описаны достаточно хорошо виртуальными теоретическими магнитными диполями. Крупномасштабные магнитные структуры вследствие медленной омической диссипации сохраняются в течение всей жизни звезд, тогда как для мелкомасштабной фракции характерно быстрое омическое затухание. Отношение крупномасштабной и мелкомасштабной фракций магнитного поля постепенно увеличивается с возрастом практически до конца жизни звезды на Главной последовательности [3]. Параметры и число диполей подбираются путем итераций. В результате мы получаем комплекс данных, описывающих структуру магнитного поля одного или нескольких диполей [4]. Есть несколько видов типичных магнитных крупномасштабных конфигураций: 1) диполь находится в центре звезды, 2) диполь смещен из центра вдоль его оси, 3) диполь смещен поперек оси, 4) внутри звезды имеется два или три диполя. Возможно, в природе существуют и более сложные конфигурации, но точность измерений магнитного поля недостаточна для их выявления. При изучении таких объектов необходимо использовать метод

доплер-зеemanовского картирования. В данной работе рассматриваются три звезды с трехдипольной конфигурацией крупномасштабного магнитного поля.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты их моделирования приведены в таблице. В первом столбце указан номер звезды, во втором — номер монополя, в третьем — величина магнитного заряда в единицах максимального из них, далее идут координаты монополей: долгота λ и широта δ . В последних столбцах дано расстояние монополей от центра Δa и расстояние между монополями Δl в единицах радиуса звезды, а также величины R/R_z , где R — радиус звезды в настоящее время, а R_z — ее радиус на ZAMS. Величины R/R_z для HD 37776 и HD 149438 показывают, что звезды находятся близки ZAMS. Этих данных достаточно для построения схем распределения магнитного поля по поверхности и внутри звезд. Далее рассмотрим подробно свойства каждого изучаемого объекта.

2.1. HD 18078 (SrCrEu)

Для звезды HD 18078 известны обе фазовые зависимости — продольного поля $B_e(\Phi)$ и среднего поверхностного поля $B_s(\Phi)$ [5]. Измерения выполнены по линиям металлов. Угол наклона звезды к лучу зрения i и параметры магнитного поля определяются в процессе моделирования с использованием обеих фазовых зависимостей. В случае правильной модели и корректных измерений

*E-mail: glagol@sao.ru

Параметры магнитного поля исследованных звезд

| HD | N | Заряд | λ , deg | δ , deg | Δa , R_* | Δl , R_* | R/R_z |
|--------|-----|-------|-----------------|----------------|--------------------|--------------------|---------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) |
| 18078 | 1 | +1 | 176 | 0 | 0.2 | 0.08 | 2.5 |
| | 2 | -1 | 196 | 0 | 0.2 | | |
| | 3 | +0.88 | 277 | 0 | 0.2 | 0.07 | |
| | 4 | -0.88 | 296 | 0 | 0.2 | | |
| | 5 | +0.86 | 342 | 0 | 0.2 | 0.07 | |
| | 6 | -0.86 | 361 | -2 | 0.2 | | |
| 37776 | 1 | +1 | 355 | +0.2 | 0.5 | 0.42 | 1.1 |
| | 2 | -1 | 55 | 0 | 0.5 | | |
| | 3 | +1 | 145 | +5 | 0.5 | 0.35 | |
| | 4 | -1 | 185 | +3 | 0.5 | | |
| | 5 | +1 | 255 | 0 | 0.5 | 0.22 | |
| | 6 | -1 | 280 | +15 | 0.5 | | |
| 149438 | 1 | -1 | 143 | -5 | 0.4 | 0.52 | 1.0 |
| | 2 | +1 | 185 | 0 | 0.4 | | |
| | 3 | -0.64 | 255 | -5 | 0.4 | 0.36 | |
| | 4 | +0.64 | 285 | 0 | 0.4 | | |
| | 5 | -0.38 | 355 | -5 | 0.4 | 0.14 | |
| | 6 | +0.38 | 80 | +5 | 0.4 | | |

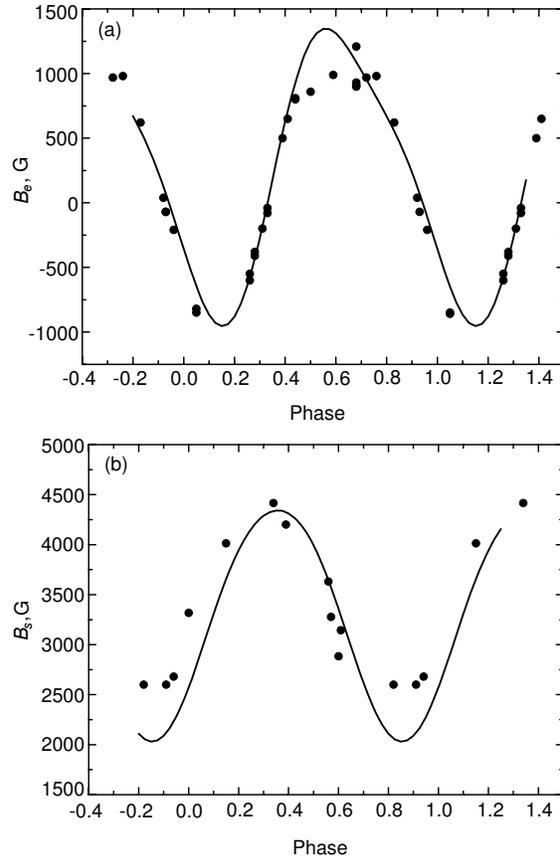


Рис. 1. Фазовые зависимости изменения магнитного поля HD 18078: (а) продольного поля $B_e(\Phi)$, (б) среднего поверхностного магнитного поля $B_s(\Phi)$. Точки — измеренные величины, сплошная линия — модель.

они должны оказаться одинаковыми при описании обеих фазовых зависимостей. Экстремумы зависимостей у данной звезды не совпадают по фазе (рис. 1а и 1б), этим она отличается от звезд, у которых структура магнитного поля соответствует модели одиночного диполя. По этой причине сначала была рассмотрена модель с двумя диполями. В первом приближении модельные и наблюдаемые фазовые зависимости получаются при одном и том же угле $i = 20^\circ$. Однако оказалось, что вычисленная фазовая зависимость $B_e(\Phi)$ сильно отклоняется от наблюдаемой зависимости в фазах 0.6–1.0, что указывает на наличие более сложной структуры. Поэтому следующим шагом стала проверка модели с тремя диполями. В результате получены модельные фазовые зависимости $B_e(\Phi)$ и $B_s(\Phi)$ (см. рис. 1а, 1б), отличающиеся от наблюдений в пределах 3σ , но они получены при несколько различающихся углах i : для зависимости $B_e(\Phi)$ лучше подходит угол $i = 20^\circ$, а для $B_s(\Phi)$ — $i = 30^\circ$. Различие небольшое и может быть объяснено тем, что измерения величин B_s недостаточно точны, кроме того, они искажены влиянием переналоженания зеемановских компонент спектральных линий от областей с разным знаком поля на видимой

полусфере, либо имеет место наличие достаточно крупных магнитных фрагментов, помимо основных трех. Изменение угла i смещает зависимость $B_s(\Phi)$ вдоль оси B_s . Оказалось, что диполи расположены в плоскости экватора вращения, как у большинства магнитных звезд. На рис. 2а представлена схема распределения силовых линий магнитного поля внутри звезды в плоскости экватора вращения, а на рис. 2б — схема распределения величины магнитного поля. Расстояние монополей от центра звезды равно $\Delta a = 0.2 \pm 0.1 R_*$, расстояние между монополями $\Delta l \approx 0.07 R_*$. Последнее говорит о том, что распределение магнитного поля у звезды HD 18078 не вполне соответствует полю точечных теоретических диполей, для которых $\Delta l = 0$. Кроме того, небольшое отклонение точек от модельной кривой на зависимости $B_e(\Phi) = 0.6$, возможно, связано с наличием четвертого намагниченного фрагмента. Для подтверждения этой гипотезы необходимы более точные измерения, особенно для $B_s(\Phi)$. Температура звезды $T = 9200$ К, следовательно, радиус конвективного ядра невелик — примерно $0.09 R_*$. Вряд ли оно сильно влияет на внутреннюю

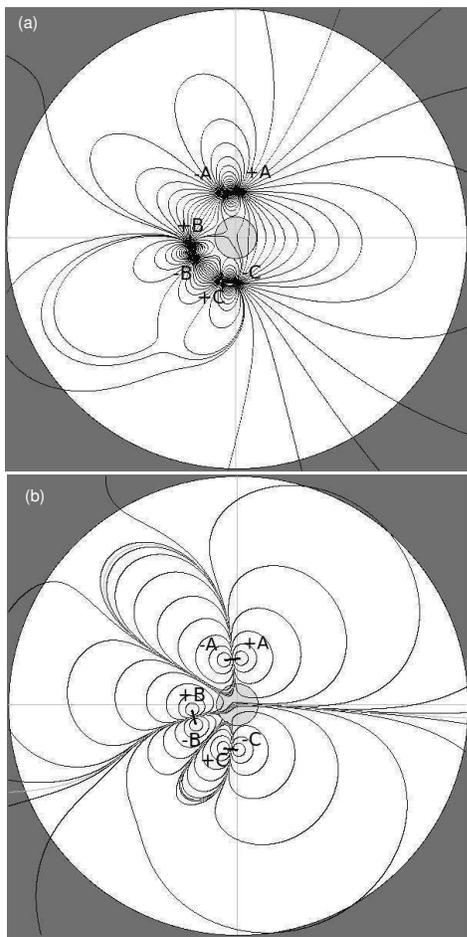


Рис. 2. Распределение магнитного поля в плоскости экватора вращения HD 18078: (а) распределение силовых линий, (б) распределение величины магнитного поля. Круг в центре звезды — конвективное ядро.

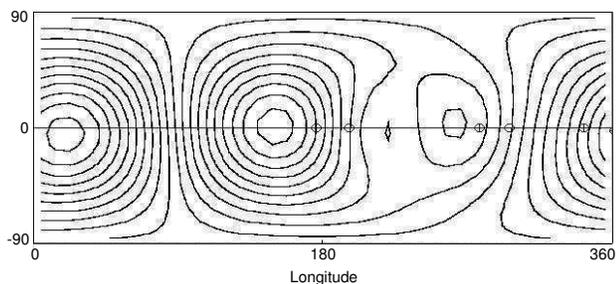


Рис. 3. Распределение магнитного поля по поверхности HD 18078.

структуру магнитного поля. Положение конвективного ядра на рисунке отмечено кружком. Очевидно, что силовые линии должны обходить ядро. Из-за сложной поверхностной структуры магнитного поля области с разной полярностью перекрываются на видимой полусфере, поэтому прямые измерения B_s с достаточной точностью вряд ли возможны. Намагниченные области слегка вытянуты по

окружностям, что, кстати, наблюдается и у других магнитных звезд. Это видно по заметным величинам Δl в таблице. Напряженность магнитного поля монополей у трех диполей разная, их соотношение равно $1 : 0.88 : 0.86$. Это соотношение учитывалось при построении структур магнитного поля внутри звезды на рис. 2а, 2б. Полученное распределение магнитного поля показывает, что внутри звезды находятся три сильно намагниченные крупномасштабные области. Максимальная величина поля на магнитном полюсе $B_p = 3577$ Гс. Складываясь, магнитные поля создают наблюдаемое распределение по поверхности и внутри звезды (рис. 3).

2.2. HD 37776 (HE-R)

Звезда изучалась нами в работах [6, 7] по данным из [8]. Измерения магнитного поля B_e были выполнены по линиям водорода $H\beta$ и не могут быть, как известно, искажены неравномерным распределением других химических элементов по поверхности. Для этой звезды отсутствуют достаточно точные измерения средних поверхностных величин магнитного поля B_s , поэтому для моделирования необходимо задавать угол наклона звезды i . Угол наклона звезды к лучу зрения оценивался нами в статье [7] по величине $v \sin i$ и оказался близким к $i = 90^\circ$. В работе [9] тоже дано $i = 90^\circ$, но Кочухов с соавторами [10] приводят, по-видимому, более точную оценку $i = 50^\circ$.

В работе [7] мы провели моделирование при угле $i = 90^\circ$ и установили, что структура глобального магнитного поля описывается тремя диполями. Перерасчет модели в предположении $i = 50^\circ$ был сделан в работе [6], и в результате были получены немного другие параметры, приведенные в таблице, но вывод о наличии трехдипольной структуры сохранился. Чтобы описать быстрые изменения магнитного поля на фазовой кривой пришлось увеличить смещения монополей от центра звезды на значительную величину — до $\Delta a = 0.5 \pm 0.1 R_*$ (при меньшей величине Δa фазовая зависимость становится сглаженной). В таком варианте несколько уменьшился разброс величин δ относительно плоскости экватора вращения и уменьшились отклонения измеренных величин B_e от модельной зависимости, они оказались меньше 3σ .

На рис. 4а приведены наблюдаемые (точки) и модельные (сплошная линия) фазовые зависимости $B_e(\Phi)$, а на рис. 4б — модельная зависимость $B_s(\Phi)$, которая должна наблюдаться при непосредственных измерениях. Странным выглядит пик величины магнитного поля B_e в фазе $\Phi \approx 0.0$. Вероятно, он возникает вследствие эффекта перекрытия зеемановских компонент в спектральных линиях от магнитных областей разного знака. На рис. 5а

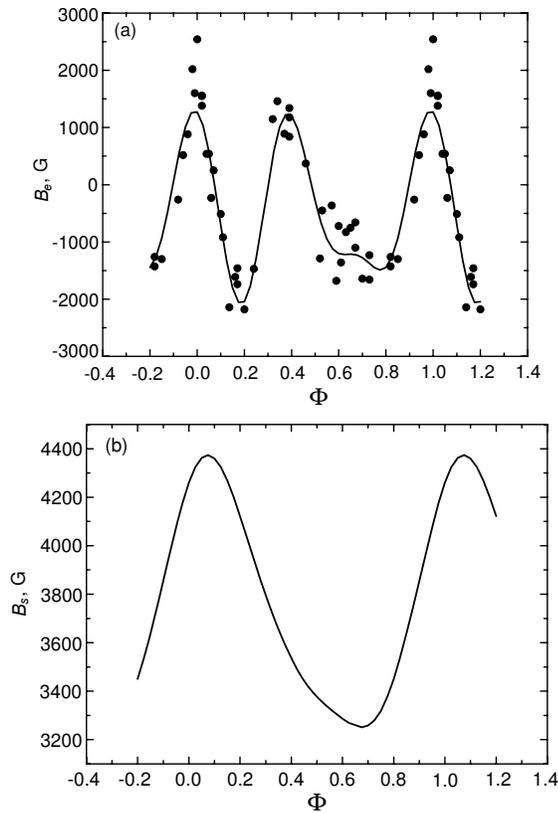


Рис. 4. Фазовые зависимости изменения магнитного поля HD 37776. Обозначения как на рис. 1.

и 5b показаны распределения магнитных силовых линий и величины магнитного поля внутри звезды. Температура звезды $T = 22\,560\text{ K}$, следовательно, радиус конвективного ядра имеет порядок $0.2 R_*$, его положение на рисунке отмечено кружком. При рассмотрении рисунка надо учитывать, что внутри конвективного ядра на самом деле магнитного поля нет, силовые линии должны обходить ядро. Поскольку диполи находятся на большом расстоянии от центра, то внутренние структуры магнитного поля слабо деформированы. На рис. 6 показано распределение крупномасштабной фракции магнитного поля по поверхности. Четко видно: положительные и отрицательные максимумы магнитного поля на карте совпадают с положением экстремумов на фазовой зависимости, что обычно наблюдается в более простых двухдипольных и однодипольных конфигурациях. Модель показывает, что максимальная напряженность поля в положительных полюсах равна $B_p \approx 10\,400\text{ Гс}$, а в отрицательном полюсе — $B_p \approx -10\,700\text{ Гс}$. На основе многолетних данных хорошо известно, что химические аномалии концентрируются вблизи магнитных полюсов. Однако согласно работе [10], гелий сконцентрирован в двух пятнах, расположенных по долготе примерно на $\lambda \approx 120^\circ$ и 250° . На этой долготе расположе-

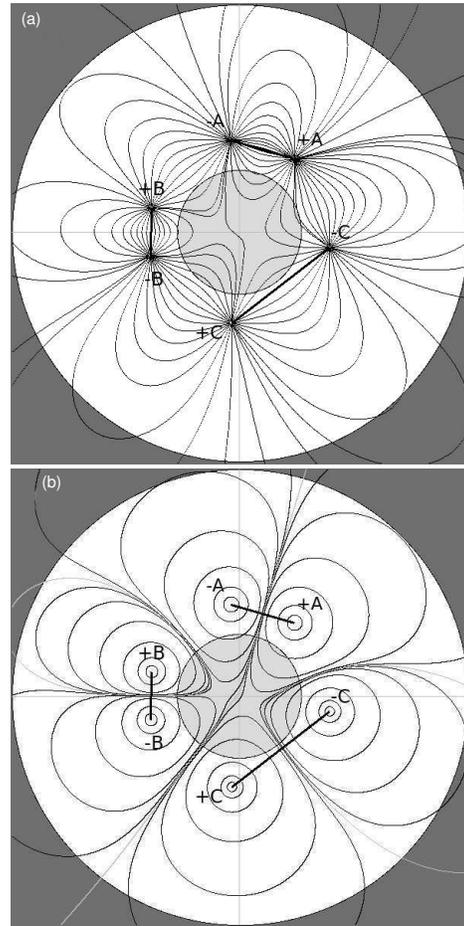


Рис. 5. Распределение магнитного поля в плоскости экватора вращения HD 37776. (a) и (b) как на рис. 2.

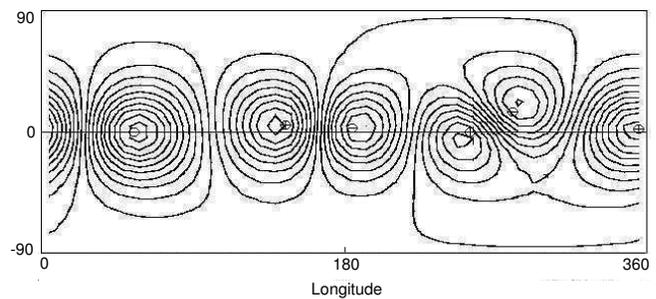


Рис. 6. Распределение магнитного поля по поверхности HD 37776.

ны положительные максимумы магнитного поля, но в положительном максимуме на $\lambda = 0^\circ$ гелия почему-то нет. Нет гелия и в отрицательных максимумах магнитного поля. Это требует объяснений.

2.3. HD 149438 (O)

Эта звезда особенно интересна тем, что она не относится к классу магнитных химически пеккулярных CP-звезд. Измерения магнитного поля

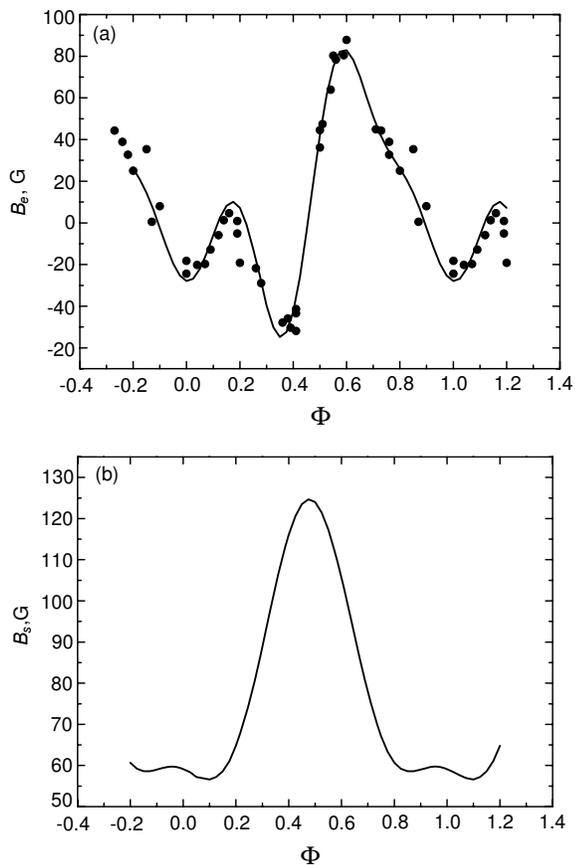


Рис. 7. Фазовые зависимости изменения магнитного поля HD 149438. Обозначения как на рис. 1.

B_e и оценки физических параметров: $T = 30\,000$ К, $\lg g = 4.5$, $R = 5.2 R_\odot$, $i = 70^\circ$, возраст 10^6 лет, взяты из работы [11]. Измеренная и модельная фазовые зависимости $B_e(\Phi)$ показаны на рис. 7а, модельная зависимость $B_s(\Phi)$ приведена на рис. 7б. Для описания быстрых изменений магнитного поля на фазовых зависимостях принята величина $\Delta a = 0.4 \pm 0.1 R_*$. Как и у большинства звезд, диполи лежат в плоскости экватора вращения. Распределение силовых линий и величины магнитного поля в этой плоскости приведены на рис. 8а и 8б. Конвективное ядро имеет довольно большой размер $r_c = 0.27 R_*$, поэтому внутренние области магнитных силовых линий могут быть немного искажены. Распределение крупномасштабной фракции магнитного поля по поверхности показано на рис. 9. Максимальная величина поля на полюсах $B_p = 275$ Гс.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

До сих пор были известны только две звезды с тремя диполями, это HD 37776 и HD 149438 [12].

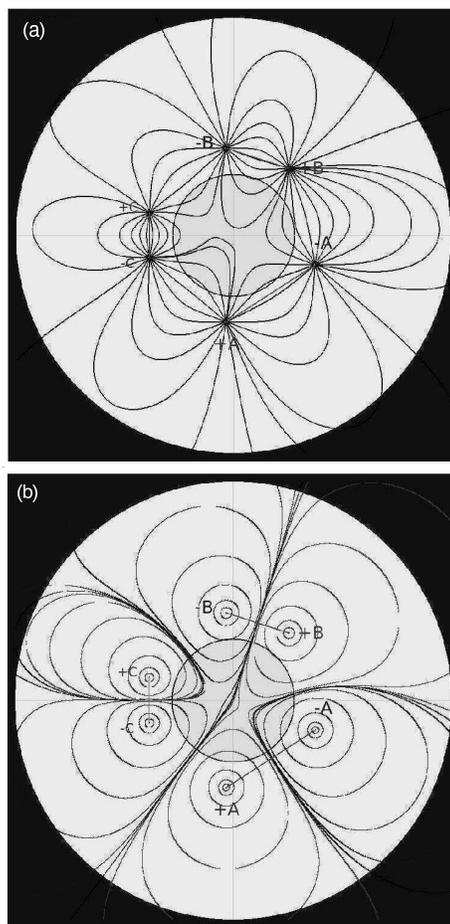


Рис. 8. Распределение магнитного поля в плоскости экватора вращения HD 149438. (а) и (б) как на рис. 2.

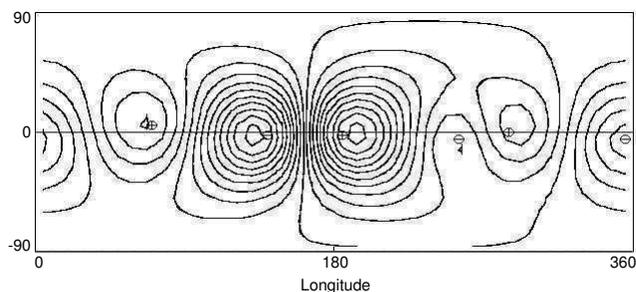


Рис. 9. Распределение магнитного поля по поверхности HD 149438.

Обнаружение третьей трехдипольной звезды исключительно важно, так как показывает, что возникновение звезд со сложной структурой магнитных полей закономерно. В соответствии с результатами наших других работ [13] можно предположить, что магнитные трехдипольные звезды сформировались из протозвездного облака, имеющего три фрагмента, намагниченных сильнее окружающих областей. При коллапсе эти фрагменты

сжимаются вместе с общим объемом, создавая наблюдаемые структуры. В принципе, могут существовать звезды и с большим количеством намагниченных фрагментов, но их трудно выявить из-за недостаточной точности измерений. Результаты моделирования большого числа звезд показывают, что расположение намагниченных фрагментов внутри звезд довольно случайно, поэтому конфигурации поля внутри и на поверхности у них часто значительно различаются. Достаточно однородную группу образуют только звезды с диполем в центре, но точность определения смещения диполя обычно находится в пределах $\Delta a = \pm 0.05 R_*$.

Трудно предположить какие-либо другие внутренние конфигурации магнитного поля, которые приводили бы к такому же его распределению по поверхности, как найденное нами. Совпадение модельных и наблюдаемых фазовых зависимостей $B_e(\Phi)$ и $B_s(\Phi)$ при одних и тех же параметрах убедительно показывает, что глобальные магнитные структуры формируются именно дипольными структурами, а не какими-либо другими, точнее, структурами, близкими теоретическому диполю. Магнитные полюса четко выделяются на меркаторских картах распределения магнитного поля, и в них наблюдается максимальная величина поля.

Звезды HD 37776 и HD 149438 молодые, для них величина $R/R_z = 1.0-1.1$, их возраст $\lg t = 6.0$ и 7.0 [лет] соответственно, поэтому в них должна быть велика доля мелкомасштабной составляющей структуры магнитного поля, которая возникла в нестационарной фазе Хаяши и еще не успела исчезнуть вследствие омической диссипации, как это видно на примере HD 37776 [10]. Время затухания магнитного поля $\tau \sim 1/l^2$, где l — характерный размер намагниченной области, поэтому по мере быстрой диссипации мелкомасштабной составляющей и исчезновения внешней нестационарной оболочки крупномасштабное магнитное поле быстро растет. Мы уже обсуждали в работе [14], что внутренняя структура магнитных полей, особенно у молодых звезд, может иметь клочковатый, запутанный вид вследствие действия нестационарных процессов в фазе Хаяши. Возраст HD 18078 — $\lg t = 8.7$ [лет], т.е. на один—два порядка больше, чем у HD 37776 и HD 149438. Следовательно, доля мелкомасштабной составляющей магнитного поля у нее должна быть меньше, чем у других двух звезд. Поэтому изучение ее методом доплер-зеemanовского картирования было бы интересным. Несмотря на большую разницу в возрасте исследованных звезд, мы не замечаем изменений характерных структур магнитных полей и их ориентации. Этого следовало ожидать, учитывая медленную диссипацию крупномасштабных магнитных структур. Диполи всех трех звезд лежат в плоскости экватора вращения, и распределение диполей вокруг центра звезды

подобно. Стабильность структур подтверждает вывод об отсутствии любых крупномасштабных движений внутри звезд, таких, как меридиональная циркуляция, дифференциальное вращение, крупномасштабная турбуленция и др., и подтверждает вывод о твердотельности их вращения [14].

Итак, в результате моделирования оказалось, что для всех трех объектов общая магнитная конфигурация описывается суперпозицией трех диполей. Если бы мы попытались описать распределение магнитного поля по поверхности более сложными внутренними конфигурациями, надо было бы объяснить, почему такие конфигурации посредством омической диссипации не упростились, неминуемо приведя к более стабильной крупномасштабной дипольной конфигурации. На рисунках хорошо видна сильная концентрация силовых линий в области расположения диполей, т.е. в середине намагниченных фрагментов поле максимально. Очевидно, что модельная структура поля в месте расположения диполя не соответствует действительности, она на самом деле ближе к полоидальной форме. Поэтому диполь подбирается таким образом, чтобы на расстоянии, тем более вблизи поверхности, модельная и наблюдаемая структуры совпадали. Пример рассмотренных звезд, а также двухдипольных объектов, исследованных ранее, показывает, что диполи всегда направлены друг к другу разными знаками. Вероятно, в протозвездных облаках такие конфигурации более устойчивы [15].

У всех трех звезд размер конвективного ядра меньше, чем расстояние диполей от центра, поэтому его влияние на внутренние структуры невелико. Из 116 промоделированных нами звезд [12] 31 имеет центральные однодипольные структуры, часть звезд имеет структуры смещенного из центра диполя, 13 звезд двухдипольные и три — трехдипольные (точная структура остальных звезд не определена). Число звезд с центральным диполем велико. Это говорит о том, что они сформировались из равномерно намагниченных протозвездных облаков, либо из облаков, у которых магнитное поле пропорционально плотности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Gerth and Y. V. Glagolevskij, in *Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars*, Ed. by Y. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk (Moscow, Nauka, 2000), pp. 151–157.
2. E. Gerth and Y. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **56**, 25 (2003).
3. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **58**, 350 (2015).
4. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **66**, 144 (2011).
5. G. Mathys, I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, et al., *Astron. and Astrophys.* **586**, A85 (2016).

6. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **68**, 338 (2013).
7. Y. V. Glagolevskij and E. Gerth, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **51**, 84 (2001).
8. I. B. Thompson and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **289**, L9 (1985).
9. D. A. Bohlender, PhD Thesis, (Univ. Western Ontario, Canada, 1988).
10. O. Kochukhov, A. Lundin, I. Romanyuk, and D. Kudryavtsev, *Astrophys. J.* **726**, 24 (2011).
11. J.-F. Donati, I. D. Howarth, M. M. Jardine, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **370**, 629 (2006).
12. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **59**, 321 (2016).
13. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **57**, 315 (2014).
14. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **72**, 144 (2017).
15. E. Flowers and M. A. Ruderman, *Astrophys. J.* **215**, 302 (1977).

Three Three-Dipole Stars

Yu. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko

We analyzed magnetic-field structures of three three-dipole magnetic stars HD 18078, HD 37776, and HD 149438. The fact that the model and observed phase dependences $B_e(\Phi)$ and $B_s(\Phi)$ for HD 18078 computed with the same parameters of the dipoles agree with each other shows conclusively that global magnetic structures are formed by dipole structures. Magnetic poles show up conspicuously on Mercator maps of the distribution of magnetic field, the field strength there is maximal and equal to $B_p = 3577$, 10700, and 275 G in the three stars mentioned above. Dipole models make it possible to analyze magnetic-field structure inside stars.

Keywords: *stars: magnetic fields—stars: individual: HD 18078, HD 37776, HD 149438*