АСТРОФИЗИКА

ТОМ 62 МАЙ, 2019 ВЫПУСК 2

ЗАМЕЧАНИЯ О СВОЙСТВАХ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗВЕЗДЫ HD37776

Ю.В.ГЛАГОЛЕВСКИЙ, А.Ф.НАЗАРЕНКО

Поступила 28 ноября 2018
Принята к печати 13 марта 2019

Рассмотрены результаты исследования магнитного поля и его структуры у звезды HD37776, выполненные разными авторами. Отмечаются значительные противоречия между результатами, которые не позволяют считать, что звезда окончательно изучена. Основная причина ошибочных результатов состоит в сложности структуры магнитного поля. В результате этого возникают трудности измерений магнитного поля и его интерпретации.

Ключевые слова: *магнитные поля звезд: модели: звезда HD37776*

1. *Введение*. Здесь мы еще раз рассматриваем магнитное поле уникальной магнитной звезды HD37776, потому что результаты ее исследования очень противоречивы. История ее исследований довольно богата. Нас интересует в первую очередь внутренняя структура магнитного поля этой звезды, потому что поверхностная структура существует не сама по себе. Химически пекулярные (CP) звезды обычно имеют сильные поверхностные магнитные поля с крупномасштабными магнитными структурами, которые достаточно хорошо описываются наклоненными к оси вращения виртуальными магнитными диполями. Кривая изменения продольной составляющей магнитного поля Be вследствие вращения звезды в таких случаях похожа на синусоиду. Звезда HD37776 (как и звезды HD18078, 149438 [1]) является исключением из этой общей тенденции. Она имеет многоволновую вращательную модуляцию продольного магнитного поля, что указывает на сложную поверхностную и внутреннюю структуру поля.

2. *Результаты предыдущих исследований*. Томпсон и Ландстрит [2] впервые получили фазовую кривую изменения продольного магнитного поля *Be*(Ф) звезды HD37776 с помощью Hβ поляриметра. Достоинством этих измерений является то, что они получены по линиям водорода и не подвержены влиянию неравномерного распределения разных химических элементов по поверхности. Фазовая кривая имеет необычную форму, за один период вращения наблюдаются два положительных и два отрицательных максимума магнитного поля, а фактически шесть, как будет видно из дальнейших результатов. Авторы

решили, что наиболее вероятна структура квадрупольного поля. Предполагается, что внутри звезды имеются две токовые петли, создающие два намагниченных объема, приводящие к двухдипольной структуре магнитного поля. Таким образом, впервые была найдена звезда со сложной структурой магнитного поля, отличной от обычно наблюдавшихся простых однодипольных систем, и предсказана реальная внутренняя структура поля.

Болендер [3] описал изменение магнитного поля HD37776 путем предположения дипольно+квадрупольно+октупольной структуры магнитного поля. Таким образом, впервые выполнено **математическое описание формы** (не физическое объяснение!) фазовой зависимости изменения продольного магнитного поля *Be*(Ф) звезды HD37776.

Болендер и Ландстрит в [4] снова обсудили сложную модель магнитного поля HD37776, которая хорошо описывает фазовую зависимость магнитного поля *Be*(Ф). В отличие от работы [2], в которой распределение магнитного поля по поверхности определяется двумя виртуальными магнитными диполями внутри звезды, в данной работе распределение поля на поверхности описывается математической комбинацией диполя, квадруполя и октуполя. Важно отметить, что модель предсказывает максимальную величину магнитного поля на поверхности порядка **60** кГс. При этом получаются три величины магнитного поля, которые относятся, соответственно, к диполю, квадруполю и октуполю. Очевидно, что **они не имеют физического смысла и не указывают на то, что на поверхности звезды имеются точки с такой напряженностью**. Опыт использования этой методики показывает, что величины магнитного поля, соответствующие диполю, квадруполю и октуполю, всегда получаются очень большими (см. *Заключение*), но иногда исследователи принимают их за реальные величины на поверхности.

В работе [5] для звезды HD37776 сделана оценка угла наклона звезды $i = 90°$ и построена модель магнитного поля, состоящая из коллинеарных диполя+квадруполя+октуполя, соответственно имеющих величины магнитного поля 3.4, -59, 44 кГс. Попутно заметим, что знание углов i при моделировании и при исследовании происхождения и эволюции магнитных звезд, имеет первостепенное значение, но величина угла $i = 90°$ для этой звезды в дальнейшем не подтвердилась. Относительно нереальности многополюсного метода описания поверхностной структуры магнитного поля делаем такое же замечание, как и в предыдущем примере.

Новая методика моделирования магнитных структур была разработана в [6-8]. Создана программа моделирования магнитных полей химически пекулярных (CP) звезд при предположении дипольного характера их структуры (раннее название - метод "магнитных монополей"). Таким образом, была поставлена задача не формального математического описания поверхностной

структуры магнитного поля, а задача найти такую внутреннюю структуру магнитного поля, которая создавала бы наблюдаемое поверхностное распределение магнитного поля, как это было правильно сделано в [2]. Основания для такого предположения даны в *Заключении*. По этой методике позднее (2001г.) была исследована модель магнитного поля HD37776.

Романюк и соавторы [9] описали историю исследований звезды HD37776, привели ее основные параметры и представили результаты спектральных наблюдений. Оказалось, что продольное магнитное поле *Be*, измеренное по линиям гелия, изменяется не в пределах ±2 кГс, как в работе [2], а как ±20 кГс. Авторы обращают внимание на рекордно сильное локальное поле, достигающее **60** кГс при измерении линий некоторых химических элементов (более подробно результаты рассмотрены далее), а также на то, что этот результат подтверждает предсказания мультипольных моделей [3,4]. В работе Романюка и соавторов [9] приведена зависимость изменения интенсивности W_λ линии гелия λ5875.7 с фазой периода вращения. В фазах $\Phi = 0.5 - 1$ наблюдается широкий максимум, а в $\Phi = 0.3$ узкий минимум. Зависимость будет проанализирована в разделе 3.

В работе [10] тоже была сделана попытка найти конструкцию, состоящую из диполя, квадруполя и октуполя для описания наблюдаемой фазовой зависимости *Be*(Ф) для HD37776. Такая математическая конструкция была найдена, но, как говорилось выше, не имеет физического смысла (см. *Заключение*).

Хохлова и соавторы [10] исследовали конфигурацию магнитного поля HD37776 с использованием метода доплер-зеемановского картирования по спектрам, полученным на 6-м телескопе [9]. При этом было найдено, что угол $i = 90°$, оцененный в работе [5], является ошибочным, на самом деле его величина находится в пределах 30 - 50°. При решении обратной задачи конфигурация магнитного поля искалась в виде комбинации диполя,

Рис.1. Распределение магнитного поля по поверхности HD37776, полученное методом доплер-зеемановского картирования.

квадруполя и октуполя с произвольной ориентацией, помещенных в центре звезды. Распределение магнитного поля по поверхности изучено по линиям разных химических элементов. Отмечается, что таким образом впервые выполнено доплер-зеемановское картирование быстро вращающейся магнитной звезды HD37776. На рис.1 показана полученная карта распределения магнитного поля по поверхности HD37776 с использованием зеемановских спектров гелия. Это распределение совершенно не соответствует зависимости $Be(\Phi)$ из работы [2]. По линиям других химических элементов результат оказался таким же. Как видно из дальнейших работ по моделированию распределения магнитного поля по поверхности HD37776, полученное в [10] распределение не имеет с ними ничего общего, в том числе при использовании того же наблюдательного материала. В работе [4] определенно фиксируется сложная топология магнитного поля вследствие того, что фазовая зависимость имеет два положительных и два отрицательных экстремума. Тем не менее, в этой модели указанный факт совершенно не проявляется. Авторы акцентируют внимание на том, что на поверхности звезды существуют области с экстремальным магнитным полем $Be = 60$ кГс, что подтверждает результат в [4].

В работе [11] построена модель магнитного поля звезды HD37776 методом "магнитных диполей (монополей)" с использованием фазовых зависимостей продольного поля $Be(\Phi)$ из [2] и среднего поверхностного магнитного поля $Bs(\Phi)$ (mean magnetic field modulus) из [9]. Моделирование с применением двух этих фазовых зависимостей позволяет обойтись без знания угла наклона звезды i, который получается автоматически при построении моделей. В работе определенно показано, что магнитное поле формируется тремя магнитными диполями, а не одним, как обычно бывает. Угол принят как $i = 90^\circ$ на основании vsini из [9], подтверждая оценку, сделанную в [5]. В результате оказалось, что магнитное поле имеет структуру, похожую на однодипольную, с осью, параллельной оси вращения. Экстремумы Bs приходятся на фазы $\Phi = 0.1$ (минимум) и 0.62 (максимум). Диполи располагаются под небольшими углами к плоскости экватора. Таким образом, структура HD37776 оказывается довольно необычной (см. раздел 3). Впоследствии была рассчитана другая модель при предположении угла $i = 45^\circ$, которая значительно отличается от обсуждаемой в рассматриваемой работе.

Кочухов и др. [12] выполнили новое исследование структуры магнитного поля HD37776 с применением магнитной доплеровской техники при анализе профилей спектральных линий методом DI Invers10, описанным Пискуновым и Кочуховым [13] и Кочуховым и Пискуновым [14]. Угол наклона оси вращения к лучу зрения принят как $i = 45^\circ$, который найден в работе [10].

В начале работы авторы пересмотрели мультипольную модель Боленцера [5]. В этой модели сила магнитного поля и его структура определяются

величинами поля на полюсах от диполя B_d, квадруполя B_q и октуполя B_o, которые оказались, соответственно, равными -1, -4.3 и 97 кГс. В результате такой комбинации получается, что поле на поверхности изменяется от 35 до 100 кГс. Среднее поверхностное поле изменяется от 43 до 49 кГс. Авторы работы [12] посчитали этот **результат неправильным**.

Следующим шагом была реконструкция топологии магнитного поля HD 37776 с помощью методики DI Invers10, которая позволяет найти поверхностное распределение вектора магнитного поля и химического состава с помощью **одновременного использования спектрополяриметрических данных** из [9] и **кривой продольного магнитного поля** из [2]. Ценность такого подхода состоит в его физичности, по сравнению с применявшимся ранее мультипольным методом. Новый способ моделирует отдельные профили линий. При моделировании карта поверхности была разбита на 1176 ячеек (см. рис.5с в [12]), поляризованный синтетический спектр вычислен для линии HeI 5876 Å . В результате получено распределение магнитного поля по поверхности, показанное на рис.2а, взятое из [12]. Хорошо видно наличие нескольких магнитных областей. Штриховыми эллипсами обозначены "магнитные" области, черными кружками показано положение магнитных полюсов, полученных путем моделирования "методом диполей" [6-8]. Более подробно об этом будет сказано в разделе 3. В первом приближении характер распределения магнитного поля в обоих случаях совпадает. Это естественно, потому что исходный материал один и тот же. Таким образом, получено распределение магнитного поля по поверхности, коренным образом отличающееся от результата в работе [10].

В отличие от неудовлетворительных результатов, получаемых с помощью *многополюсной модели поля*, реконструкция DI Invers10 магнитной геометрии поля дает, как считают авторы, превосходное соответствие круговой поляризации спектров и адекватного описания фазовой зависимости *Be*(Ф), полученной в работе [2] (рис.1 в рассматриваемой статье [12], верхняя панель). Кроме распределения магнитного поля по поверхности, полученного из анализа линии HeI 5876 Å , была также определена концентрация гелия в разных участках поверхности. Гелий сконцентрирован в двух "пятнах", отмеченных на рис.2а белыми кружками. Положение центров **двух гелиевых "пятен"** в фазах Ф = 0.3 и 0.7 взято из [12]. Оказалось, что его содержание изменяется от умеренной недостаточности, по отношению к химическому составу Солнца, до избытка в 100 раз. Проблема состоит в том, что *концентрация гелия оказывается никак не связана ни с распределением продольного поля Be, ни среднего поверхностного магнитного поля Bs* (рис.1 в [12]). Гелиевое "пятно" в фазе 0.3 совпадает с минимумом *Bs*, другое гелиевое пятно на фазе 0.7 совпадает с максимумом *Bs* [12]. Это свидетельствует о том, что нет связи содержания гелия с силой магнитного поля, что противоречит известному свойству гелия

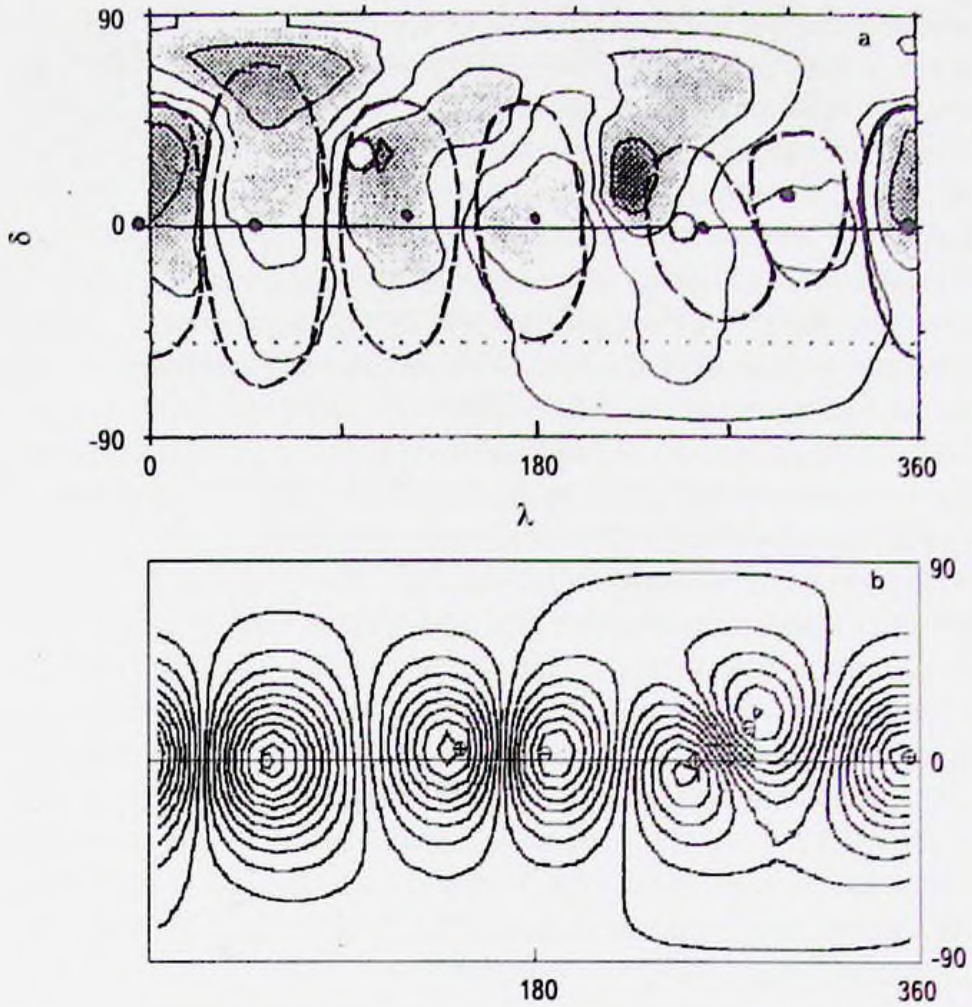

Рис.2. Распределение магнитного поля по поверхности HD37776. a) Распределение получено с помощью кода Invers10 на основе использования спектрополяриметрических данных и кривой изменения *Be*(Ф). Штриховой линией обозначены области магнитного поля, полученные путем моделирования методом "магнитных диполей". Кружки - положение гелиевых "пятен"; b) распределение магнитного поля, полученное методом "магнитных диполей".

и других химических элементов. Если обратиться к результатам работы [9], то можно сделать такое же заключение. Из серии наших исследований известно, что содержание гелия в магнитных He-r звездах пропорционально величине магнитного поля. В этом состоит большая проблема.

Далее авторы отмечают, что примененный метод DI Invers10 показывает поразительно другую картину распределения магнитного поля по поверхности у HD37776 по сравнению с предложениями предыдущих многополярных моделей. Топология поля сложна и особенно неосесимметрична. Существует шесть различных областей с положительной и отрицательной магнитной полярностью, что подтверждает результат, полученный в работе [11]. Следует

особо отметить, модель DI Invers10 дает **существенно более слабую напряженность поля**, чем предполагалось ранними авторами ([4,9,10] $Bs = 60$ кГс) на основе многополюсного моделирования (мы уже отмечали выше, что величины магнитного поля, получаемые многополюсными моделями, не имеют физического смысла, об этом будет сказано в *Заключении*). Изменения напряженности поля оказываются в пределах от ≈ 5 кГс до ≈ 30 кГс по поверхности звезды, что все еще много по сравнению с типичными магнитными звездами B-типа, но, безусловно, меньше, чем поле на нескольких наиболее экстремальных представителях CP звезд. Средний модуль магнитного поля HD 37776 колеблется от 13 до 16 кГс. Это существенно ниже прогнозируемого модуля поля ≈ 46 кГс по многополюсной модели и данных непосредственных измерений в работе [6] (см. рис.1, нижняя панель в рассматриваемой статье). Данное исследование изменения продольного магнитного поля HD 37776 ясно продемонстрировало фундаментальное ограничение моделей многополюсного поля, основанных на использовании только кривой $Be(\Phi)$. В то время как для многополюсной модели требуется рекордное поле, для воспроизведения измерений Be, магнитный DI Invers10 дает на порядок более слабое магнитное поле, причем средняя напряженность поля равна $Bs = \mathbf{14.5}$ кГс. Но это больше, чем получается при моделировании "методом диполей" (см. раздел 3), где $Bs = \mathbf{3.76}$ кГс. Это меньше среднего поверхностного поля, непосредственно измеренного с помощью зеемановского расщепления во многих CP звездах.

Модель Кочукова и соавторов [12] описывает только видимую полусферу звезды, поэтому магнитные области на рис.2а занимают преимущественно верхнюю часть карты, ниже экватора их нет. Применяемая методика не может точно описать распределение магнитного поля по всей поверхности. Резюмируя это отметим, что необходимо повторить эту работу с использованием зависимости $Be(\Phi)$ из работы [9], где амплитуда Be, полученная по линиям гелия, в десять раз больше. Важно также оценить влияние переналожения областей с разными величинами и знаками магнитного поля. Методика DI Invers10 создана для однодипольной структуры магнитного поля, она не учитывает того, что на видимой полусфере звезды HD37776 всегда находятся области с разным знаком и разной величиной магнитного поля. Трудно предсказать, как это влияет на профиль и распределение поляризации в нем, но очевидно, что используемая зависимость $Be(\Phi)$ из работы [2] подвержена влиянию этого эффекта. Она определенно уменьшена по амплитуде. Следовательно, результаты работы [12] следует считать несколько искаженными.

В данной работе авторы обращают внимание на результаты численного моделирования, выполненного в работе [15], которое продемонстрировало, что как тороидальные, так и полоидальные магнитные поля сравнимой силы должны присутствовать в звезде, чтобы поддерживать глобальную стабильность

структуры реликтового поля. Но с этой точки зрения нельзя объяснить сложные многодипольные магнитные поля и структуры с значительным смещением диполя из центра, такие как у HD37776 и других звезд [16,17].

3. *Наше исследование.*

1 вариант. В работах [18,19] построена модель *крупномасштабной составляющей магнитного* поля HD37776 методом "магнитных диполей (монополей)". Для этого, как и в предыдущем случае, использованы фазовые зависимости *Be*(Ф) из работы [2], причем модель была вычислена при предположении угла наклона звезды к лучу зрения $i = 45°$, найденного в работе [10]. Наша современная оценка величины $\sin i$ приводит к $i = 65°$, но результаты моделирования не сильно различаются. Параметры модели приведены в табл.1 в первых столбцах, обозначенных как "H". Величина виртуального магнитного заряда обычно измеряется в единицах максимального значения, но в данном случае все они оказались примерно одинаковы и приняты равными 1. Обозначения в таблице следующие: λ - долгота и δ - широта монополя, Δa - расстояние монополя от центра звезды в единицах радиуса, Δl - расстояние между монополями в единицах радиуса звезды. Подтвержден наш предыдущий результат [11], что **магнитное поле формируется тремя магнитными диполями**, находящимися практически в плоскости экватора вращения, но с разными расстояниями между монополями. Расстояние монополей от центра звезды Δa оказалось одинаковым, порядка ~0.5 радиуса звезды. Распределение магнитного поля по поверхности показано на рис.2b и схематически на рис.2a. Магнитные диполи располагаются вблизи экватора (табл.1). На рис.3 показано распределение силовых линий внутри звезды, белый круг в центре обозначает положение конвективного ядра, внутри которого, вероятно, нет сильного магнитного поля. Наблюдаемая (точки) и модельная (сплошная линия) фазовые зависимости *Be*(Ф) показаны на рис.4a, а модельная фазовая зависимость среднего поверхностного магнитного поля *Bs*(Ф) представлена на рис.4b. Отклонение

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО "ВОДОРОДНЫМ" (H) И "ГЕЛИЕВЫМ" (He) ИЗМЕРЕНИЯМ

N	Заряд		λ, °		δ, °		Δa, R_*		Δl, R_*	
	H	He	H	He	H	He	H	He	H	He
1	+1	+1	355	20	0	0	0.5	0.5	0.42	0.38
2	-1	-1	55	75	0	-3	0.5	0.5		
3	+1	+1	145	137	+5	-3	0.5	0.5	0.35	0.50
4	-1	-1	185	198	+3	0	0.5	0.5		
5	+1	+1	255	259	0	-6	0.5	0.5	0.22	0.54
6	-1	-1	280	324	+15	-6	0.5	0.5		

отдельных измерений от модельной зависимости оказывается в пределах 3σ. Зависимость $Bs(\Phi)$ по форме противоположна той, которая получена в работе [12]. Среднее поверхностное магнитное поле оказалось равным $Bs = 3760$ Гс [6], максимальные модельные полярные величины Bp равны −10358 и -10733 Гс. Обращаем внимание на то, что звезда HD37776 относится к магнитным звездам с гелиевыми аномалиями, которые имеют поле в среднем $Bs = 2.5$ кГс, что вдвое меньше, чем у звезд Si и SrCrEu-типа [20]. По нашим оценкам это

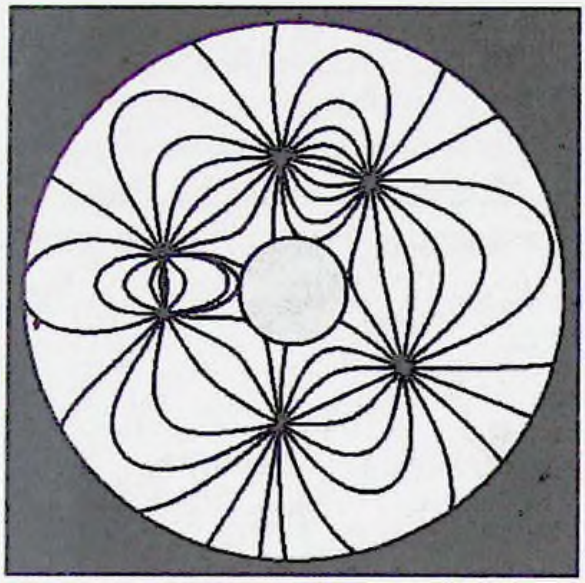

Рис.3. Распределение силовых линий в плоскости экватора внутри звезды HD37776, полученное по методу "магнитных диполей".

происходит вследствие малого возраста звезд с гелиевыми аномалиями, у которых крупномасштабное дипольное магнитное поле не успело сформироваться в достаточной степени. Кроме того, невозможно представить себе структуру магнитного поля, при которой продольная составляющая равнялась бы $Be = 2$ кГс, а среднее поверхностное поле при этом $Bs = 60$ кГс. Выше мы отмечали, что амплитуда $Be(\Phi)$, по-видимому, несколько занижена вследствие переналожения областей с разным знаком и величиной магнитного поля. Есть основания считать, что поле Be следует увеличить в 1.5-2 раза, но не более. Следовательно, вероятное значение $Bs \approx 6-7$ кГс.

Наша модель, основанная на гипотезе дипольных магнитных структур, позволяет предсказать распределение магнитного поля по всей поверхности (рис.2a, b). Черными точками на рис.2a отмечено положение магнитных полюсов в соответствии с нашей моделью, штриховые кружки схематически показывают положения магнитных областей, белые кружки - положение центров гелиевых "пятен", взятых из работы [12]. Вблизи $\lambda = 0°$ находится положительный полюс, далее их знаки чередуются. Сравнивая рис.2a и 2b, мы видим,

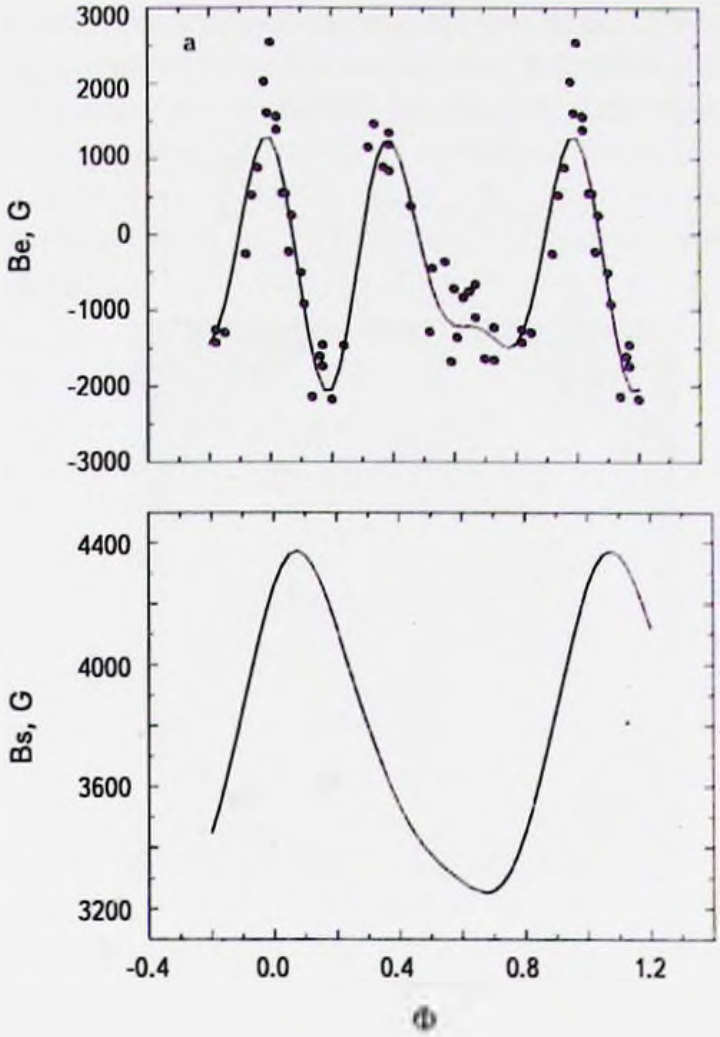

Рис.4. Результаты моделирования методом "магнитных диполей". a) Изменение магнитного поля по "водородным" измерениям, точки - измерения, сплошная линия - модель; b) Модельная зависимость изменения среднего поверхностного магнитного поля $B_s(\Phi)$ с фазой периода вращения Φ.

что по долготе $\lambda = 0°$, 25°, 60° и 180° магнитные области, в общем, совпадают, хотя имеются некоторые различия. Так, область поля с отрицательной полярностью ($\lambda = 25° - 30°$) находится значительно выше экватора, а на нашей карте магнитный полюс находится на экваторе. Это первая особенность. На этом же рисунке имеется область с большой величиной магнитного поля в точке ($\lambda = 205°$, $\delta = 30°$), которой на нашей карте нет, у нас там находится область между положительным и отрицательным магнитными полюсами. Это вторая особенность. Если бы эта область была на самом деле, то в этой фазе должен был бы быть на зависимости $Be(\Phi)$ пик значительной величины, который не наблюдается.

2 вариант. В данной работе мы попытались промоделировать структуру

магнитного поля звезды HD37776, используя измерения магнитного поля по линии гелия λ.5876Å из работы [9]. Угол $i=45°$, как и в предыдущем случае. На рис.5а точками показана наблюдаемая зависимость, сплошной линией - модельная. По форме она такая же, как и "водородная", т.е. наблюдаются три положительных максимума и три отрицательных, но амплитуда изменений "гелиевого" магнитного поля больше в **десять раз!!!** На рис.5b показана модельная зависимость $Bs(\Phi)$, которая противоположна "водородной" зависимости на рис.4b, она имеет сдвиг по фазе "гелиевой" зависимости по отношению к "водородной" на величину $\Delta\Phi = 0.5$. Основные параметры модели, выполненной после смещения зависимости $Be(\Phi)$ на $\Delta\Phi = 0.5$, приведены в табл.1 во вторых столбцах, обозначенных как "He". Согласие параметров такой модели, кроме величин Be, полученных по "водороду" и "гелию" для HD37776, удовлетворительное, это показывает, что структура магнитного поля определяется теми же **тремя магнитными**

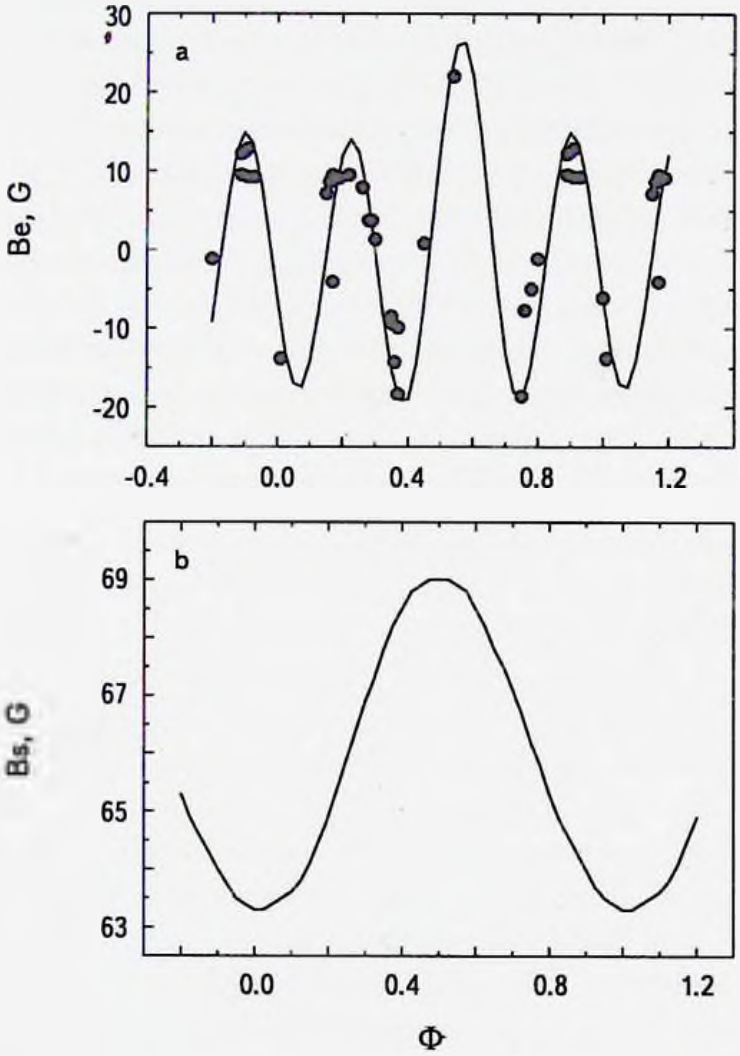

Рис.5. Моделирование магнитного поля методом "диполей" по измерениям линии гелия λ.5876 Å . a) Наблюдения - точки, модель - сплошная линия; b) модельная зависимость $Bs(\Phi)$.

диполями. Распределение магнитного поля по поверхности у них практически одинаковое. Учитывая сказанное, предполагаем, что внутренняя структура, представленная на рис.3, справедлива для обеих моделей.

Выше мы уже обсуждали непонятное явление, когда распределение гелия совершенно не связано с магнитным полем. На рис.2а приведена карта распределения магнитного поля из работы [12], причем на нее наложена схема распределения магнитного поля, которое получается одинаковым по "водородным" и "гелиевым" измерениям. Среднее поверхностное "гелиевое" магнитное поле оказывается неправдоподобно большим $Bs = 66$ кГс. Это больше, чем предсказывают результаты детального расчета [12] $Bs = 14.5$ кГс, или определенные нами по "водородным" измерениям $Bs = 3.76$ кГс. Таким образом, мы столкнулись с проблемой, заключающейся в том, что магнитное поле, определяемое по гелию, ровно в десять раз больше, чем по водородным линиям. Этот поразительный результат, заведомо нереальный, и его надо как-то объяснять. Частично это событие может возникнуть в результате особенностей методики измерений. Чтобы пытаться понять, в чем может быть дело, рассмотрим результаты измерений магнитного поля по смещению центров тяжести той же спектральной линии. Зависимость на рис.5а построена по измерениям центральных областей линий, а рис.6 по измерению центров тяжести линий гелия, взятых из [9]. Хорошо видно, что наблюдается большой разброс в пределах в среднем около 2 кГс и зависимость ничего общего с рис.5а не имеет. Возникает предположение, что сильное магнитное поле заметно только при измерении центральной области спектральных линий, остальная

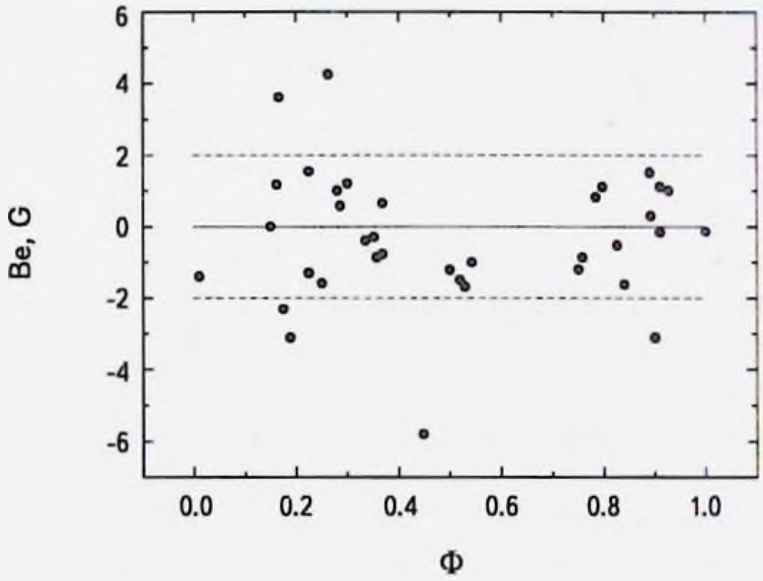

Рис.6. Изменение магнитного поля $Be(\Phi)$, полученного по измерению центра тяжести линий He λ 5876 Å .

часть спектральной линии практически не показывает зеемановского эффекта. Вероятно по этой же причине "водородные" измерения оказываются на порядок меньше "гелиевых". Если это так, то возможно, что измерения по центрам водородных линий привели бы тоже к большой величине поля. Величина магнитного поля, измеренная по 4-м линиям Si, оказалась такого же порядка, как и по линиям He, если исключить одно измерение, равное 61 кГс [9]. Очевидно, в этом эффекте может состоять одна из причин сильнейших разногласий между результатами, т.е. **одна из причин разногласий заключается в различии методик измерений**. Этот пример показывает, что от способа наведения на линию результат измерения величины магнитного поля может различаться в 10 раз. Совершенно понятно, почему получается слишком большая величина поля, оцененная многополярным математическим методом. Но непонятно различие результатов, получаемых по линиям водорода и гелия.

Очевидно, что кроме описанного эффекта существует явление переналожения областей с разной полярностью на видимой полусфере, которое должно приводить к уменьшению амплитуды и "водородной" и "гелиевой" фазовых зависимостей $Be(\Phi)$. В таком случае мы должны предположить соответствующее уменьшение амплитуд фазовых зависимостей $Bs(\Phi)$. Выше мы уже упоминали, что учет переналожения может привести к увеличению Bs в 1.5-2 раза. В таком случае "водородная" дипольная модель приведет к $Bs \sim 6 - 7$ кГс, а "гелиевая" к 100 - 120 кГс. Очевидно, что метод DI Invers10, используя фазовую зависимость $Be(\Phi)$, полученную по линиям водорода, не учитывает влияние перекрытия положительных и отрицательных областей на величину Be и она тоже приводит к уменьшенным величинам магнитного поля.

4. *Заключение*. В начальный период исследований некоторые авторы пытались описать фазовые зависимости $Be(\Phi)$ и распределение магнитного поля по поверхности с помощью сферических гармоник. Рассматривается ряд полиномов Лежандра разных порядков - диполя, квадруполя, октуполя и т.д. Таким путем можно удовлетворительно описать наблюдаемую фазовую зависимость $Be(\Phi)$ с разными коэффициентами, которые подбираются опытным путем. Но эти коэффициенты не имеют физического смысла. В физике магнитное поле описывается виртуальным магнитным диполем, аналогично электрическому диполю. Физического смысла не имеет также описание фазовых зависимостей с помощью синусоид. Наблюдаемое магнитное поле не является чисто поверхностным явлением, оно связано с глубокими структурами. Дипольное представление структур магнитного поля имеет физическую основу.

Рассмотрев представленные выше результаты исследований магнитного поля HD37776, мы видим, что они полны противоречий. В первую очередь

мы должны обосновать реальность наших модельных расчетов. В настоящее время общепринята реликтовая гипотеза происхождения магнитных звезд [21,22]. Сжатое вместе с протозвездным облаком полоидальное магнитное поле, очевидно, иногда имеет сложную структуру, особенно в результате прохождения нестационарной фазы Хаяши. Существует мнение, что поле в таких протозвездах концентрируется в отдельных слоях, ячейках, магнитных жгутах, волокнах и т.д. [23,24]. В результате в фазе HAeBe будущие магнитные звезды имеют очень слабое, запутанное поле. Тем не менее, в объеме будущей магнитной звезды сохраняется некоторый общий крупномасштабный вектор, или два-три вектора полоидального магнитного поля. Поэтому суммарное магнитное поле звезды перед выходом ее на Главную последовательность состоит из двух фракций - крупномасштабной реликтовой (полоидальной) и мелкомасштабной (запутанной). После формирования магнитной лучистой звезды мелкие магнитные структуры относительно быстро исчезают вследствие омической диссипации за время $t = 4\pi\omega r^2$, где ω - проводимость плазмы, r - характерный размер намагниченной плазмы. Кроме этого магнитные силовые линии претерпевают изменения под действием силы натяжения $T = AB/4\pi$, где A - поперечное сечение магнитной трубки и B - напряженность магнитного поля. Эту возможность, очевидно имел в виду Мосс [23], когда говорил, что мелкомасштабное поле должно диффундировать в более однородную форму. Таким образом, сложные магнитные системы оказываются неустойчивыми и со временем разрушаются. Вследствие больших возрастов магнитных звезд, в них, в конце концов, остается только крупномасштабная полоидальная составляющая, которая в первом приближении хорошо описывается виртуальным магнитным диполем. Это показали наши результаты моделирования около 120 магнитных звезд [20]. Уже в самом начале своих исследований Бэбкок обнаружил, что профили спектральных линий не содержат признаков присутствия магнитных "пятен" в исследованных звездах. Звезда намагничена целиком и структура магнитного поля дипольная. Матисс и др. [25] акцентирует внимание на том, что среди расщепленных магнитным полем линий не заметно наличия несмещенной компоненты, которая возникла бы, если бы на поверхности звезды были бы области без поля или с другой величиной поля. Престон [26] тоже отмечает, что если мультиполя высокого порядка и присутствуют, то они имеют очень небольшой интегральный эффект, преобладающий компонент в магнитных звездах всегда дипольный. Эти и другие соображения привели к созданию метода моделирования магнитных полей химически пекулярных звезд, называемого "методом диполей" [6-8].

Звезда HD37776 молодая, ее возраст $\log t = 7.00$ лет [27], поэтому на ее поверхности возможно наличие сохранившихся неоднородностей магнитного поля. Частично этим можно объяснить "клочковатость" магнитных областей,

которая заметна на рис.3. На рис.7 показана зависимость возраста звезд He-r от их положения на Главной последовательности. Звездочкой показано место звезды HD37776 [27]. Вероятно, величина R/Rz завышена, скорее звезда находится ближе к ZAMS. На рис.8 показано распределение гелиевых звезд по величинам Bs, взятых из работы [27]. Видно, что средние поверхностные величины магнитного поля находятся в узких пределах 0-10 кГс. По величине Bs, определенной из "водородных" измерений, звезда HD37776 находится в пределах, занимаемых другими звездами с гелиевыми аномалиями, она на

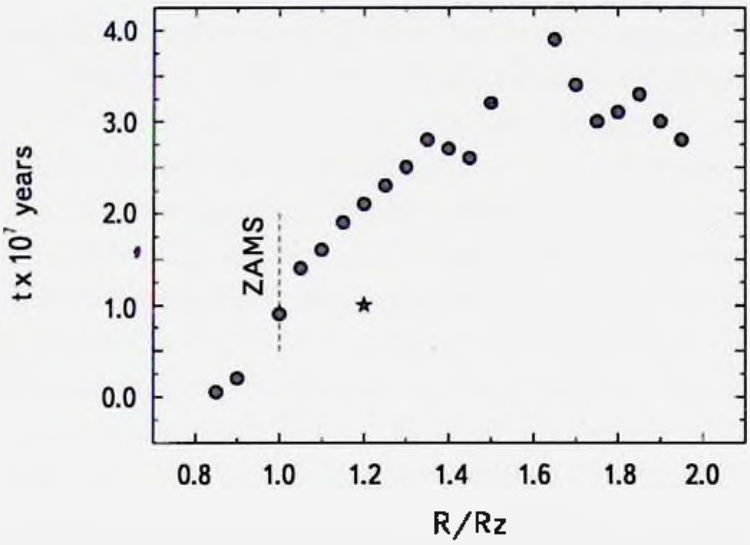

Рис.7. Положение звезды HD37776 среди других звезд такого же типа пекулярности на диаграмме Герцшпрунга-Рессела.

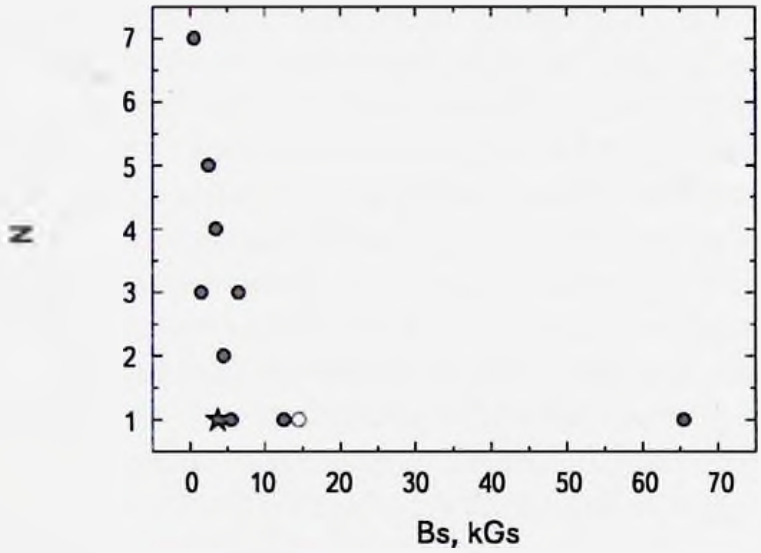

Рис.8. Распределение звезд с аномальными линиями гелия по величине Bs. Звездочка - звезда HD37776, по модели [18,19], кружок - то же по модели [12], правая точка - по измерениям линии гелия.

рисунке отмечена звездочкой. Но в соответствии с результатом моделирования по "телиевыми" измерениями она отскакивает сильно вправо. Результат Кочукова с соавторами находится в пределах, занимаемых звездами с телиевыми аномалиями. Из рассмотрения этого распределения можно сделать предположение, что в измерениях магнитного поля в работе [9] либо заключена какая-то ошибка, либо мы имеем дело с выдающимся явлением. Наше мнение, основанное на опыте многочисленных исследований структур магнитных полей химически пекулярных магнитных звезд, состоит в том, что измерения поля HD37776 следует увеличить в 1.5-2 раза, чтобы учесть влияние перекладожения областей с разными знаками магнитного поля, но и в этом случае звезда окажется в наблюдаемых пределах. Если же сделать такую же поправку для измерения поля по линиям He, то окажется, что величина $Bs > 100$ кГс. Обращаем особое внимание на то, что в работе Хохловой и др. [10] отмечается, что "ширина спектральных линий достигает 5 Å и она обусловлена зеемановским расщеплением, однако вследствие быстрого вращения **наблюдаемые компоненты замыты и не разрешены**". В то же время в работе с уверенностью говорится о поле, равном 60 кГс. Но тогда величина $v\sin i = 132$ км/с в каталоге [28], оцененная несколькими авторами, не соответствует ширине линии 5 Å.

Сложная структура профилей звезды HD37776 обсуждается в работе [29], где упоминаются признаки эмиссии в Hα. Если это так, то реальность измерения поля по центрам спектральных линий оказывается сомнительной. Перекладожение эффектов от магнитных областей с разным знаком трудно учесть при измерениях поляризации и формы профилей спектральных линий. Наша дипольная модель это учитывает, но не учитывают сами измерения.

В отличие от рис.3 магнитные полюса, в соответствии с результатами нашего моделирования, располагаются вдоль экватора звезды (рис.2b). Преимущественно малый угол α у магнитных звезд представляет собой известное свойство магнитных звезд. Оно объясняется тем, что в магнитных протозвездах преимущественные направления магнитных полей вдоль плоскости экватора возникают в результате действия избирательной селекции в процессе "магнитного торможения". Максимальная потеря момента вращения и, затем, отделение от немагнитных нормальных протозвезд, происходит среди тех магнитных протозвездных облаков, которые имеют малый наклон магнитной оси к плоскости их вращения [30]. Таким образом, предположение о дипольном характере структур магнитного поля магнитных протозвезд сложилось уже в начальный период исследований. Результаты нашего моделирования подтвердили это. Малая вероятность того, что потеря момента вращения произошла в фазе HAeBe, обсуждается в работе [31].

В настоящем анализе мы предполагаем, что сильные различия магнитного

поля на поверхности звезды HD37776, обнаруживаемые разными методами, объясняются сложной структурой крупномасштабного магнитного поля, а также присутствием мелкомасштабной фракции, отдельные фрагменты которой могут иметь сильное поле. Как говорилось выше, на наблюдаемую "водородную" фазовую зависимость *Be*(Ф) (рис.4а) влияет **эффект переналожения** разных магнитных областей, имеющих разный знак, которые располагаются одновременно на видимой полусфере. Это обстоятельство должно приводить к некоторому **уменьшению амплитуды изменения магнитного поля *Be***. Поэтому очевидно, что после учета этого эффекта **величины *Be*** и модельное среднее поверхностное магнитное поле ***Bs* должны были бы увеличиться**. Вероятно, отскок измерений вверх в $\Phi = 0$ на фазовой зависимости рис.4а происходит именно по этой причине. Но, очевидно, учет этого эффекта не увеличит поле до 30, и тем более до 60 кГс. Такой же вывод, как мы видели, сделан в [12]. Мы полагаем, что учет "эффекта переналожения" увеличит среднее поверхностное магнитное поле, определяемое "методом диполей", не более чем в 1.5-2 раза. Таким образом получаем $Bs \approx 6\text{-}7$ кГс. Методика DI Invers10 тоже не учитывает эффект переналожения. Третий эффект заключается в том, что мелкомасштабная фракция магнитного поля состоит из ячеек с положительным, отрицательным и с нулевым магнитным полем. Суммарный эффект должен приводить к расширению спектральной линии, увеличивая фиктивно vsini. В фазах положительного поля на видимой полусфере больше ячеек с сильным положительным полем (или их площадь больше), и наоборот. Очевидно, что расщепленные в сильном поле зеемановские компоненты накладываются на расширенный несколькими эффектами профиль и становятся заметными. С возрастом мелкомасштабные магнитные структуры релаксируют в крупномасштабную полоидальную форму, в результате среднее магнитное поле гелиевых звезд *Bs* должно стремиться с возрастом к увеличению, как у Si и SrCrEu-звезд. He-strong звезды на два порядка более молодые, чем звезды SrCrEu-типа. Следовательно, их магнитное поле содержит значительную долю мелкомасштабной фракции, которая после фазы HAeBe не успела еще достичь такой же степени релаксации в крупномасштабную структуру, какая наблюдается у звезд SrCrEu-типа. По этой причине звезды с аномальными линиями гелия имеют в среднем вдвое меньше магнитное поле [20]. По этой же причине еще более молодые звезды HAeBe имеют величины поля только порядка десятков, иногда сотен, гаусс. Возможно, **пример звезды HD37776 показывает, почему звезды HAeBe имеют только очень слабое поле**. Запутанное поле может иметь небольшие ячейки с очень высокими величинами поля [23,24]. Они должны хорошо выделяться на фоне сложного профиля, если занимают достаточно большую площадь. Но среди **узких** спектральных линий металлов зеемановское расщепление от самых намагниченных ячеек легче

отделить от ячеек с другой величиной поля, чем при использовании более широких линий водорода. Поэтому магнитное поле, определяемое по узким линиям гелия, больше соответствует полю в ячейках. Пока это только предположение. Предстоит более подробное исследование этой звезды. Таким образом, сильные различия магнитного поля на поверхности звезды HD37776, обнаруживаемые разными методами, можно объяснить сложной структурой крупномасштабного магнитного поля, а также присутствием мелкомасштабной фракции, отдельные ячейки которой могут иметь сильное поле. Та же методика измерения магнитного поля по линиям Hβ, примененная для исследования звезд α^2CVn и 53Cam, у которых магнитное поле имеет более простую конфигурацию, привела к прекрасным результатам [32].

Работа [12] тоже дает искаженные данные, потому что не учитывает влияние перекрытия на фазовую зависимость *Be*(Ф) из работы [2].

В заключение следует сделать следующее замечание. В настоящее время в литературе обсуждается мнение, что теоретически устойчивы только полоидально-тороидальные магнитные структуры [15]. В наших исследованиях магнитных структур мы неоднократно пытались обсуждать проблему несоответствия наблюдаемых свойств с этими теоретическими предсказаниями. Создается впечатление, что упомянутая полоидально-тороидальная теория устойчивости магнитных структур чего-то не учитывает.

В связи с обсуждаемыми проблемами наметим основные задачи дальнейшего исследования звезды HD37776:

1) В чем причина столь колоссального различия результатов "водородных" и "гелиевых" измерений магнитного поля?

2) Почему распределение гелия по поверхности звезды не связано с распределением магнитного поля?

3) Каково влияние областей с разным знаком магнитного поля на видимой полусфере звезды на фазовую зависимость магнитного поля *Be*(Ф)?

Специальная астрофизическая обсерватория РАН,
Россия, e-mail: glagol@sao.ru

REMARKS ON THE PROPERTIES OF THE MAGNETIC FIELD OF A STAR HD37776

Yu.V.GLAGOLEVSKIJ, A.F.NAZARENKO

The results of the investigation of the magnetic field and its structure in star HD37776, performed by different authors, are considered. There are significant contradictions between the results, which do not allow us to assume that the star has been finally studied. The main reason for the erroneous results is the complexity of the structure of the magnetic field. As a result, there are difficulties in measuring of the magnetic field and its interpretation.

Keywords: *magnetic field stars: models: star HD37776*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Yu.V.Glagolevskij, A.F.Nazarenko*, Astrophys. Bull., **72**, 2017.
2. *I.B.Thompson, J.D.Landstreet*, Astrophys. J., **289**, L9, 1985.
3. *D.A.Bohlender*, PhD Thesis, Univ. Western Ontario, Canada, 1988.
4. *D.A.Bohlender, J.D.Landstreet*, Science News, Jan. 27, 1990.
5. *D.Bohlender*, in Pulsation, rotation and mass loss in Early-type stars, IAU Symp. No 162, eds. L.A.Bolona, H.F.Henrichs, J.M. Le Contel, 1994, p.155.
6. *E.Gerth, Yu.V.Glagolevskij, G.Scholz*, in Stellar magnetic fields, ed. Yu.V.Glagolevskij, I.I.Romanyuk, Moscow, 1997, p.67.
7. *E.Gerth, Yu.V.Glagolevskij*, in Magnetic fields of chemically peculiar and related stars, Moscow, 2000, p.151.
8. *E.Gerth, Yu.V.Glagolevskij*, Bull. SAO, **56**, 25, 2003.
9. *I.I.Romanyuk et al.*, Bull. SAO, **45**, 93, 1998.
10. *V.L.Khokhlova et al.*, Astron. Lett., **26**, 177, 2000.
11. *Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth*, Bull. SAO, **51**, 84, 2001.
12. *O.Kochukhov et al.*, Astrophys. J., **726**, 24, 2011.
13. *N.Piskunov, O.Kochukhov*, Astron. Astrophys., **381**, 736, 2002.
14. *O.Kochukhov, N.Piskunov*, Astron. Astrophys., **388**, 868, 2002.
15. *J.Braithwait, A.Nordlund*, Astron. Astrophys., **450**, 1077, 2006.
16. *Yu.V.Glagolevskij, A.F.Nazarenko*, Astrophys. Bull., **72**, 411, 2017.
17. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **73**, 201, 2018.
18. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **71**, 43, 2016.
19. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **68**, 356, 2013.
20. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophysics, **59**, 321, 2016.

21. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophysics, **57**, 204, 2014.
22. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **72**, 334, 2017.
23. *D.Moss*, IAU Symp., **224**, 245, 2004.
24. *A.E.Dudorov*, in Itogi nauki i techniki, Ser. Astronomiya, ed. G.M.Rudnitskii (VINITI, Moskva, 1990), **39**, p.77.
25. *G.Mathys*, *S.Hubrig*, *J.D.Landstreet et al.*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., **123**, 353, 1997.
26. *G.Preston*, Publ. Astron. Soc. Pacif., **83**, 571 1971.
27. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **74**, 66, 2019.
28. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **72**, 457, 2017.
29. *I.I.Romanyuk et al.*, IAU Symp. No176, Vienna, 1995, p.153.
30. *T.Ch.Mouschovias*, *E.V.Paleologou*, Astrophys. J., **230**, 204, 1979.
31. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophysics, **61**, 413, 2018.
32. *E.F.Borra*, *J.D.Landstreet*, Astrophys. J., **212**, 141, 1977.