

УДК 524.35-337/36

СТРУКТУРЫ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ ЗВЕЗД

© 2011 Ю. В. Глаголевский

Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 24 февраля 2010 г.; принята в печать 15 октября 2010 г.

Моделирование магнитных полей около 50 CP-звезд, выполненное методом “магнитных зарядов”, показало, что среди них существует четыре основных типа магнитных конфигураций: 1) центральный диполь, 2) диполь, смещенный вдоль оси, 3) диполь, смещенный поперек оси, 4) сложные структуры. Подавляющее большинство звезд имеет структуру поля диполя, смещенного из центра звезды, причем смещение может быть в любом направлении, как вдоль, так и поперек оси. Небольшой процент звезд имеет структуру поля, образуемую двумя и более диполями.

Ключевые слова: Звезды — переменные и пекулярные

1. ВВЕДЕНИЕ

До сих пор не установилось окончательно мнение о структурах магнитных полей на поверхности химически пекулярных CP-звезд, ничего не известно и об их внутренней структуре, вследствие чего усложняется теоретическое исследование устойчивости магнитных полей и их природы. Магнитное поле поддерживается во всем теле звезды круговыми токами, но мы наблюдаем то, что происходит на поверхности звезды в области формирования спектральных линий. Именно из этой области мы имеем информацию о магнитном поле и химических аномалиях. Перед нами стоит задача исследования связи магнитного поля и химических аномалий, их взаимного распределения по поверхности, для уточнения теории диффузии. Методика измерений, основанная на эффекте Зеемана, позволяет, как правило, регистрировать только продольную вдоль луча зрения компоненту поля B_e , усредненную по видимой полусфере. К настоящему времени накопилось много фазовых зависимостей $B_e(\Phi)$, которые можно анализировать. Данные о среднем поверхностном магнитном поле, получаемые по расщеплению зеемановских компонент, накоплены только для ограниченного числа звезд, имеющих очень узкие спектральные линии (как правило, вследствие медленного вращения).

Бэбкок в своих первых работах придерживался мнения, что магнитное поле у CP-звезд описывается магнитным диполем, расположенным в центре звезды. При этом ось диполя может быть наклонена к оси вращения на любой угол β . Вращающееся дипольное магнитное поле создает синусоидальное изменение зависимости $B_e(\Phi)$. Рассматривая форму профилей спектральных линий,

он утверждал, что они всегда имеют резкие крылья, что свидетельствует о примерно постоянной напряженности магнитного поля по поверхности и отсутствии областей со слабым и очень сильным полем, как на Солнце. Наличие так называемого кроссовер-эффекта в некоторых фазах периода также характерно для случая дипольного поля, а не пятенной структуры его. Вопрос о конфигурации поля усложнился, когда стало ясно, что не у всех звезд наблюдается гармоническая фазовая кривая магнитного поля. К настоящему времени накопилось достаточное количество наблюдательного материала, с помощью которого можно пытаться исследовать основные свойства глобальных структур магнитных звезд.

2. ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУР МАГНИТНОГО ПОЛЯ CP-ЗВЁЗД

Наши представления о структуре магнитных полей CP-звезд развивались следующим образом.

К 1950-м годам выработалось общее мнение, что магнитные CP-звезды представляют собой так называемый жесткий наклонный ротатор [1–3], в котором магнитный диполь находится в центре звезды, а ось магнитного диполя наклонена на угол β к оси вращения и у которого химические элементы концентрируются в ограниченных областях — “пятнах”. Бэбкок допускал присутствие мультиполей более высоких порядков, но считал, что доминирующим компонентом является диполь. Теорию жесткого наклонного ротатора разработали Стиббс и Шварцшильд [1, 2] при предположении, что магнитный диполь находится в центре звезды.

Стиббс объяснил, почему происходят периодические изменения магнитного поля—как реверсивные, так и нереверсивные.

1954–1958 гг. В работах Дейча [3–7] неоднократно обсуждались результаты наблюдений CP-звезд в рамках моделей жесткого наклонного ротатора. Он нашел, что некоторые из них не могут соответствовать ни полю центрального диполя, ни другой осесимметричной конфигурации. Однако оказалось возможным развить метод с использованием наблюдений интенсивностей линии, радиальных скоростей и зеемановского эффекта, позволивший получить хотя бы приближенно карту магнитного поля и аномалий содержания по поверхности магнитных звезд [8]. Здесь Дейч использовал модель наклонного ротатора, применив метод гармонического анализа, основанный на разложении локальных характеристик на гармоники. Магнитное поле, локальные эквивалентные ширины были разложены по сферическим гармоникам, как функции координат и Лапласовские коэффициенты этих разложений были связаны с Фурье-коэффициентами наблюдаемых кривых. Для звезды HD125248 он впервые применил эту методику. Оказалось, что наклон оси вращения звезды к лучу зрения $i = 30^\circ$, а три группы химических элементов и магнитное поле распределены по поверхности неравномерно. Качественно результат оказался удовлетворительным, но не количественно.

1967 г. Исследование свойств модели центрального диполя было осуществлено в работе [9], в которой рассмотрены также возможности сферически несимметричных звезд и структур магнитного поля, отличающихся от центрального диполя, для объяснения наблюдаемых негармонических фазовых зависимостей. В [10] впервые сделана попытка решения прямой задачи—выбора такого вида распределения химических элементов по поверхности α^2CVn , при котором наблюдаемые и рассчитанные фазовые изменения интенсивностей линий и лучевых скоростей совпали бы наилучшим образом.

1967 г. Престон [11] впервые попытался исследовать статистическую ориентацию магнитных диполей внутри звезд, пользуясь теорией Стиббса. Он обнаружил, что ориентация может быть любой, но преимущественно диполь находится в плоскости экватора вращения. Преимущественная ортогональность оси вращения к оси диполя некоторыми авторами рассматривалась как признак образования магнитного поля путем динамо (см. далее).

1969 г. Пайпер [12] на примере α^2CVn пыталась проверить теорию наклонного магнитного ротатора с использованием техники, предложенной Дейчем в 1958 году. Было показано, что изменения блеска, цвета, интенсивностей спектральных линий не

связаны с температурой, они происходят от неоднородного распределения химических элементов по поверхности вращающейся звезды. Магнитная конфигурация представляется комбинацией диполя и квадруполь с общей осью, наклоненной на 50° к оси вращения (квадруполь появляется как второй член разложения на гармоники магнитного потенциала равномерно заряженной сферы). Оказалось, что у α^2CVn магнитное поле симметрично относительно меридиана, проходящего через полюс вращения и магнитные полюса, но оно не симметрично относительно магнитного экватора. Уже из данных этой работы было ясно, что распределение химических элементов по поверхности регулируется магнитным полем, но неизвестен был механизм. Эта работа еще раз подтвердила правильность гипотезы, что все CP-звезды являются наклонными ротаторами с осями диполей, наклоненными к оси вращения, и что нет никаких признаков перемещения ни магнитного поля, ни химических особенностей по поверхности звезды, т.е. магнитная звезда ведет себя как жесткий ротатор. В результате моделирования выяснилось, что по распределению на поверхности звезды химические элементы разделяются на несколько групп. Например, редкие земли концентрируются вблизи магнитных полюсов, а элементы группы железа на магнитном экваторе. Таким образом, к рассматриваемому периоду времени было окончательно установлено, что магнитные CP-звезды это наклонные ротаторы с неравномерной напряженностью магнитного поля на поверхности и неравномерным распределением химических элементов (были попытки объяснить переменность гидромагнитными осцилляциями).

1969 г. В работе [13] Престон устанавливает определенно, что структура магнитного поля HD215441 тоже не дипольная, как и у α^2CVn .

1970 г. По мере пополнения списка звезд с негармоническими фазовыми зависимостями магнитного поля начались работы по исследованию более сложных структур чем центральный диполь. В частности, были предложены модели со смещенным диполем [14] или, позднее, с центральным диполем, совмещенным с параллельным линейным квадруполем [15]. Такие модели хорошо представляли структуры, у которых величины магнитного поля на полюсах разные. Но такие модели соответствовали только части звезд. Этот год (1970) также знаменателен тем, что появилась теория диффузии [16], объясняющая возникновение химических аномалий в атмосферах магнитных звезд под действием сил гравитации и лучевого давления и которая до сих пор поддерживается и развивается как единственно правильная.

1971 г. Итак, наблюдательные данные показывают, что часть магнитных звезд имеет гармонические фазовые зависимости изменения магнитного

поля, часть имеет фазовые зависимости отличные от синусоиды. Престон [17] разработал методику определения параметров магнитного поля звезд из предположения, что магнитный диполь находится в центре звезды (модель центрального диполя), которая приводит к синусоидальным фазовым зависимостям. Им были получены простые формулы, по которым, имея наблюдаемые зависимости $Ve(\Phi)$, можно оценить основные параметры магнитного поля—угол между осью диполя и осью вращения β , поле на полюсах Vp и среднее поверхностное поле Vs . Этот метод широко применялся при анализе свойств магнитных звезд и приводил, как правило, к небольшим отличиям параметров от тех, которые получены более точными методами, учитывающими отклонения от синусоидальности фазовых зависимостей. В работе [17] Престон вновь обращается к исследованию ориентации магнитных полей, используя дополнительные наблюдательные данные. Он находит, что половина звезд имеет преимущественную ориентацию осей диполей перпендикулярно оси вращения $\beta \sim 80^\circ$, а другая половина $\beta \sim 20^\circ$. Ландстрит [14] тоже исследовал ориентацию смещенных диполей и, в принципе, получил такой же результат. Таким образом, для теории динамо возникли трудности, которая требует, чтобы у всех звезд $\beta = 90^\circ$. В работе [17] Престон также впервые исследовал распределение магнитных звезд по величине поля и нашел, что на $Ve \sim 2-3$ кГс наблюдается максимум, затем следует плавное падение вплоть до десятков килогаусс.

Краузе и Эткен [18–20] на основе требований теории магнитного динамо построили экваториально-симметричные дипольно-квадрупольные модели некоторых звезд. Они предложили две модели такой конструкции: 1) диполь в экваториальной плоскости плюс линейный квадруполь, параллельный оси вращения и 2) диполь плюс линейный квадруполь, параллельные друг другу в экваториальной плоскости. Вторая из этих моделей подобна модели смещенного диполя, но с требованием иметь $\beta = 90^\circ$. Она, кажется, способна описать наблюдаемые фазовые зависимости Ve (как простой наклонный ротатор) для некоторых звезд. Однако такие структуры для большинства звезд не подходят. Кроме того, в последнее время большинство авторов считает, что магнитное поле CP-звезд не может быть результатом действия солнечного динамо, потому что у них нет достаточно мощной конвективной зоны.

1974 г. В работах [21, 22] была сделана попытка исследования распределения химических элементов по поверхности 21Peg в виде круглых пятен. Позднее [23] мы, используя методику “магнитных зарядов” (см. далее), построили модель магнитного поля этой звезды. Оказалось, что полученные ранее координаты основных химических “пятен”

совпадают с координатами магнитных полюсов. Это была одна из первых работ, в которой была сделана попытка определить положение областей концентрации химических элементов на поверхности звезды и найти связь магнитного поля и химических аномалий.

1974 г. Штифт [24, 25] усовершенствовал теорию смещенного диполя Ландстрита [14]. Главное достоинство модели Ландстрита по сравнению с центральным диполем Стиббса [1] состоит во много раз большем диапазоне применимости этой модели. Обобщенная модель содержит диполь, находящийся в любой точке внутри звезды, наклоненный на любой угол по отношению к оси вращения. Смещение диполя может быть в любом направлении. Очевидно, что модель Ландстрита представляет частный случай обобщенного наклонного ротатора, у которого главная ось диполя всегда проходит через центр звезды (наши случаи, когда смещение + или – (п.4)). Разработанная методика позволила в первом приближении объяснить особенности звезд HD126515 и HD137909, для которых имеются обе фазовые зависимости $Ve(\Phi)$ и $Vs(\Phi)$, а также звезд HD112413, HD125248 и HD153882 по одной зависимости $Ve(\Phi)$. Для этих звезд модель центрального диполя не подходит.

1977 г. Хорошо известны работы Хохловой и ее сотрудников [26–28], в которых впервые на основании исследования формы профилей спектральных линий и распределения в них поляризации строились карты распределения химических элементов по поверхности CP-звезд и определялись параметры магнитного поля (обратная задача или так называемое доплеровское картирование). Данный подход коренным образом отличается от предыдущих. Но такие исследования были возможны только при использовании спектров с очень высоким отношением сигнал/шум и очень высокого спектрального разрешения. Недостатком метода является также плохая точность определения положения “пятен” и невозможность картирования на невидимой стороне звезды, как и в случае метода Дейча. В частности, эта методика была использована нами для исследования структуры магнитного поля α^2 CVn по зеemanовским спектрам с обратной дисперсией $1.3 \text{ \AA}/\text{мм}$, полученным на 6-м телескопе [29], которая оказалась близкой к структуре поля центрального диполя. В принципе, методика, основанная на анализе профилей линий, может дать более определенные результаты по свойствам магнитного поля, чем та, которая использует фазовые зависимости. Однако она может быть применена только к небольшому количеству самых ярких объектов.

1980 г. Отклонения формы фазовых зависимостей от синусоидальности для ряда звезд были

устранены путем измерения магнитного поля по линиям водорода [30]. Таким образом, было установлено значительное влияние неравномерности распределения химических элементов на фазовые зависимости магнитного поля.

1981 г. В работе [31] была сделана попытка исследования структуры магнитного поля звезды HD215441 путем анализа относительных интенсивностей расщепленных зеемановских компонент линий разных химических элементов по методике [32]. Оказалось, что модель центрального диполя дает лучшие результаты. Этот эксперимент оказался единственным.

1982 г. В работе [33] для HD215441 применена модель осесимметричного магнитного поля, содержащего полоидальную и тороидальную компоненты. Причиной такой конструкции было то, что теоретически только такая конфигурация поля может быть стабильной. Оказалось, что ось полоидальной компоненты наклонена к оси вращения на угол $\beta = 52^\circ - 62^\circ$. В этой работе показано, что вычисленные фазовые зависимости $B_e(\Phi)$ и $B_s(\Phi)$ хорошо соответствуют наблюдениям. Каждая модель характеризуется величинами H_p , ΔH_p и M , которые обозначают поле на полюсе, различие силы поля на полюсах и относительную силу тороидальной и полоидальной компонент. Применение методики к HD215441 показало, что поверхностная структура характеризуется прежде всего дипольной компонентой и имеет величину ΔH_p в диапазоне от -40 до -50 кГс. Решения с большим различием поля на полюсах ΔH_p , приводят к сильному дипольному вкладу в полоидальную компоненту, и имеют слабый тороидальный компонент, в то время как решения с маленькими величинами ΔH_p , имеют сильный тороидальный компонент. Данная методика к другим звездам не применялась. Однако наблюдательные данные разных авторов не подтверждают наличие тороидальной составляющей ни у одной звезды (см. также Заключение).

2000 г. В последнее время используется другая методика моделирования магнитного поля [34] с помощью коллинеарно расположенных диполя+квадруполя+октуполя. Ландстрит [15], как говорилось выше, легко моделировал звезды, у которых величина магнитного поля на полюсах разная, с помощью конфигурации диполь плюс параллельный линейный квадруполь. Это позволяет дать приемлемое физическое описание геометрии поля в некоторых случаях. Однако моделирование некоторых звезд [35, 36] показало, что для более точного представления наблюдений потребовалось введение еще октупольного компонента. Эта методика фактически дает описание фазовой зависимости. Параметры дипольно-квадрупольных и дипольно-квадрупольно-октупольных моделей или

параметры иногда применяемой синусоиды, приблизительно описывающие фазовые зависимости магнитного поля, не дают представления об источнике магнитного поля. Они описывают только особенности фазовых зависимостей (в случае если фазовые зависимости отличаются от синусоиды). Любое магнитное поле можно разложить на гармоники. Оказывается, во многих случаях можно использовать с достаточной точностью первые три гармоники: диполь+квадруполь+октуполь. Это искусственный прием, потому что на самом деле магнитное поле внутри звезды создается элементарными круговыми токами. Магнитные поля элементарных источников, суммируясь, создают крупномасштабное поле, описываемое одним виртуальным магнитным диполем с моментом M .

Дальнейшее развитие методики исследования распределения магнитного поля по поверхности магнитных звезд сделано в работах Пискунова [37, 38]. Его метод дает возможность получить распределение вектора магнитного поля и содержания химических элементов по поверхности. При этом не надо задавать геометрию магнитного поля. Метод основан на современной теории переноса и эффективной технике минимизации. Необходимая информация получается из вращательной модуляции профилей линий. Процедура решения основывается на рассмотрении переноса излучения для 4 параметров Стокса. Программа способна реконструировать разные геометрии магнитного поля от простого диполя до суперпозиции нескольких мультиполей в присутствии или отсутствии областей химических аномалий. Методика доплеровского картирования видоизменялась разными авторами [39], методика доплер-зеемановского картирования применялась в [40, 41]. Все эти методы дают хорошие результаты при использовании спектров очень высокого разрешения $R > 100000$ и отношения сигнал-шум более 1000, т.е. при исследовании самых ярких объектов.

В приведенном обзоре мы отметили основные вехи в исследовании структур магнитных полей химически пекулярных звезд. Для дальнейшего изложения уточняем некоторые свойства применяемого нами метода исследования.

Еще Бэбкок, анализируя профили спектральных линий, предположил, что магнитное поле на поверхности химически пекулярных звезд имеет структуру магнитного диполя, находящегося в центре звезды. На поверхности отсутствуют "пятенная" структура магнитного поля типа солнечной. Поверхность равномерно намагничена в соответствии со структурой поля диполя. Логично предположить, что и на некоторой глубине она тоже дипольная, но не далее чем до конвективного ядра, внутри которого крупномасштабное магнитное

поле полоидального типа существовать не может. Структура магнитного поля внутри звезд неизвестна, что представляет собой сейчас большую проблему. Наша методика моделирования [42–44], в отличие от всех упомянутых выше, заключается в том, что мы не задаем заранее структуру поля, а последовательно вводим такое количество магнитных монополей и помещаем их в таких точках внутри звезды, чтобы их суммарное действие приводило бы к вычисленным фазовым зависимостям, одинаковым с наблюдаемыми. На основании таких вычислений мы делаем вывод о том, какого типа источник магнитного поля находится внутри звезды. Вычисления проводятся методом последовательных приближений. Для большинства звезд в пределах точности измерений оказывается достаточно предположить наличие двух зарядов внутри звезды в центре или вблизи центра, т. е. диполя. Некоторые звезды имеют более сложные структуры. Применением нашей методики мы пытаемся выявить крупномасштабную структуру магнитного поля. Наряду с этим программа моделирования позволяет вычислить распределение напряженности магнитного поля по поверхности, величину поля на магнитных полюсах, фазовую зависимость среднего поверхностного магнитного поля. Первые опыты применения нашего метода показали, что задание комбинации “диполь+квадруполь” или “диполь+квадруполь+октуполь” приводит к искаженному распределению поля по поверхности [45]. Последующие исследования показали, что предположение моделей центрального или смещенного диполей приводят к такому распределению магнитного поля по поверхности, которое соответствует распределению химических аномалий. В принципе, мы можем использовать любое количество зарядов для получения наилучшего совпадения с наблюдениями, но уже при двух монополях (зарядах) наблюдаемая и вычисленная зависимости обычно хорошо совпадают. Поэтому нет никаких причин усложнять структуру, вводя искусственно квадруполь, октуполь и т.д. Основные недостатки нашего метода состоят в том, что с его помощью можно судить только о крупномасштабной структуре поля, а параметры поля сильно зависят от точности угла i наклона звезды к лучу зрения, который определяется часто с большими ошибками. Если известны обе фазовые зависимости $Ve(\Phi)$ и $Vs(\Phi)$, то угол i определяется точно, но получаются два решения, одно из которых необходимо выбрать, используя косвенные данные.

Наша методика [42–44] исходит из источников магнитного поля — круговых токов заряженных частиц. Магнитное поле — величина векторная, суммируясь, элементарные источники магнитного поля создают общий вектор магнитного поля звезды. Суммарный вектор магнитного поля обычно

соответствует одному виртуальному диполю, находящемуся в центре звезды или на некотором расстоянии от центра (смещенный диполь). Этот виртуальный магнитный диполь состоит из зарядов $+Q$ и $-Q$, отстоящих друг от друга на среднем расстоянии l . Величина l имеет порядок размера атомов, однако при вычислениях она берется порядка 0.1 радиуса звезды. При такой величине l и том же значении магнитного момента M заряды Q численно имеют приемлемую для вычислений величину. При тех величинах точности измерений, которыми мы располагаем, изменение ее до 0.2 радиуса практически не влияет на форму фазовой зависимости магнитного поля.

Можно встретить работы, в которых фазовые зависимости магнитного поля описываются синусоидой и даются параметры этой синусоиды. Такие приближения практически малоинформативны.

3. ЗВЁЗДЫ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ДИПОЛЕМ

Этот случай разделяется на два, когда 1) фазовая зависимость продольного поля $Ve(\Phi)$ действительно синусоидальная с достаточной точностью и 2) когда зависимость $Ve(\Phi)$ построена по измерениям с плохой точностью и действительная зависимость не проявляется. В этом случае параметры магнитного поля получаются приближенными. В первом случае можно определенно говорить о диполе в центре звезды. Во втором случае при моделировании диполь в центре звезды задается как первое приближение. Очевидно, что в таком варианте параметры магнитного поля могут отличаться от тех, которые были бы при наличии точных измерений. Какова может быть ошибка, мы рассмотрим позднее.

В Табл. 1 приведены все изученные нами звезды, которые имеют структуру поля центрального диполя. Те объекты, которые принадлежат второму случаю, отмечены вопросительным знаком. В этой таблице и в последующих использованы следующие обозначения: β — угол между осью вращения и осью диполя, i — угол наклона оси вращения к лучу зрения наблюдателя, B_s — среднее поверхностное магнитное поле, B_p — магнитное поле на магнитных полюсах (в случае центрального диполя оно одинаковое на обоих полюсах), Δa — величина смещения диполя из центра звезды в единицах радиуса звезды. Схема положения силовых линий для модели центрального диполя и распределение поля по поверхности показаны на Рис. 1.

Из всего списка структуру поля, соответствующую центральному диполю, имеют определенно только 7 звезд, у 11 звезд центральный диполь задан как первое приближение. Критерием отбора

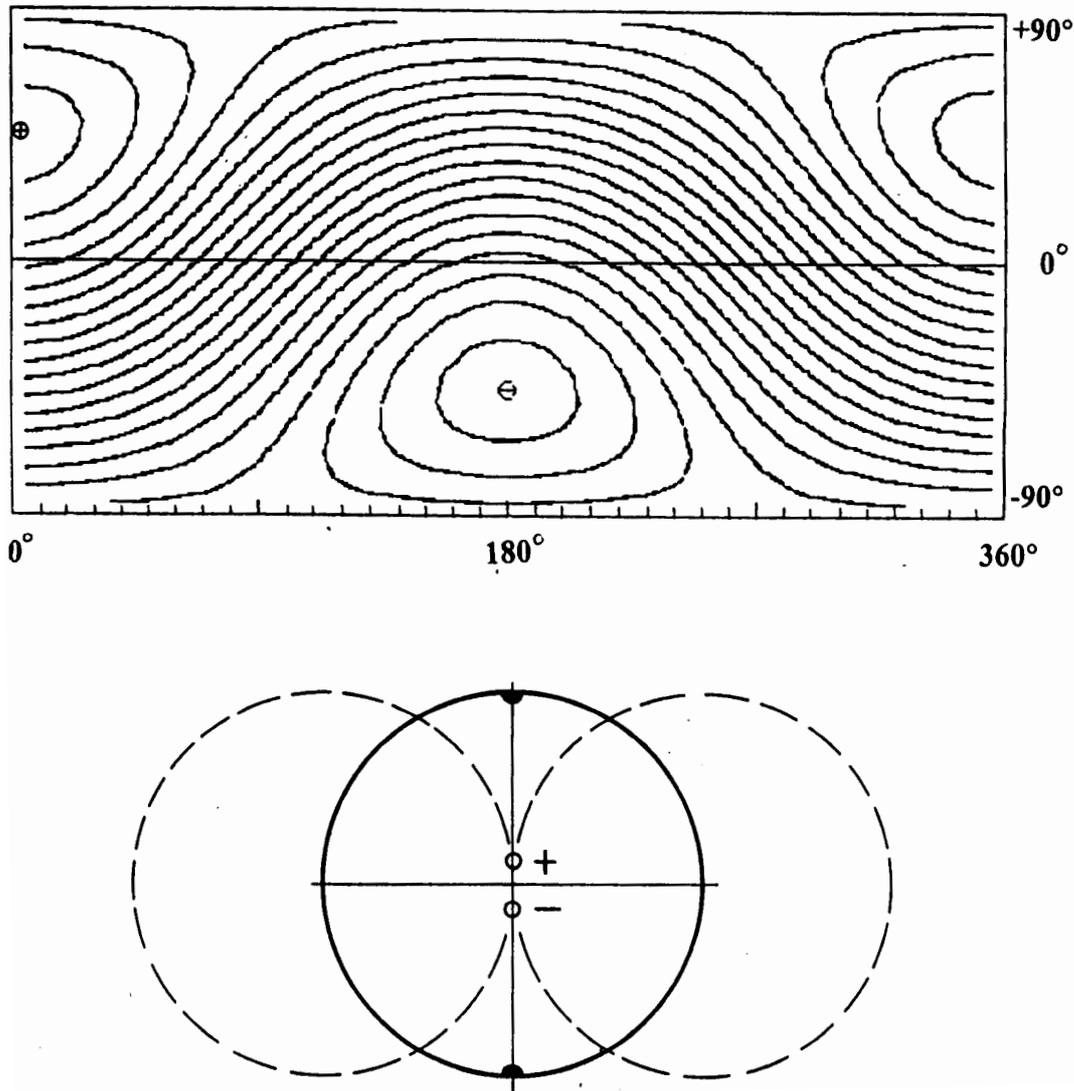


Рис. 1. Меркаторская карта распределения магнитного поля по поверхности в случае модели центрального диполя. По оси абсцисс долгота, по оси ординат — широта. Внизу — схема расположения силовых линий (штриховая линия) при центральном диполе в плоскости магнитного экватора. Сплошной линией показана поверхность звезды. Черные полукружки отмечают положение полюсов.

звезды для моделирования с помощью центрального диполя является ошибка величины Δa , превышающая 0.05–0.10. Сравнение с результатами других авторов показывает, что по углу β различие может превышать 10° , по углу i оно иногда доходит до 40° . Именно ошибки угла наклона в наибольшей степени влияют на точность нашего моделирования. Среднее поверхностное магнитное поле по нашим моделям определяется по вычисленным фазовым зависимостям как $(B_s(\max) + B_s(\min))/2$.

4. ЗВЁЗДЫ С ДИПОЛЕМ, СМЕЩЕННЫМ ВДОЛЬ ОСИ

Это наиболее многочисленная группа звезд, исследование которых привело Ландстрита к предположению о смещении диполя у них вдоль его оси [14]. В отличие от звезд с центральным диполем, имеющих фазовые зависимости магнитного поля практически синусоидальной формы, у звезд этого типа фазовые зависимости ангармонические. У всех звезд этой группы, которые мы исследовали, смещение диполя приводило к хорошему согласию вычисленных и наблюдаемых фазовых зависимостей $B_e(\Phi)$. В Табл. 2 приведены наши параметры, а также параметры, полученные другими авторами.

Таблица 1. Модели магнитных звезд с центральным диполем

| № | HD | Тип | β , deg | i , deg | B_s , G | B_p , G | Δa | Источник |
|----|--------|--------|---------------|-----------|-----------|---------------|------------|----------|
| 1 | 3360 | He-r | 87 | 18 | 294 | ± 517 | 0 | [46] |
| | | | 79 | 18 | — | ± 335 | 0? | [47] |
| 2 | 2453 | SrCrEu | 80 | 14 | 3750 | ± 6560 | 0 | [48] |
| 3 | 4778 | SrCrEu | 65 | 70 | — | — | 0? | [49] |
| | | | 80 | 40 | 6000 | — | 0? | [50] |
| | | | 81 | 56 | 2600 | ± 4030 | 0? | [46] |
| 4 | 5737 | He-w | 88.5 | 20 | 3190 | ± 5600 | 0? | [46] |
| 5 | 9996 | SrCrEu | 12: | 89.5 | 5000: | ± 8100 : | 0? | [51] |
| 6 | 11503 | Si+ | 68 | 47 | — | ± 3000 | 0? | [30] |
| | | | 75 | 50 | 1000 | ± 1550 | 0? | [52] |
| 7 | 12098 | Si+ | 46 | 55 | 2450 | ± 2720 | 0 | [52] |
| 8 | 12288 | SrCrEu | 66 | 24 | 8080 | ± 13400 | 0 | [48] |
| 9 | 18296 | SrCrEu | 88 | 14 | 890 | ± 1580 | 0? | [23] |
| 10 | 19832 | Si | 80 | 74 | — | ± 1200 | 0? | [30] |
| | | | 90 | 34 | 495 | ± 840 | 0? | [23] |
| 11 | 22470 | Si | 90 | 25 | 2350 | ± 4100 | 0 | [23] |
| 12 | 24712 | SrCrEu | 33 | 49 | — | — | 0? | [49] |
| | | | 38 | 44 | 1250 | ± 1800 | 0? | [23] |
| 13 | 34452 | Si | 55 | 26–90 | — | — | 0? | [53] |
| | | | 69 | 42 | 1000 | ± 1620 | 0? | [52] |
| 14 | 112185 | SrCrEu | 82 | 51 | 330 | ± 520 | 0 | [68] |
| 15 | 115708 | SrCrEu | 87 | 55 | 3850 | ± 6100 | 0? | [55] |
| | | | 75 | 50 | — | — | 0? | [49] |
| | | | 77 | 60 | — | — | 0? | [56] |
| 16 | 178892 | SrCrEu | 74.5 | 9 | 17440 | ± 30180 — | 0 | [52] |
| 17 | 192678 | SrCrEu | 70 | 8 | 4700 | ± 7300 | 0? | [54] |
| | | | 60 | 10 | — | — | 0? | [49] |
| | | | 60 | 27 | — | ± 6500 | 0? | [57] |
| 18 | 201601 | SrCrEu | 85.5 | 34 | 3800 | ± 6210 | 0? — | [58] |

Обозначения такие же, как в Табл. 1. В столбце Δa в скобках приведен знак монополя, в сторону которого он сминут. Характерно, что смещение диполя может быть в любом направлении, в сто-

рону (+) и в сторону (–) равновероятно. Очевидно, что для выяснения природы возникновения и эволюции магнитных полей это важный факт, как и то, что доля звезд такого типа преобладает. Схема

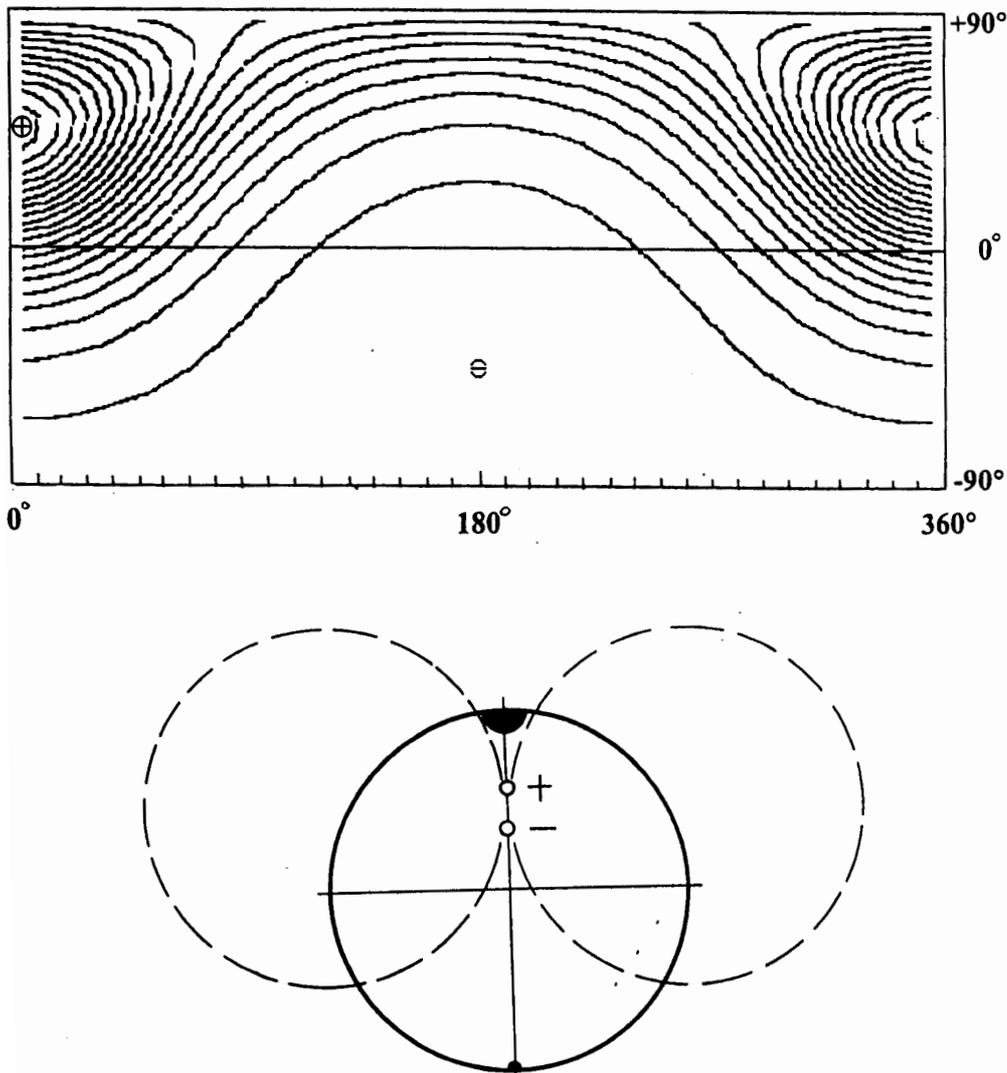


Рис. 2. То же, что на Рис. 1, для модели смещенного вдоль оси диполя.

расположения силовых линий для случаев $\Delta \neq 0$ показана на Рис. 2.

Из данных Табл. 2 видно, что у 8 звезд сдвиг диполя происходит в сторону монополя положительного знака и у 7 в сторону отрицательного, т.е. преимущества в одном знаке нет, смещение равновероятно. Максимальное смещение $\Delta a \sim 0.6$, при этом отношение напряженности магнитного поля на полюсах достигает $V_p(\max)/V_p(\min) = 35$ (HD45583). Но это уникальная звезда, которую еще предстоит исследовать дополнительно. Другая звезда HD147010 имеет $\Delta = 0.45$, а отношение величин поля на полюсах равно $V_p(\max)/V_p(\min) = 15$. Это показывает, что деформация конфигурации магнитного поля может достигать значительной величины. При таких структурах угол β уже не имеет такого значения,

как в случае центрального диполя, мы их отметили двоеточиями. Углы β у рассматриваемых звезд находятся в пределах от 5° до 90° . Обращает на себя внимание то, что больших углов β непропорционально много, как уже отмечали Престон и Ландстрит [17, 47]. Иначе говоря, среди звезд Табл. 1 и 2 имеется заметная тенденция диполей располагаться в плоскости экватора. Это является одним из важнейших свойств магнитных полей CP-звезд.

5. МОДЕЛИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ДИПОЛЕМ, СМЕЩЕННЫМ ПОПЕРЕК ОСИ

Структуры магнитного поля диполя, смещенного поперек оси, мы нашли у звезд, приведенных в

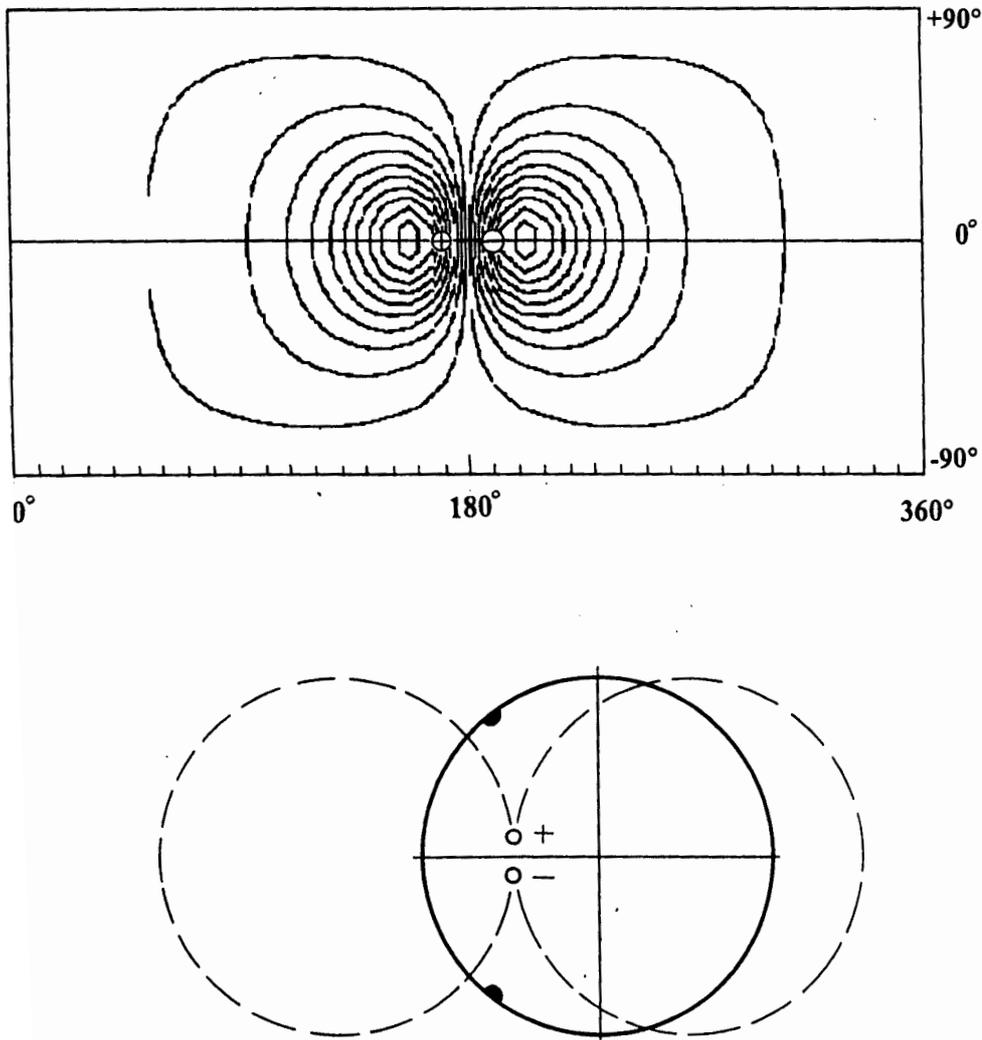


Рис. 3. То же, что на Рис. 1, для модели диполя, смещенного поперек оси диполя.

Табл. 3. У звезды HD21699 оба монополя смещены от центра на величину $\Delta = 0.4$ поперек его оси. Таких звезд пока мало. По широте диполь оказывается вблизи плоскости экватора. В результате на поверхности звезды на экваторе оказываются близко расположенные магнитные полюса положительного и отрицательного знаков, а расстояние между магнитными полюсами оказывается не 180° , как при центральном диполе, а порядка 55° .

У звезды HD40312 оба монополя отстоят от центра звезды тоже на одинаковую величину $\Delta = 0.2$, но находятся на разной широте, на $\pm 5^\circ$ относительно экватора, что тоже приводит к значительной величине l . По долготе положение полюсов отличается на 110° . В отличие от рассмотренных звезд у HD119419 ось диполя ориентирована прак-

тически параллельно оси вращения, расстояние между монополями тоже большое.

Звезда HD126515 представляет собой довольно сложный случай. Монополи смещены поперек оси на $\Delta = 0.4(-)$ и $0.3(+)$, но и выше плоскости экватора вращения: широта обоих монополей $\delta = 30^\circ$. Поэтому расстояние между магнитными полюсами оказывается равным 60° , а расстояние между монополями порядка 0.4 радиуса звезды. При рассмотренных нами конфигурациях угол β перестает иметь значение такое как в случае центрального диполя. Кроме того, важное замечание состоит в том, что между монополями оказывается значительное расстояние, вследствие чего возникает не дипольная структура поля, а структура поля стержня. На этих примерах мы видим, что диполь

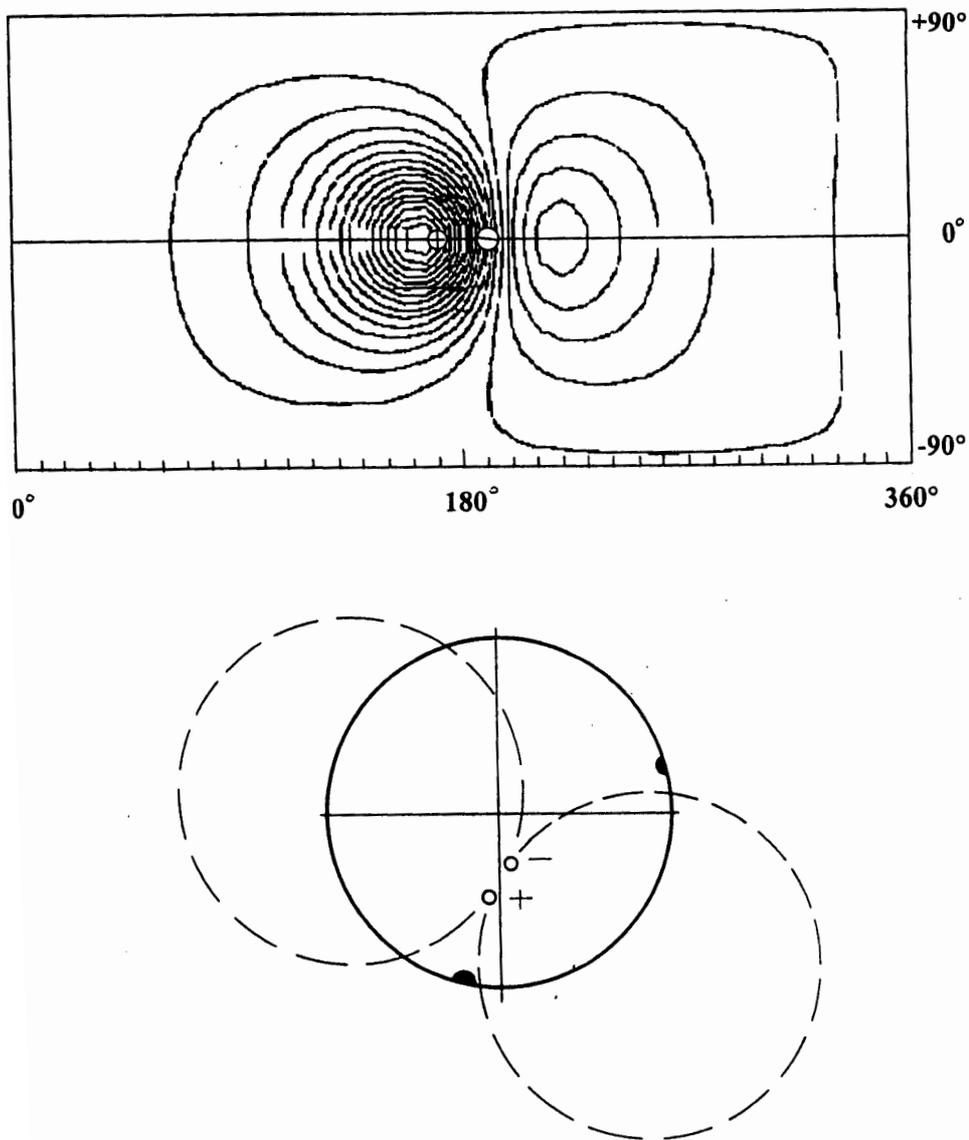


Рис. 4. То же, что на Рис. 1, для модели со смещением монополей на разную величину.

может быть смещен из центра звезды не только вдоль оси, но и поперек. Следует особо подчеркнуть, что сдвиг диполя вдоль оси сказывается на фазовых зависимостях гораздо сильнее, чем сдвиг поперек оси, поэтому, возможно, такие конфигурации замечаются реже. Влияние на фазовую кривую значительно меньше. В пределах точности измерений магнитных полей изменение формы фазовых зависимостей заметно только при очень больших отклонениях от центра звезды. Поэтому полученные результаты имеют низкую точность и к ним необходимо относиться в основном с качественной стороны. Малое количество звезд с поперечным сдвигом диполя кажется неестественным с точки

зрения физики. Схема ориентации магнитных силовых линий для рассматриваемого случая показана на Рис. 3. На Рис. 4 показан случай, когда Δa для монополей разное. Основная проблема состоит в том, что диполи получаются не точечные, как в предыдущих случаях, а имеют большую величину l . Этот случай планируется исследовать специально.

6. СЛОЖНЫЕ СТРУКТУРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В отличие от приведенных выше примеров, где магнитное поле формируется одним смещенным

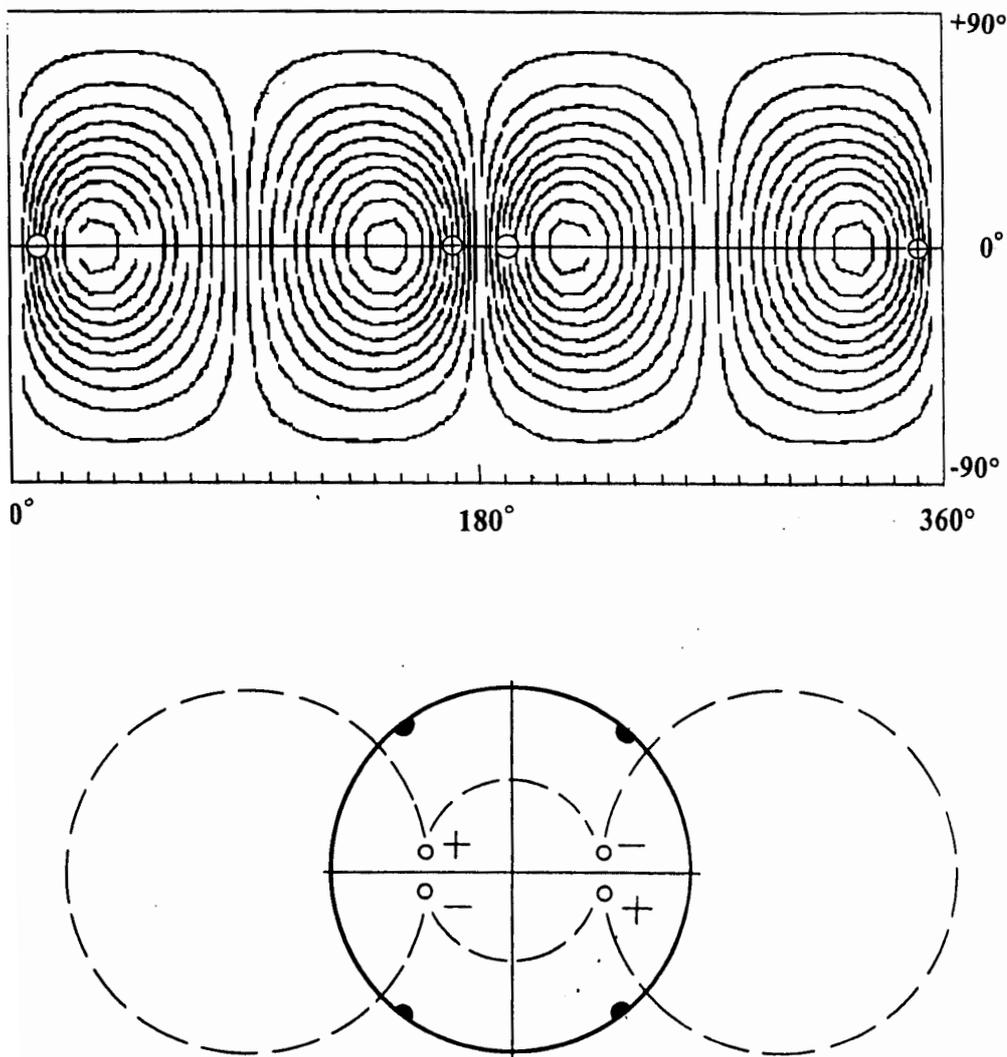


Рис. 5. То же, что на Рис. 1, для модели со смещенными двумя диполями.

диполем, имеются объекты с более сложной конфигурацией. Они приведены в Табл. 4, их к настоящему времени известно только четыре.

Звезда HD32633 имеет фазовую зависимость $V_e(\Phi)$ характерную тем, что на нисходящей стороне после достижения “положительного” максимума виден еще один максимум. Расчеты показали, что никакой ориентацией одного диполя невозможно получить такую форму зависимости. Действительно, включение второго диполя позволило получить вычисленную фазовую зависимость, хорошо совпадающую с наблюдаемой. Оба диполя находятся вблизи плоскости экватора вращения по разные стороны от оси вращения на одинаковом расстоянии $\Delta a = 0.6$ от нее. Такую конфигурацию нельзя считать квадруполем вследствие большого расстояния между диполями и разной величины

магнитного момента. Расстояние между монополями также велико, поэтому структура поля соответствует, скорее, структуре двух стержней с противоположно направленными знаками, а не точечных диполей. Долготы магнитных зарядов первого диполя равны 27° и 47° , второго 215° и 217° , а широты -5° и $+12^\circ$, -5° и $+23^\circ$. Следовательно, они располагаются вблизи плоскости экватора. В данной конфигурации угол β не имеет того смысла, какой существует в случае центрального диполя. На поверхности звезды возникают две пары близко расположенных магнитных “пятен”.

Звезда HD35502 пока еще не изучена достаточно хорошо, но имеются убедительные данные о том, что ее магнитное поле имеет структуру двух диполей, как в случае HD32633. Монополи расположены тоже вблизи плоскости экватора на

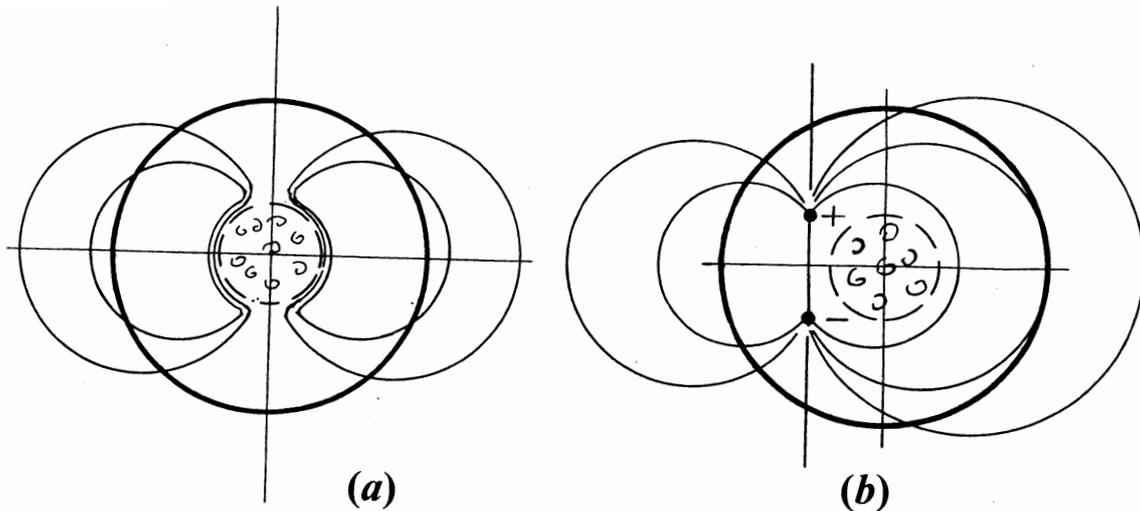


Рис. 6. Возможные внутренние структуры магнитного поля при центральном (а) и смещенном (б) диполе в присутствии конвективного ядра.

широтах $\pm 10^\circ$. По долготе они отстоят друг от друга примерно на 90° .

Звезда HD37776 имеет фазовую зависимость более сложную, чем HD32633 и HD35502, на ней хорошо заметны три максимума и три минимума, соответственно, метод последовательных приближений привел к конфигурации из трех диполей. Монополи расположены вблизи плоскости экватора, причем положительные находятся в одном полушарии, а отрицательные в другом. По долготе центры диполей отстоят друг от друга примерно на одинаковом расстоянии, равном 120° , расстояние монополей от оси вращения одинаково. В сумме они приводят к конфигурации полоидального поля с осью, почти параллельной оси вращения.

Звезда HD137909 тоже имеет характерную структуру поля, образуемую двумя диполями, смещенными поперек оси на величину $\Delta = 0.3$ в противоположных от оси направлениях. Монополи располагаются вблизи экватора вращения. Они образуют четыре магнитных полюса с одинаковой напряженностью $B = \pm 14500\text{G}$. Наблюдаемую конфигурацию нельзя считать квадруполем вследствие того, что монополи образуют вытянутый прямоугольник.

Таким образом, три рассмотренные звезды (кроме HD37776) имеют общее свойство—их поле образуется двумя смещенными из центра дипольными источниками, но все четыре имеют диполи, расположенные вблизи плоскости экватора вращения. (см. схему на Рис. 5).

Необходимо сделать замечание, что пока непонятно, в чем состоит причина больших величин l .

Она методическая или физическая? Необходимы дополнительные исследования этого свойства.

7. О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ДИПОЛЯ В НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ СЛУЧАЯХ

Естественно возникает вопрос, насколько мы можем ошибиться в параметрах магнитного поля, если применяем модель центрального диполя для звезд, у которых конфигурация на самом деле другая. Когда измерений мало, или точность их плохая и на фазовой зависимости наблюдается большой разброс точек, мы всегда вычисляем параметры, предполагая модель центрального диполя. В Табл. 5 приведены примеры, когда данные получены в предположении моделей центрального диполя и смещенного диполя.

Из таблицы видно, что углы наклона оси диполя к оси вращения β , как правило, различаются мало за исключением случая сложного поля звезды HD32633. Велико также различие для звезды HD12288. Величины поверхностного поля B_s также одного порядка. Поле на полюсах B_p может быть разным, но среднее значение $(B_p(\max) + B_p(\min))/2$ примерно равно B_p для центрального диполя. Таким образом, при статистических исследованиях использование параметров, полученных при предположении центрального диполя, допустимо.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в пп. 3–6 (и Рис.1) данные подтверждают, что магнитные звезды обладают круп-

номасштабными полоидальными структурами поля с произвольной ориентацией диполей. Относительное количество звезд с симметричными магнитными полями (центральный диполь) невелико (Табл. 6)—только 17%. Большое количество звезд обладают структурами, отличными от центрального диполя. Характерно, что максимальное число звезд имеют структуру смещенного вдоль оси диполя. Очевидно, что имеется какая-то физическая при-

чина этого, но для уверенности необходимо увеличить статистику. Вполне вероятно, что малое количество звезд со смещением диполя поперек оси вызвано слабостью влияния на фазовую зависимость $V_e(\Phi)$. Просто такие объекты трудно обнаружить. Малое количество сложных конфигураций может свидетельствовать о малой вероятности физических механизмов сильно искажающих структуры магнитного поля.

Таблица 2. Модели магнитного поля с диполем, смещенным вдоль его оси

| № | HD | Тип | β , deg | i , deg | B_s , G | B_p , G | Δa | Источник | |
|---|--------|--------|---------------|-----------|-----------|--------------------|-----------------|----------|------|
| 1 | 12288 | SrCrEu | 12 | 78.5 | 8100 | -15800 +9700 | 0.08(-) | [48] | |
| | | | 21 | 61 | 8100 | - | 0.01(+) | [59] | |
| 2 | 12447 | | 90 | 38 | 782 | +2260 -670 | 0.2(+) | [52] | |
| 3 | 14437 | SrCrEu | 14: | 65 | 7665 | - | 0.23(+) | [59] | |
| | | | 1 вар. | 5: | 89+ | 7665 | +8900 -6100 | 0.25(+) | [52] |
| | | | 2 вар. | 88 | 6 | 7665 | +22100 -8900 | 0.15(+) | [52] |
| 4 | 45583 | Si | 90: | 39 | 16000: | +9400: -314000: | 0.6:(-) | [60] | |
| 5 | 62140 | SrCrEu | 90 | 58 | +2019 | 0.045 -2639 | | [61] | |
| 6 | 65339 | SrCrEu | 85 | 58 | 13250 | +12600 -29600 | 0.14(-) | [45] | |
| | | | 80 | 50 | - | -28400 | 0.145(-) | [62] | |
| | | | 80: | 60 | - | - | 0.67(-) | [63] | |
| | | | 1 вар | 80 | 65 | - | -28000 | 0.15(-) | [64] |
| | | | 2 вар | 65 | 80 | - | -28000 | 0.15(-) | [64] |
| 7 | 75049 | SrCrEu | 68: | 9 | 27430 | -72268 +25592 | 0.17(-) | [61] | |
| 8 | 112413 | SrCrEu | 82 | 55 | 2600 | +5300 -2890 | 0.1(+) | [46] | |
| | | | 65 | 65 | | +5100 | 0.2(+) | [13] | |
| | | | 76 | 50 | 2900 | +4900 | 0.05(+) | [29] | |
| | | | 65 | 71 | | +4400 | 0 | [64] | |
| | | | 65 | 65 | | +10000 | 0.2(+) | [64] | |

Таблица 2. (Продолжение)

| № | HD | Тип | β , deg | i , deg | B_s , G | B_p , G | Δa | Источник |
|----|--------|--------|---------------|-----------|-----------|-----------|------------|----------|
| 9 | 116458 | He-w? | 60: | 63 | 4650 | +26700 | 0.4(+) | [64] |
| | | | 12 | 75 | | +9510 | 0.07(+) | [65] |
| 10 | 118022 | SrCrEu | 65 | 22 | – | +8000 | 0.2(+) | [66] |
| 11 | 124224 | Si | 87: | 60 | 2200 | –7900 | 0.30(–) | [67] |
| | | | | | | +1200 | | |
| 12 | 126515 | SrCrEu | 86: | 22 | 13500 | –45800: | 0.24:(–) | [65] |
| | | | | | | +11100: | | |
| 13 | 147010 | Si+ | 95 | 17 | 12000: | –19400 | 0.36(–) | [13] |
| | | | 25: | 76 | | +103000 | 0.45(+) | [68] |
| 14 | 187474 | Si+ | 24 | 86 | 5500 | –11600 | 0.10(–) | [69] |
| | | | | | | +6300 | | |
| 15 | 188041 | SrCrEu | 37 | 89 | 3600 | – | 0.055(–) | [70] |
| | | | 7 | 83 | | –7400 | 0.07(–) | [51] |
| 16 | 200311 | Si+ | 86 | 30 | 8500 | +18520 | 0.08(+) | [48] |
| | | | | | | –11420 | | |
| 17 | 215441 | SrCrEu | 90 | 28 | 34000 | – | 0.09 | [71] |
| | | | 30–35 | 30–35 | | – | 0.2–0.3(+) | [72] |
| | | | 10 | 67.5 | | +55100 | 0.03(+) | [46] |
| | | | | | | –45900 | | |

Как уже говорилось, структура магнитного поля CP-звезд, указанных в 3 и 4 строках Табл. 6, скорее всего, соответствует не диполю в математическом смысле, т.е. имеющему размер оси l , сравнимый с размерами вихревых токов, а соответствует стержневому магниту с большим l , сравнимым с радиусом звезды (такой источник магнитного поля можно назвать “длинный диполь”). Но и в тех случаях, когда поле звезды описывается центральным диполем, мы не можем утверждать, что l имеет атомные размеры, потому что при расчетах изменение Δa от 0 до 0.2 слабо влияет на вычисленную фазовую зависимость $B_e(\Phi)$. Такое влияние находится за пределами точности измерений. Вполне вероятно, что у звезд с центральным диполем на самом деле источник поля тоже имеет конфигурацию стержня. Это предположение требует специального изучения. Уточнение структуры поля внутри звезды

может иметь значение для теории формирования магнитного поля и его эволюции. Кроме того, тот результат, что источник поля подобен стержневому магниту, может указывать на наличие особенностей структуры поля во внешних и внутренних областях звезды. Например, неизвестно, как влияет на структуру поля в поверхностных слоях существование конвективного ядра. В теле звезды текут электрические токи от множества элементарных вихрей, от которых возникают магнитные поля. В простых структурах элементарные магнитные вектора складываются в один общий вектор, описываемый одним виртуальным магнитным диполем. Очевидно, что особенности внутренней структуры влияют на суммарный вектор магнитного поля. Если суммируется большое количество источников внутри звезды, то результирующий диполь может быть направлен в любую сторону и смещен из

Таблица 3. Модели магнитного поля с диполями, смещенными поперек их оси

| № | HD | Тип | i, deg | B_s, G | B_p, G | Δa | Источник |
|---|--------|--------|-----------------|-----------------|------------------|---------------------|----------|
| 1 | 21699 | He-w | 32 | 6150 | +21800 -21800 | 0.4 (оба монополя) | [73] |
| 2 | 40312 | Si | 52 | 650 | +1420 -1420 | 0.2 (оба монополя) | [52] |
| 3 | 119419 | Si | 89 | 23000 | +37000 -37000 | 0.05 (оба монополя) | [55] |
| 4 | 126515 | SrCrEu | 22 | 13000 | -60000 +20000 | 0.4 и 0.3 | [65] |

Таблица 4. Сложные структуры магнитного поля CP-звезд

| № | HD | Тип | B_s, G | B_p, G | Δa | Источник |
|---|--------|--------|-----------------|----------------------------|------------------------|----------|
| 1 | 32633 | Si+ | 12000 | ± 42447 ± 19302 | 0.6 (2 диполя) | [74] |
| 2 | 35502 | He-w | — | -9000 | 0.1 (2 диполя) | [75] |
| 3 | 37776 | He-r | — | +70000 -67000 | ~ 0.18 (3 диполя) | [76] |
| 4 | 137909 | SrCrEu | 5500 | ± 14500 | 0.3 (2 диполя) | [77] |

центра звезды. Однако, если есть неоднородности в толще атмосферы, где эффективно образуются спектральные линии, то такая сумма с учетом всей полусферы, не превращается в единый вектор от одного виртуального диполя, а оказывается искаженной. Возможно влияние стратификации химических элементов.

На Рис. 6 показаны схемы вероятного положения магнитных силовых линий в присутствии конвективного ядра в случае центрального и смещенного диполей. В конвективном ядре магнитное поле существовать не может и силовые линии должны обходить его. Однако направление силовых линий на поверхности таково, что создает иллюзию центрального или смещенного диполя. Вполне возможно, что именно этот эффект приводит к аномальному градиенту магнитного поля, изученному авторами работ [78, 79].

Такие звезды, как HD32633, HD137909, имеют фазовые зависимости $B_e(\Phi)$, не описываемые точно смещенным диполем. У них наблюдается относительное смещение экстремумов изменения продольного поля B_e и среднего поверхностного поля B_s . Структура поля у таких звезд удовлетворительно описывается двумя диполями. Очевидно,

что деформация магнитного поля могла происходить на ранних стадиях происхождения и эволюции звезд неизвестным в настоящее время механизмом. Одно из основных свойств магнитных конфигураций является то, что оси диполей наклонены к оси вращения на любой угол β , но число звезд с большими β , по-видимому, непропорционально велико. В то же время на нашем распределении магнитных звезд по углу β нет максимума на $\beta \sim 20^\circ - 30^\circ$, которое получалось у Престона. Это очень важно для теории формирования магнитного поля. Другое важное свойство состоит в том, что сдвиг диполя из центра звезды может быть в любом направлении и иногда на значительную величину, вплоть до половины радиуса звезды. Приведенные здесь результаты могут быть полезными для первичного обсуждения проблемы магнитных полей CP-звезд.

Попытки объяснить природу наблюдаемых магнитных конфигураций пока не привели к существенным результатам. Наиболее перспективный сценарий был разработан в [80], где выполнено численное моделирование формирования стабильного магнитного равновесия в звезде с запутанным начальным магнитным полем. В условиях звезды такое поле через определенное время “самоорганизуется” в полоидально-тороидальную струк-

Таблица 5. Сравнение результатов применения разных моделей

| Звезда, HD | β , deg | B_s , G | B_p , G | Δa | Источник |
|------------------------|---------------|-----------|--------------|---------------|----------|
| 12447 (центр. диполь) | 90 | 715 | ± 1190 | 0 | [52] |
| 12447 (смещ. диполь) | 90 | 782 | +2260 –670 | 0.2(+) | [52] |
| 12288 (центр. диполь) | 66 | – | 13400 | 0 | [39] |
| 12288 (смещ. диполь) | 12 | – | –15800+9700 | 0.08(–) | [39] |
| 32633 (центр. диполь) | 40 | – | ± 12970 | 0 | [48] |
| 32633 (смещ. диполь) | 48 | – | ± 42447 | 0.6(поперек) | [48] |
| | 5 | | ± 19302 | 0.6(поперек) | |
| 40312 (центр. диполь) | 75 | 365 | 550 | 0 | [52] |
| 40312 (смещ. диполь) | 85 | 650 | +1420– | 0.2 (поперек) | [52] |
| | | | | 0.2 (поперек) | |
| 116458 (центр. диполь) | 10 | – | ± 7290 | 0 | [66] |
| 116458 (смещ. диполь) | 12 | – | +9510–6220 | 0.07(+) | [66] |
| 126515 (центр. диполь) | 88.5 | – | ± 22600 | 0 | [66] |
| 126515 (смещ. диполь) | 86 | – | –45800+11100 | 0.24(–) | [66] |
| 187474 (центр. диполь) | 14 | – | ± 8630 | 0 | [69] |
| 187474 (смещ. диполь) | 24 | – | –11620+6320 | 0.1(–) | [69] |
| 200311 (центр. диполь) | 86 | – | 14560 | 0 | [39] |
| 200311 (смещ. диполь) | 86 | – | +18520–11420 | 0.08(+) | [39] |

Таблица 6. Доля магнитных звезд разных типов

| № | Структура поля | Доля звезд |
|---|------------------------------|------------|
| 1 | Центральный диполь | 17% |
| 2 | Смещенный диполь вдоль оси | 38% |
| 3 | Смещенный диполь поперек оси | 9% |
| 4 | Сложные конфигурации | 9% |
| 5 | Неизвестная структура | 26% |

туру, причем оказалось, что концентрированное в центре звезды начальное поле эволюционирует приблизительно в осесимметричную конфигурацию, близкую полоидальной, плюс тороидальная компонента. Более обширное начальное поле эволюционирует в более сложную неосесимметричную структуру, состоящую из закрученных трубок, извивающихся под поверхностью звезды. Автор считает, что последний результат может помочь объяснить наблюдения SP-звезд с недипольными полями. Очевидно, что процессы, происходящие

внутри магнитных звезд, не так просты и требуются более сложные подходы. Основная трудность предлагаемого механизма состоит в том, что он приводит в общем к более сложной, запутанной системе силовых трубок, чем наблюдается. Кроме того, наблюдаемые конфигурации совершенно произвольно ориентированы относительно оси вращения (возможен любой угол β), но это не может объяснить предлагаемый механизм. Длительные измерения магнитных полей звезд не показывают присутствия тороидальной компоненты, которую предсказывают расчеты.

Обращает на себя внимание тот факт, что практически у всех моделей оси диполей лежат вблизи плоскости экватора. В дальнейшем следует уделить особое внимание этому свойству.

Если подтвердится вывод о преимущественном смещении магнитных структур в плоскости экватора, то это будет служить в пользу мнения о предполагаемом влиянии выпадения аккрецируемых масс или даже слияния компонент тесных двойных [81] на формирование разных структур магнитного поля. Всякая асимметрия теоретически неустойчива,

но полное выравнивание структуры в период эволюции до главной последовательности не происходит вследствие медленного процесса релаксации. Оно сравнимо с временем жизни звезды на главной последовательности. Это подтверждается данными о вековой стабильности структур магнитных полей и связанных с ними химических аномалий у СР-звезд [82]. Эта проблема важна не только для исследования природы магнитных звезд, но и для понимания формирования и эволюции звезд вообще.

В работе [83] показано, что во время образования звезды из намагниченного облака магнитное поле препятствует плотным областям сливаться, благодаря чему в будущей магнитной звезде могут создаваться неоднородности магнитного поля.

В полученных моделях не заметно никакой зависимости между периодом вращения звезд и углом β , что является одним из указаний на неправильность предположения о потере момента вращения Ар-звездами посредством “магнитного торможения”.

Данная работа является первичным обсуждением полученных результатов моделирования магнитных полей СР-звезд и будет продолжена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. W. N. Stibbs, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **110**, 395 (1950).
2. M. Schwarzschild, Astrophys. J. **112**, 222 (1950).
3. A. J. Deutsch, Astrophys. J. **105**, 283 (1947).
4. A. J. Deutsch, Trans. IAU. **8**, 801 (1954).
5. A. J. Deutsch, Publ. Astronom. Soc. Pacific **68**, 92 (1956).
6. A. J. Deutsch, *Vistas in Astronomy* **2**, 1421 (1956).
7. A. J. Deutsch, *Handbuch der Physik* **51**, 689 (1958).
8. A. J. Deutsch, IAU Symp. №6, 209 (1958).
9. E. Z. Bohm-Vitenze, in *Modern Astrophysics*, Ed. by M. Hack, (Gauthier-Villars, Paris, 1967), p.112.
10. E. Z. Bohm-Vitense, Astrophys. J. **64**, 326 (1966).
11. G. Preston, Astrophys. J. **150**, 547 (1967).
12. D. M. Pyper, Astrophys. J. Suppl. **18**, 347 (1969).
13. G. Preston, Astrophys. J. **156**, 967 (1969).
14. J. D. Landstreet, Astrophys. J. **159**, 1001 (1970).
15. J. D. Landstreet, Astronom. J. **85**, 611 (1980).
16. G. Michaud, Astrophys. J. **160**, 641 (1970).
17. G. Preston, Publ. Astronom. Soc. Pacific **83**, 571 (1971).
18. F. Krause, Astron. Nachr. **293**, 187 (1971).
19. F. Krause and L. Oetken, in *Physics of Ap Stars*, Ed. by W. W. Weiss, H. Jenkner, and J. Wood, (Vienna, 1967), p.449.
20. L. Oetken, Astron. Nachr. **298**, 197 (1977).
21. Ю. В. Глаголевский, К. И. Козлова, В. С. Лебедев и Н. С. Полосухина, *Астрофизика* **12**, 631 (1976).
22. Ю. В. Глаголевский, К. И. Козлова и Н. С. Полосухина, *Астрофизика* **10**, 517 (1974).
23. Ю. В. Глаголевский, *Астрофизический бюллетень* **65**, 36 (2010).
24. M. J. Stiff, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **172**, 133 (1975).
25. M. J. Stiff, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **183**, 433 (1978).
26. А. В. Гончарский, В. В. Степанов, В. Л. Хохлова и А. Г. Ягола, *Письма в АЖ* **3**, 278 (1977).
27. А. В. Гончарский, В. В. Степанов, В. Л. Хохлова и А. Г. Ягола, *Астрон. ж.* **59**, 1146 (1982).
28. Н. Е. Пискунов и В. Л. Хохлова, *Письма в АЖ* **9**, 665 (1983).
29. Ю. В. Глаголевский, Н. Е. Пискунов и В. Л. Хохлова, *Письма в АЖ* **11**, 371 (1985).
30. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J. Suppl.* **42**, 421 (1980).
31. Ю. В. Глаголевский, К. И. Козлова, Р. Н. Кумайгородская и др., *Астрофиз. Исслед.* **13**, 3 (1981).
32. В. С. Лебедев, *Астрофиз. Исслед.* **12**, 25 (1980).
33. M. Goossens, W. van Assce, R. Demitrie, and L. Gadeyne, *Astrophys. and Space Sci.* **83**, 213 (1982).
34. J. D. Landstreet and G. Mathys, *Astronom. and Astrophys.* **359**, 213 (2000).
35. J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **326**, 967 (1988).
36. J. D. Landstreet, P. K. Barker, and D. A. Bohlender, *Astrophys. J.* **344**, 876 (1989).
37. N. Piskunov, in *Magnetic fields of chemically peculiar and related stars* (Moscow, 2000), p.96.
38. Н. Е. Пискунов, *Письма в АЖ* **11**, 18 (1985).
39. Д. В. Васильченко, В. В. Степанов и В. Л. Хохлова, *Письма в АЖ* **22**, 924 (1996).
40. M. Semel, *Astronom. and Astrophys.* **225**, 456 (1989).
41. J.-F. Donaty, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **302**, 457 (1999).
42. E. Gerth, Yu. V. Glagolevskij, and G. Scholz, in *Stellar magnetic fields*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk, (Moscow, 1997), p.67.
43. E. Gerth and Yu. V. Glagolevskij, in *Magnetic fields of chemically peculiar and related stars*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk, (Moscow, 2000), p.151.
44. E. Gerth and Yu. V. Glagolevskij, in *Physics of magnetic stars*, Ed. by D. O. Kudryavtsev and I. I. Romanyuk, (Nizhnij Arkhyz, 2007), p.148.
45. E. Gerth, Yu. V. Glagolevskij, and G. Scholz, in *Magnetic fields of chemically peculiar and related stars*, (Moscow, 2000), p.158.
46. Ю. В. Глаголевский, *Астрофизический бюллетень* **64**, 62 (2009).
47. C. Neiner et al., *Astronom. and Astrophys.* **406**, 1019 (2003).
48. Yu. V. Glagolevskij and E. Gerth, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 31 (2005).
49. J. L. Leroy, in *Stellar magnetic fields.*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk, (Moscow, 1997), p.30.
50. D. A. Bohlender, *Astronom. and Astrophys.* **220**, 215 (1989).

51. Ю. В. Глаголевский и Е. Герт, *Астрофизика* **51**, 295 (2008).
52. Ю. В. Глаголевский, *Астрофизический бюллетень* **65**, 173 (2010).
53. J. D. Landstreet, E. Borra and G. Fontaine, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **188**, 609 (1979).
54. Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **50**, 70 (2000).
55. Ю. В. Глаголевский, *Астрофизика* **44**, 121 (2001).
56. G. A. Wade, E. Neagu, and J. D. Landstreet, *Astronom. and Astrophys.* **307**, 500 (1996).
57. G. A. Wade, V. G. Elkin, J. D. Landstreet, et al., *Astronom. and Astrophys.* **313**, 209 (1996).
58. Ю. В. Глаголевский, *Астрофизика* **49**, 251 (2006).
59. G. A. Wade, D. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, et al., *Astronom. and Astrophys.* **355**, 1080 (2000).
60. Ю. В. Глаголевский, *Астрофизика* **52**, 127 (2009).
61. Ю. В. Глаголевский, (готовится к печати).
62. J. Huchra, *Astrophys. J.* **174**, 435 (1972).
63. J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **159**, 1001 (1970).
64. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **212**, 141 (1977).
65. Ю. В. Глаголевский, *Астрон. ж.* **82**, 1 (2005).
66. E. F. Borra, *Astrophys. J.* **235**, 915 (1980).
67. Yu. V. Glagolevskij and E. Gerth, *Astronom. and Astrophys.* **382**, 935 (2002).
68. Yu. V. Glagolevskij and E. Gert, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **46**, 123 (1998).
69. Ю. В. Глаголевский, *Астрофизика* **48**, 575 (2005).
70. V. R. Khalack, J. Zverko, and J. Ziznovsky, *Astronom. and Astrophys.* **403**, 179 (2003).
71. G. A. Wade, V. G. Elkin, J. D. Landstreet, and I. I. Romanyuk, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **292**, 748 (1997).
72. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **222**, 226 (1978).
73. Ю. В. Глаголевский и Г. А. Чунтонов, *Астрофизика* **50**, 441 (2007).
74. Ю. В. Глаголевский и Е. Герт, *Астрофизический бюллетень* **63**, 276 (2008).
75. Ю. В. Глаголевский, Г. А. Чунтонов, А. В. Шаврина и Я. В. Павленко, *Астрофизика* **53**, 157 (2010).
76. Yu. Glagolevskij and E. Gerth, *ASP Conf. Ser.* **248**, 158 (2001).
77. Yu. V. Glagolevskij and E. Gerth, in *Magnetic stars*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij, I. I. Romanyuk, and D. O. Kudryavtsev, (Nizhnij Arkhyz, 2004), p.142.
78. S. C. Wolf, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **90**, 412 (1978).
79. И. И. Романюк, *Изв. САО* **12**, 3 (1980).
80. J. Braithwaite, *Contr. Astron. Obs. Skalnaté Pleso.* **38**, 179 (2008).
81. Ю. В. Глаголевский и Е. Герт, *Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв.* **58**, 17 (2005).
82. А. В. Тутуков и А. В. Федорова, *Астрон. ж.* **87**, 1 (2010).
83. D. J. Price, M. R. Bate, and C. L. Dobbis, *Rev. Mex. Astronom. and Astrophys.* **36**, 128 (2009).

MAGNETIC FIELD STRUCTURES IN CHEMICALLY PECULIAR STARS

Yu.V. Glagolevskij

We report the results of magnetic field modelling of around 50 CP stars, performed using the “magnetic charges” technique. The modelling shows that the sample reveals four main types of magnetic configurations: 1) a central dipole, 2) a dipole, shifted along the axis, 3) a dipole, shifted across the axis, and 4) complex structures. The vast majority of stars has the field structure of a dipole, shifted from the center of the star. This shift can have any direction, both along and across the axis. A small percentage of stars possess field structures, formed by two or more dipoles.

Key words: *stars: magnetic fields — stars: chemically peculiar*