

## МАГНИТНЫЕ ПРОТОЗВЕЗДЫ

Ю.В.ГЛАГОЛЕВСКИЙ

Поступила 25 марта 2015

Принята к печати 24 июня 2015

Обсуждается возможный вариант эволюции магнитных протозвезд на стадии "до фазы Хаяши". Приводятся доводы в пользу предположения, что основные свойства магнитных звезд: 1) магнитные звезды обладают глобальными дипольными магнитными полями с преимущественной ориентацией магнитных силовых линий вдоль плоскости экватора вращения, 2) медленное вращение, 3) сложные, двух и трех дипольные структуры магнитного поля значительной части звезд, 4) разделение звезд на магнитные и нормальные в пропорции 1:10 формируются в период гравитационного коллапса протозвездных облаков "до фазы Хаяши".

Ключевые слова: *магнитные протозвезды: медленное вращение*

1. *Введение.* Продолжая развивать предложенный в работе [1] сценарий реликтового происхождения и эволюции магнитных звезд, мы рассматриваем важный вопрос, каковы были условия эволюции магнитного поля у магнитной протозвезды в фазе гравитационного коллапса "до нестационарной фазы Хаяши"? В указанной работе мы разделили эволюцию магнитной звезды на 4 этапа: 1) Гравитационный коллапс, 2) нестационарная фаза Хаяши, 3) период молодых звезд Ae/Be Хербига и 4) Главная последовательность. В наших предыдущих работах [1-3] обсуждаются результаты моделирования магнитных структур около 160 звезд и свойства магнитных полей CP-звезд, кратко рассмотрены особенности эволюции CP-звезд и возможные механизмы приобретения основных свойств. Эти же данные мы используем в настоящей работе. Проблема звездного магнетизма изучается нами с точки зрения гипотезы реликтовой природы магнитного поля, так как в последнее время появляется все больше результатов, поддерживающих именно реликтовую природу магнитных полей у химически пекулярных (CP) звезд [1-4]. Гипотеза реликтовой природы магнитных полей на CP-звездах была предложена Каулингом, Спитцером и Местелем [5-7]. Главная идея гипотезы данного механизма заключается в том, что магнитное поле, наблюдаемое на магнитных звездах Главной последовательности, является остатком поля, присутствовавшего в протозвездных облаках и впоследствии усиленное (сжатое) в течение гравитационного коллапса. Теорию коллапса намагниченных протозвездных облаков успешно развивал также Дудоров [4,8]. Реликтовая гипотеза обсуждается во многих работах Местеля и Мосса [5,9-12] и др.

В этих же работах теоретически изучаются возможности магнитного динамо, однако эта гипотеза не может объяснить основные свойства магнитных звезд. Имеются убедительные данные о том [1,2], что основные особенности будущих магнитных звезд формируются именно в начальный период эволюции звезд (до Главной последовательности), которые заключаются в следующем: 1) магнитные звезды обладают глобальными дипольными магнитными полями с преимущественной ориентацией магнитных силовых линий вдоль плоскости экватора вращения (малый угол  $\alpha$ ), 2) магнитные звезды медленно вращаются, 3) значительная часть звезд имеет сложные структуры магнитного поля, 4) звезды разделены на магнитные и нормальные в пропорции 1:10. Анализ наблюдательных данных показывает, что мало вероятно, что эти свойства могли быть приобретены в турбулентной фазе трека Хаяши, или в фазе эволюции молодых Ae/Be звезд Хербига [1]. Кроме того Мосс [13] задает вопрос: почему нет заметных корреляций между величиной поля и другими свойствами? Почему у магнитных звезд очень большие различия величин поля? Перечисленные свойства не могут быть объяснены в рамках теории структур из двух и более магнитных жгутов [10], в рамках гипотезы Braithwaite [14], а также в рамках гипотезы магнитного динамо, но, на наш взгляд, логично вписываются в предполагаемый в работе [1] сценарий.

*2. Основные результаты моделирования магнитных полей.* Наблюдаемые сейчас особенности структур магнитных полей Ap/Vr-звезд несомненно связаны с процессами, происходившими в прошлом. Поэтому мы попытаемся проанализировать основные результаты моделирования структур магнитного поля, полученные нами методом "магнитных диполей" в работах [2,15-18], который раньше назывался "методом магнитных зарядов". В этом методе используется причина, источник магнитного поля внутри звезды, а именно воображаемый магнитный диполь. Одним из главных свойств дипольных моделей состоит в том, что в месте нахождения диполя оказывается область с максимальной напряженностью поля. Приблизительно 22% магнитных звезд имеет максимальную напряженность магнитного поля в центре звезды, у остальных звезд максимальная напряженность смещена из центра. Это хорошо известный факт. Принципиальное отличие метода "магнитных диполей" от других состоит в том, что он описывает внутреннюю структуру поля и, одновременно распределение поля по поверхности. Другие известные методы занимаются описанием распределения магнитного поля только по поверхности звезды. Наш подход основывается на потенциальной теории магнетизма и дает, как показывает практика, достаточно близкий к истине результат. Физический смысл дипольного приближения состоит в том, что можно получить в точности структуру поля теоретического диполя, задав внутри звезды соответствующий круговой ток. В таком случае мы получили бы реальное дипольное поле в чистом виде. Наблюдаемая структура достаточно

точно описывается предполагаемым теоретическим диполем. Фактически внутри магнитных звезд такого тока нет, как нет и генерации его. Опыт показывает, что реликтовые магнитные фрагменты внутри звезд создают структуры магнитного поля близкие тем, которые описывает теоретический магнитный диполь, или круговой ток. Силовые линии вморожены в вещество и являются остатком протозвездных магнитных полей, сжатых вместе с веществом в процессе гравитационного коллапса. Электрические заряды в намагниченной звезде вращаются вдоль силовых линий по спиралям вплоть до следующего столкновения, затем они движутся по другой спирали и т.д., но магнитного поля не создают. Измеренные фазовые зависимости изменения магнитного поля, выполненные даже с максимальной точностью  $\sigma = 5$  Гс, совпадают с модельной фазовой зависимостью в пределах  $(1.5 - 2)\sigma$ . Оказывается, что в случаях, когда известны две фазовые зависимости эффективного  $B_e(\Phi)$  и среднего поверхностного  $B_s(\Phi)$  магнитного поля (mean magnetic field modulus), модель правильно описывает их при одних и тех же параметрах. Кстати, это может также быть признаком отсутствия систематических ошибок в измерениях  $B_e$  и  $B_s$ . Таковы результаты, вызывающие достаточную уверенность в правильности метода "магнитных диполей". К сожалению, теоретическое описание процесса формирования дипольного магнитного поля у протозвезды невозможно вследствие сложности уравнений.

Наши работы по моделированию магнитных структур [3,19] химически пекулярных звезд показали, что их можно разделить на 4 основных типа: 1) сложные, многодипольные структуры, 2) структуры с диполем, смещенным из центра поперек оси, 3) структуры с диполем, смещенным вдоль оси и 4) структуры с диполем в центре звезды. Результаты моделирования [3,19] показывают также, что у магнитных звезд наблюдаются разные внутренние дипольные конфигурации - от максимальной напряженности поля в малом объеме, когда поле описывается "точечным" диполем, как схематически показано на рис.1 слева, до широкой вытянутой области, как показано на схеме рис.1

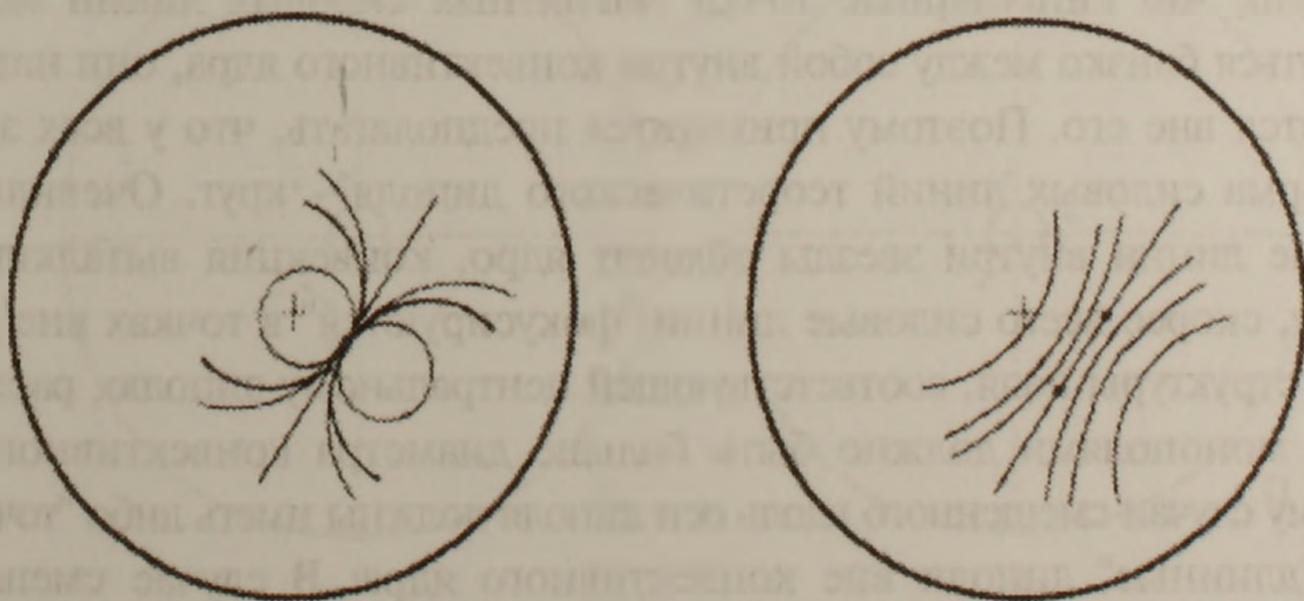


Рис.1. Схемы силовых линий в двух вариантах, смещенных из центра диполей. Слева - "точечный диполь", справа - "длинный диполь".

справа (этот случай мы называем полем "длинного" диполя). Первый случай показывает, что расстояние между магнитными монополями много меньше радиуса звезды  $l \ll R$ , во втором случае сингулярные точки, в которых сходятся модельные силовые линии, расположены на значительном расстоянии друг от друга, иногда достигающем  $l \sim 0.5 R$  (радиуса звезды). Теоретической проблемой является совместимость конфигурации центрального диполя с конвективным ядром.

Таблица 1

### ОТНОСИТЕЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВО ЗВЕЗД С РАЗНЫМИ ТИПАМИ СТРУКТУР МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Структура	Доля звезд
Центральный диполь	22%
Смещенный диполь вдоль оси	41
Смещенный диполь поперек оси	11
Сложная структура	26
Неизвестная структура	20%

Результаты моделирования показывают, что 22%+41% (табл.1) звезд имеют магнитные структуры, которые можно описать моделью с диполем, с малым расстоянием между монополями. В остальных случаях наблюдаются диполи с  $l \sim R$ . Эта особенность должна быть в будущем изучена теоретически. Такие диполи наблюдаются в сложных структурах и в случаях смещения диполя поперек их оси. К сожалению, в моделях центрального диполя и смещенного диполя вдоль его оси, величину  $l$  нашей методикой достаточно точно определить нельзя, потому что форма фазовой зависимости изменения магнитного поля в этом случае слабо зависит от  $l$ . Сдвиг диполя вдоль оси влияет на структуру поверхностного распределения очень сильно. Сила поля на полюсах и, соответственно, на полусферах, оказывается разной. Однако очевидно, что сингулярные точки магнитных силовых линий не могут находиться близко между собой внутри конвективного ядра, они наверняка находятся вне его. Поэтому приходится предполагать, что у всех звезд  $l \sim R$ . Форма силовых линий теоретического диполя - круг. Очевидно, что силовые линии внутри звезды обходят ядро, конвекция выталкивает их наружу, скорее всего силовые линии "фокусируются" в точках вне ядра. В случае структуры поля, соответствующей центральному диполю, расстояние между монополями должно быть больше диаметра конвективного ядра. Поэтому случаи смещенного вдоль оси диполя должны иметь либо "точечные", либо "длинные" диполи вне конвективного ядра. В случае смещенного диполя поперек оси и в случае многодипольных структур величина  $l$  измеряется достаточно надежно. Таким образом, проблема внутренних структур поля в

связи с взаимодействием с конвективным ядром, для моделей центрального диполя остается неясной. В случаях моделей двойного и тройного диполей они оказываются всегда типа "длинный диполь". Этот интересный эффект необходимо исследовать подробно. К сожалению, к настоящему времени моделирование не показало каких-либо заметных признаков влияния турбулентного ядра на внутреннюю структуру магнитного поля.

Одним из самых важных свойств магнитных структур является преимущественная ориентация магнитных диполей, т.е. малый угол наклона осей диполей к плоскости экватора вращения  $\alpha$ . Это свойство связано с процессами потери момента вращения протозвездных облаков в начальных фазах эволюции. Наши исследования магнитных структур подтверждают полученный ранее результат [20-22] о преимущественной ориентации магнитных диполей вдоль плоскости экватора вращения звезд  $\alpha = 0 - 20^\circ$ . Это свойство будет рассмотрено подробно в разделе 7. В старых работах, когда применяли модели центрального диполя, вычислялись углы  $\beta$  между осью диполя и осью вращения. Когда стало ясно, что звезд с

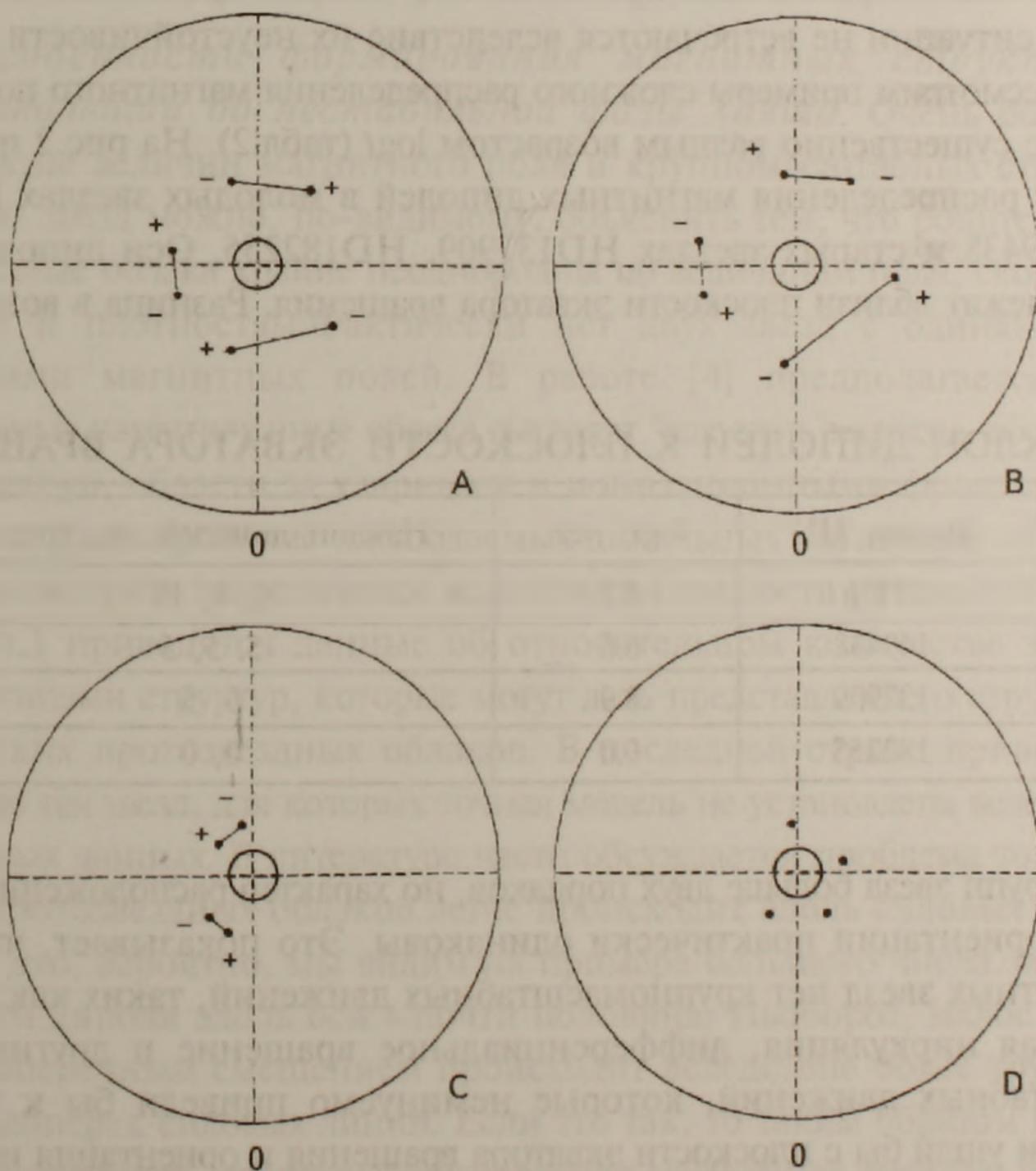


Рис.2. Схемы распределения магнитных диполей у звезд разного возраста. А-HD 37776, В - HD 149438, С - HD 137909, D - HD 182255.

центральным диполем мало, оказалось правильнее использовать угол  $\alpha$ .

Сложные структуры описываются магнитными диполями, смещенными из центра звезды иногда на  $0.5 R$ . Предполагается [1], что сложные структуры формируются из 2-3 крупных магнитных фрагментов в протозвездном облаке (таких объектов 26%, табл.1). Более простые конфигурации формируются в протозвездных облаках с более однородным распределением магнитного поля. Такие две относительно простые конфигурации достаточно хорошо были изучены Престоном и Ландстритом [20-22].

В случае "точечного" диполя в объеме с радиусом  $R=0.01 R$  и среднем поверхностном магнитном поле  $B_s=1000$  Гс, магнитное поле оказывается порядка  $B_c \sim 10^9$  Гс. Если же диполь находится на некотором расстоянии от центра звезды и он является "длинным диполем", то напряженность поля в его окрестности будет на несколько порядков меньше.

В моделях с двух- и трех-дипольными конфигурациями знаки зарядов чередуются (рис.2) и не было случаев, когда два диполя внутри звезды были бы ориентированы одинаковыми знаками в одну сторону. Это интересная теоретическая проблема. Вероятно, в протозвездных облаках такие ситуации не встречаются вследствие их неустойчивости [23].

Рассмотрим примеры сложного распределения магнитного поля внутри звезд с существенно разным возрастом  $\log t$  (табл.2). На рис.2 приведены схемы распределения магнитных диполей в молодых звездах HD37776, HD149438 и старых звездах HD137909, HD182255. Оси диполей у всех звезд лежат вблизи плоскости экватора вращения. Разница в возрасте этих

Таблица 2

#### НАКЛОН ДИПОЛЕЙ К ПЛОСКОСТИ ЭКВАТОРА ВРАЩЕНИЯ

Звезда, HD	$\log t$ , лет	Наклон диполей $\alpha$ , град.
37776	6.2	1, 4, 15
149438	6.6	5, 5, 5
137909	8.9	6, 5
182255	9.0	0, 0

двух групп звезд больше двух порядков, но характер расположения диполей и их ориентации практически одинаковы. Это показывает, что внутри магнитных звезд нет крупномасштабных движений, таких как меридиональная циркуляция, дифференциальное вращение и других крупномасштабных движений, которые неминуемо привели бы к тому, что диполи ушли бы с плоскости экватора вращения и ориентация изменилась бы. В работах [24,25] тоже приводились данные о том, что углы наклона  $\beta$  между осью вращения и осью диполя с возрастом не меняются со

временем. Зависимость  $\alpha - \log t$  в работе [25] получается со средним угловым коэффициентом  $\kappa = 4^{\circ}.1 \pm 5^{\circ}.8$ . Такая же зависимость, построенная по последним данным [2], приводит к похожему результату  $\kappa = 3^{\circ}.2 \pm 2^{\circ}.5$ .

Крупномасштабные магнитные неоднородности и структуры со смещенным диполем чрезвычайно долговечны, в соответствии с квадратическим законом времени жизни (см. формулу (1)). Они легко переживают время от протозвездного коллапса до момента покидания Главной последовательности. Можно привести и другие примеры, все они подтверждают гипотезу стабильного во времени "жесткого ротатора" магнитных звезд [27,28] и то, что крупномасштабные структуры имеют скорее всего реликтовую природу. Возможно, что предполагаемая меридиональная циркуляция [26] существует только у немагнитных, нормальных быстро-вращающихся звезд. Детальное рассмотрение накопленных данных показывает, что полный магнитный поток оказывается практически неизменным по крайней мере  $10^9$  лет [2,29], что тоже поддерживает гипотезу об отсутствии внутри звезд глобальных потоков вещества. Магнитная структура "вморожена" в звездное вещество.

3. *Особенности формирования магнитных структур в период эволюции до неустойчивой фазы Хаяши.* Очень большое разнообразие величин магнитного поля и крупномасштабных структур магнитных звезд можно, по-видимому, объяснить тем, что родительские протозвездные облака крайне неоднородны по величинам поля, скоростям движения и плотностям. Фактически нет двух звезд с одинаковыми параметрами магнитных полей. В работе [4] предполагается, что протозвездные намагниченные облака выглядят "как слои, волокна, оболочки, течения, струи, области за ударными и ионизационными фронтами". К сожалению, формирование наблюдаемых дипольных магнитных структур трудно рассмотреть теоретически вследствие сложности уравнений.

В табл.1 приводятся данные об относительном количестве звезд с разными типами структур, которые могут дать представление о структурах родительских протозвездных облаков. В последней строке приводятся данные для тех звезд, для которых точная модель не установлена вследствие неуверенных данных. В литературе часто обсуждается проблема того, что коллапс протозвездных облаков легче происходит вдоль силовых линий [4,30,31]. Это, вероятно, мы видим на примере большого числа звезд со смещением диполя вдоль оси - почти половина. Наоборот, малое число звезд с поперечным смещением происходит вследствие более трудного коллапса поперек силовых линий. Если это так, то таким образом можно серьезно поддержать гипотезу формирования магнитных структур именно в период коллапса протозвездных намагниченных облаков. Однако наблюдаемые сейчас магнитные конфигурации не показывают никаких признаков

существования магнитного псевдо-диска в центре звезды, который предполагается в некоторых теоретических работах. Возможно, в момент появления конвективного ядра псевдо-диск разрушается.

Дудоров [4] исследовал связь интенсивности магнитного поля  $B$  с плотностью облаков  $n$  посредством зависимости  $B/B_0 = (n/n_0)^k$ . В процессе эволюции намагниченных облаков значения  $k$  могут быть, по его мнению, в интервале от 0 до 1. На основании исследования сложных структур магнитных полей [1-3] наша точка зрения в этом отношении несколько другая, она состоит в том, что возникновение сложных структур магнитных полей у СР-звезд происходит в период гравитационного коллапса протозвездных облаков, имеющих неравномерную, не связанную с плотностью напряженность магнитного поля. В противном случае все магнитные звезды оказались бы с максимальным полем в центре звезды, т.е. соответствовали бы модели центрального диполя. У звезд со смещенным из центра диполем максимальная напряженность поля не совпадает с максимальной плотностью вещества в звезде. Именно отсутствием зависимости величины поля от плотности, вероятнее всего, определяется возникновение несимметричных структур магнитных полей в период коллапса намагниченных протозвездных облаков. Поскольку структуры магнитных полей большого числа СР-звезд описываются не центральным диполем, то это значит, что они формируются из облаков, в которых содержатся мелкомасштабные флуктуации магнитных полей. В работе [31] утверждается также, что во время формирования звезды из намагниченного протозвездного облака магнитное поле препятствует плотным областям сливаться, благодаря чему в формирующейся звезде могут возникнуть магнитные неоднородности. Такие намагниченные фрагменты могут происходить, по-видимому, вследствие усиленной генерации магнитного поля быстрыми локальными движениями газа в турбулентной среде [32]. Звезды со структурой магнитного поля центрального диполя формируются из равномерно намагниченных протозвездных облаков, либо из облаков, в которых величина поля  $B$  пропорциональна  $n$ .

#### 4. Зависимость скорости вращения от магнитного поля.

В течение длительного времени разные исследователи пытались найти зависимость между скоростью вращения магнитных звезд и величиной магнитного поля, предполагая, что магнитные звезды потеряли момент вращения под его влиянием. В работах [33,34] авторы пришли к выводу, что нет признаков торможения магнитных звезд на Главной последовательности, если оно и произошло, то только на более ранних стадиях эволюции [35]. В работе [36] найдена антикорреляция между величиной магнитного поля и скоростью вращения. Зависимость среднеквадратических величин магнитного поля от периода вращения  $\langle Bs \rangle (\log P)$  изучена нами в 1985г. [37], при этом оказалось, что она имеет максимум на  $\log P \sim 1$ . Правая

часть зависимости показывает наличие антикорреляции, левая часть соответствует прямой корреляции, поэтому возникает максимум на  $\log P \sim 1$ . В дальнейшем [38] наличие максимума подтвердилось. Таким образом, ранние работы не привели к определенному выводу о природе рассматриваемой зависимости. Не было найдено определенно ни признаков работы динамо, ни признаков действия механизма торможения. Наиболее сильным возражением против "магнитного" торможения звезд является пример  $\gamma$  Equ, ( $P = 80$  лет), HD 94660 ( $P = 17$  лет) и других звезд с очень большими периодами вращения, но которые имеют поле средней величины. Следовательно, проблема усложняется. Небольшое увеличение периода вращения на величину  $\Delta \log P = 0.3$  происходит вследствие эволюционного увеличения радиуса.

В работе [1] и здесь данная проблема рассмотрена по другому. Мы исследуем теперь не статистическую зависимость  $B_s(\log P)$ , а характер распределения звезд в координатах  $B_s$  и  $\log P$ . Это распределение приведено на рис.3, построенное по данным работы [39], дополненным последними результатами моделирования [2]. Для уменьшения разброса точек величины  $B_s$  приведены к V классу светимости [30] путем учета эффекта изменения поля за счет эволюционного увеличения радиуса звезд при их движении поперек полосы Главной последовательности. На рис.3 хорошо видно, что с ростом периода вращения верхняя правая граница поля  $B_s$  увеличивается вплоть до  $\log P \sim 0.7$ , после чего ее рост прекращается и начинается его уменьшение, т.е. фактически подтверждается зависимость, найденная нами в работе [37]. Характер распределения звезд на рис.3 повторяет распределение

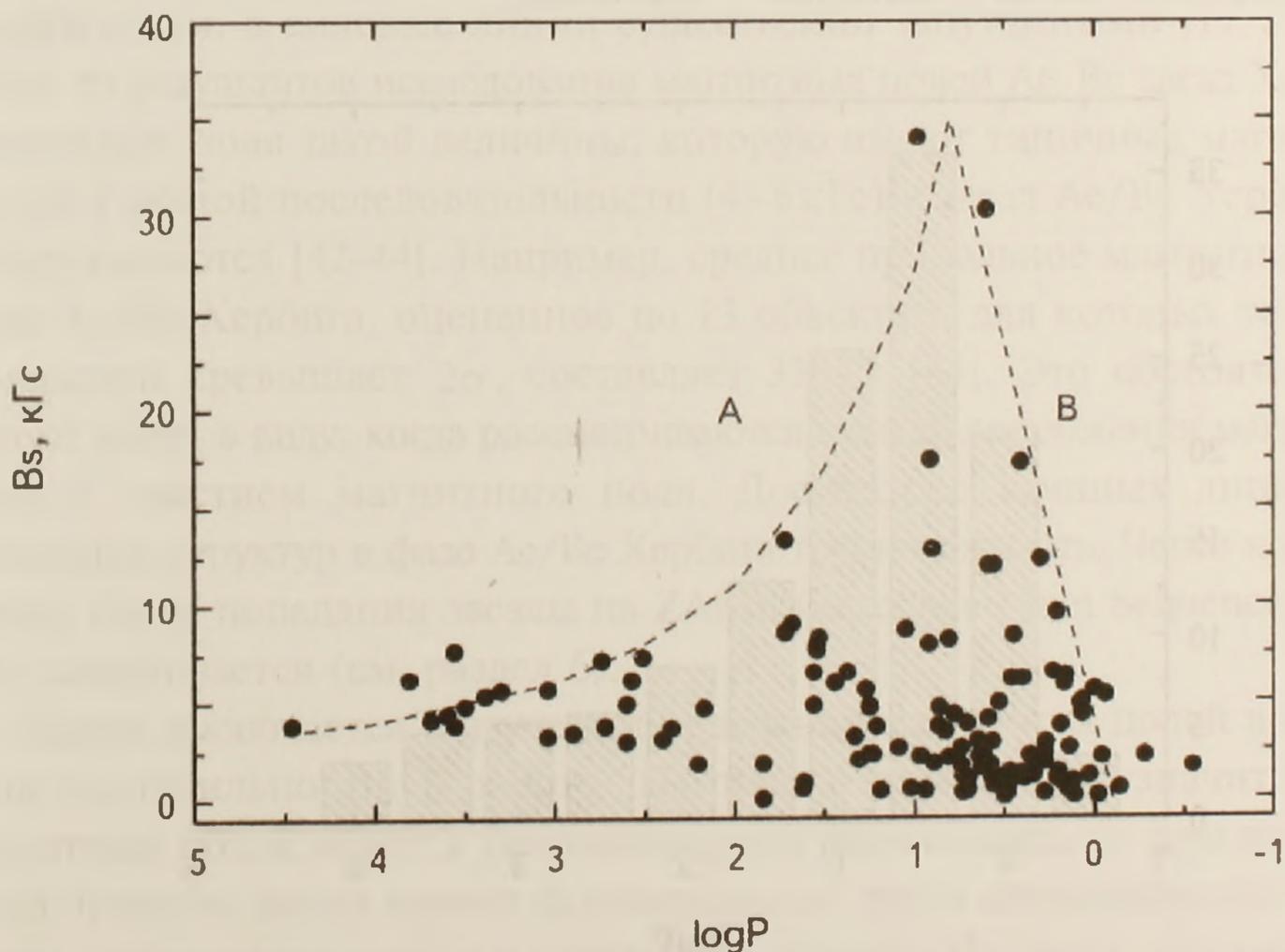


Рис.3. Распределение магнитных полей звезд по величинам  $\log P$ .

числа звезд  $N(v \sin i)$  для магнитных звезд (штриховая линия) на рис.4, построенное по данным работы [40]. Максимум  $B_s$  на  $\log P \sim 0.7$  на рис.3 соответствует максимуму  $v \sin i = 20$  км/с на рис.4. Оказалось также, что распределение звезд по  $\log P$ , приведенное на рис.5, имеет максимум на  $\log P = 0.5$ , фактически совпадающий с положением максимума поля на рис.3 и положением максимума распределения на рис.4. Учитывая эти

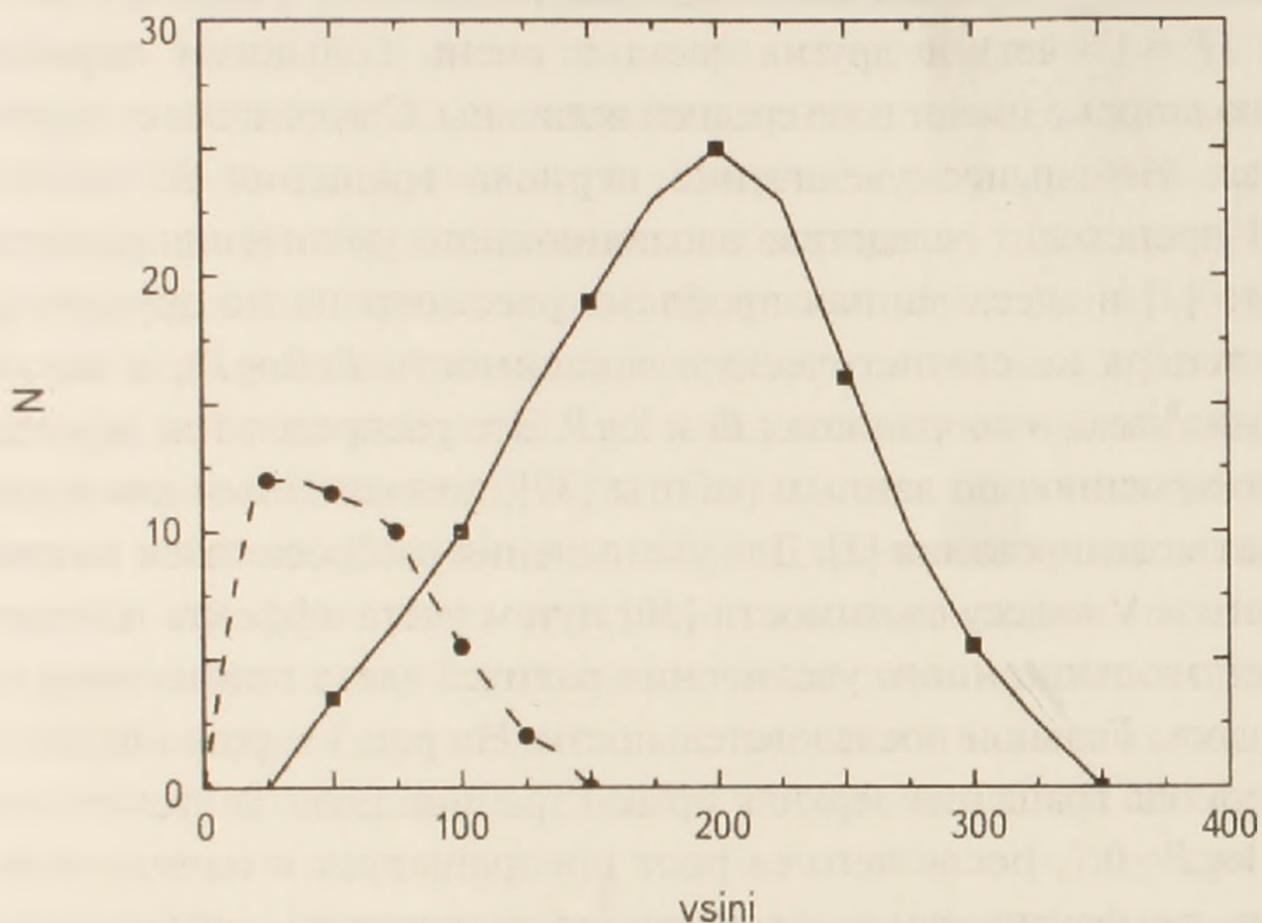


Рис.4. Распределение звезд по величинам  $v \sin i$ . Сплошная линия - нормальные звезды, штриховая линия - магнитные + Ам-звезды.

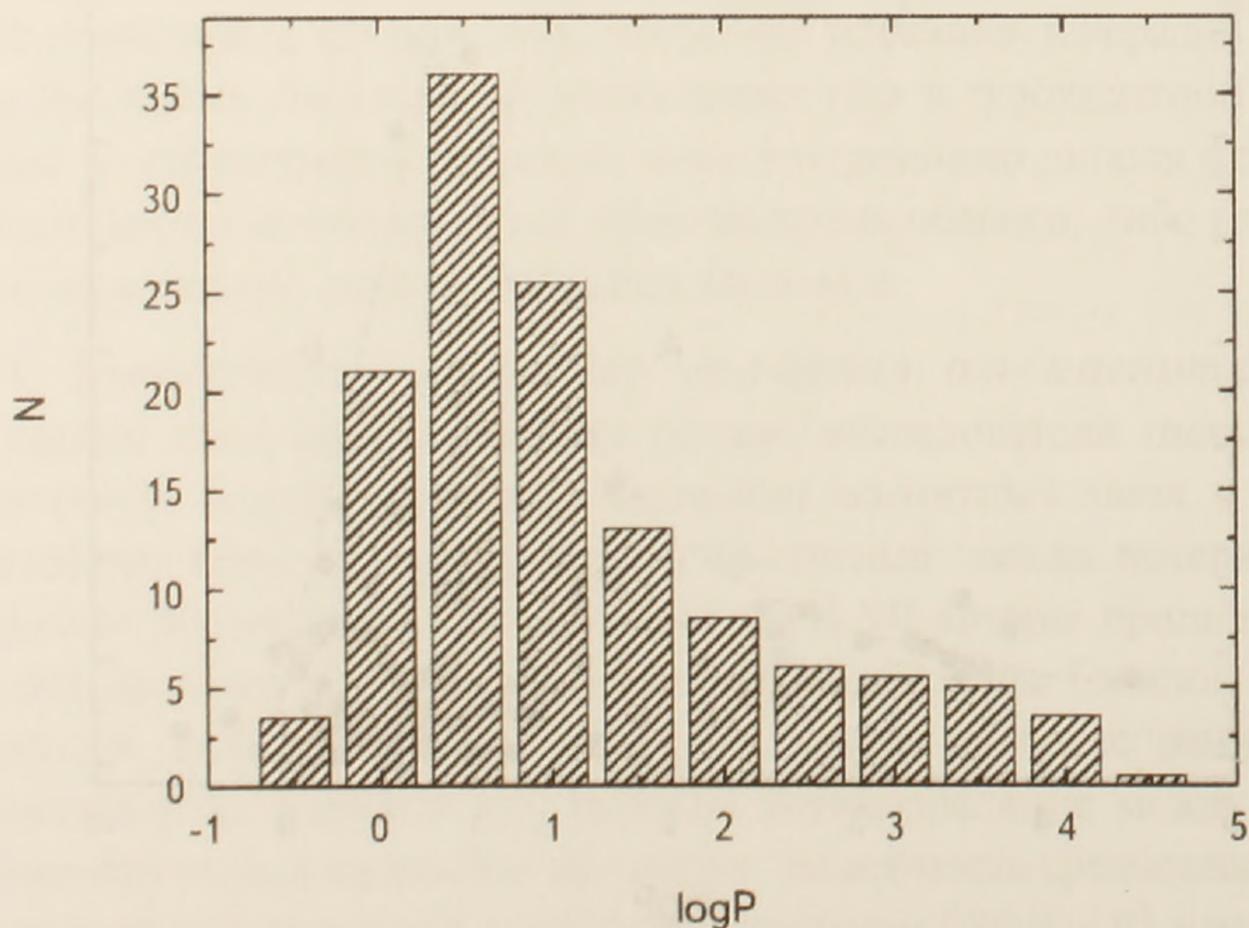


Рис.5. Распределение числа звезд по величинам  $\log P$ .

данные, приходим к выводу, что все рассмотренные распределения звезд отражают одно и то же свойство, а именно эффективность генерации магнитного поля в протозвездных облаках. Наиболее эффективно генерируется поле при таких скоростях движения облаков, которые затем соответствуют величинам  $\log P \approx 0.7$  у звезд. Эффективность отражается не только на величине магнитного поля, но и на относительном числе звезд с сильным магнитным полем на рис.5.

Магнитные протозвезды на стадии гравитационного коллапса потеряли момент вращения под действием магнитного поля (см. раздел 7 и [1]). Чем сильнее поле, тем сильнее торможение. По-видимому это свойство является причиной того, что на рис.3 и 4 максимум распределения магнитных звезд смещен в сторону малых величин  $v \sin i$ . Кроме того, магнитное поле вызывает торможение протозвездных облаков сильнее в тех случаях, когда силовые линии ближе к плоскости вращения. Благодаря такому избирательному торможению магнитные протозвезды становятся медленными ротаторами, а магнитные силовые линии оказываются преимущественно в плоскости экватора вращения.

5. *Нестабильная фаза трека Хаяши.* Наблюдаемые в настоящее время на Главной последовательности магнитные структуры пережили нестабильную фазу Хаяши, отличающуюся крайней нестационарностью, турбулентностью коллапсирующего вещества [41]. В этой фазе силовые линии магнитного поля претерпели сложные преобразования турбулентными процессами, после чего магнитное поле в значительной мере оказалось ослабленным, а силовые линии существенно запутанными [11,13]. Это видно из результатов исследования магнитных полей Ae/Be звезд Хербига. Магнитные поля такой величины, которую имеют типичные магнитные звезды Главной последовательности (4-6 кГс) у звезд Ae/Be Хербига не обнаруживаются [42-44]. Например, среднее продольное магнитное поле звезд Ae/Be Хербига, оцененное по 13 объектам, для которых точность измерений превышает  $2\sigma$ , составляет 330 Гс [45]. Это обстоятельство следует иметь в виду, когда рассматриваются модели торможения магнитных звезд с участием магнитного поля. Достаточно мощных дипольных магнитных структур в фазе Ae/Be Хербига трудно ожидать. Через короткое время, после попадания звезды на ZAMS (Zero Age Main Sequence), поле восстанавливается (см. раздел 6).

Задача заключается в изучении поведения магнитных полей в период фазы нестабильности. В работе [11] предполагается, что значительный магнитный поток может в нестационарной фазе выжить до того момента, когда лучистая звезда начнет формироваться, тогда возникшие потоковые жгуты начнут закрепляться в стабильной области. Но могут ли возникнуть наблюдаемые крупномасштабные магнитные структуры в течение неста-

бильной фазы и исказить наблюдаемые свойства? По-видимому - нет, потому что необходимо было бы предположить неизвестные крупномасштабные процессы по всему объему звезды, несимметричные относительно центра звезды и которые бы непонятным способом сориентировали бы магнитные силовые линии вдоль плоскости экватора вращения. Поэтому остается единственный возможный вариант - крупномасштабные, ориентированные дипольные конфигурации возникли до фазы неустойчивости. В неустойчивой фазе крупные структуры могли несколько деформироваться, но не критически. Распределение магнитных звезд по углам до сих пор имеет узкий максимум в диапазоне  $\alpha = 0 - 20^\circ$  (см. рис.6), который формируется в период гравитационного коллапса. Это говорит о том, что в нестационарной фазе Хаяши крупномасштабные дипольные структуры магнитных полей не претерпели значительных искажений.

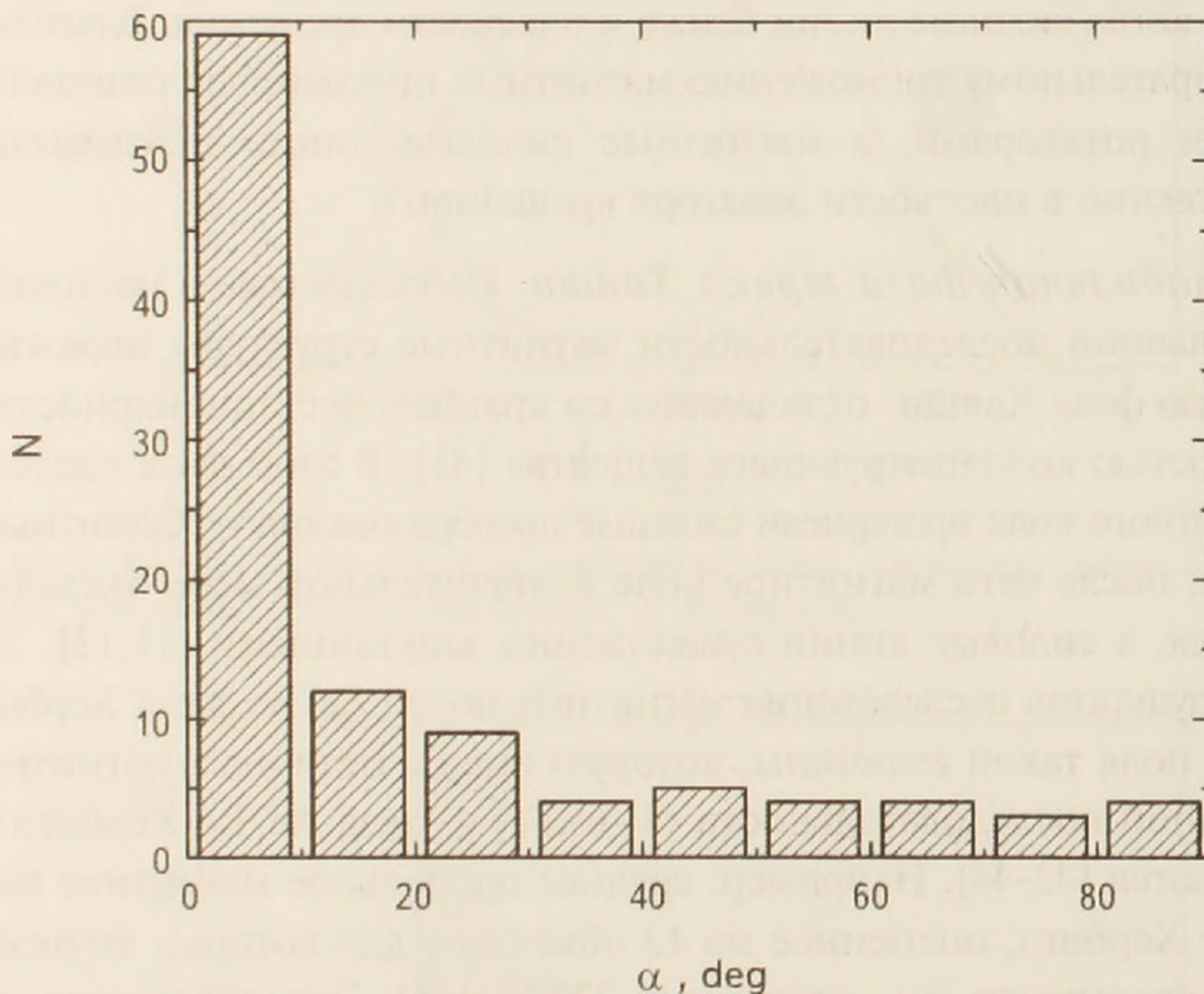


Рис.6. Распределение числа магнитных звезд с разными углами  $\alpha$ .

**6. Поведение магнитного поля после нестационарной фазы.** После завершения нестационарной фазы и возникновения лучистой звезды в ней начинается релаксация запутанного магнитного поля. Мелкие структуры неустойчивы, они распадаются вследствие омического затухания за время

$$t = 4\pi\sigma R^2, \quad (1)$$

где  $R$  - характерный размер неоднородности магнитного поля,  $\sigma$  - электропроводность [46]. Кроме того, поле упрощается вследствие натяжения

вдоль силовых линий (натяжение силовой трубки поперечного сечения  $A$  с силой

$$T = AB^2/4\pi, \quad (2)$$

[47], где  $B$  - напряженность поля). Мелкие неоднородности быстро исчезают и остаются крупномасштабные магнитные неоднородности, которые мы наблюдаем сейчас. Формулы (1) и (2) для магнитных звезд, на наш взгляд, носят фундаментальный характер. На их основании предполагается вывод, что любые структуры в магнитных звездах, кроме дипольных (точнее полоидальных), нестабильны. Характерные наблюдаемые размеры магнитных дипольных неоднородностей имеют порядок радиуса звезды, поэтому в отсутствие дополнительных разрушающих факторов (турбулентность, дифференциальное вращение, меридиональная циркуляция (см. далее)), наблюдаемые крупномасштабные магнитные структуры остаются практически неизменными в течение всей жизни звезды на Главной последовательности. Максимальное время жизни магнитных звезд  $t = 10^9$  лет [48] много меньше времени возможного сохранения поля ( $10^{10}$ - $10^{11}$  лет). Процесс быстрого затухания мелкомасштабного магнитного поля, можно назвать "избирательной релаксацией", он является фундаментальным свойством, определяющим эволюцию магнитных полей СР-звезд.

Тот факт, что Ар-звезды имеют крупномасштабное, долгоживущее дипольное поле, является одним из мощных аргументов в пользу реликтового характера магнитного поля. В течение длительного времени эволюции все не дипольные, связанные с токами компоненты в нем уже исчезли вследствие джоулевых потерь, осталось только сильное потенциальное поле, дипольное в первом приближении. Если поля дипольные, и вариаций плотности и температуры нет, а таких звезд действительно нет, то мы имеем дело со старыми объектами, в которых электрические токи практически исчезли.

Исследование этой фазы интересно для того, чтобы понять, какие изменения происходят в этот период и что остается после интересующей нас фазы гравитационного коллапса. После прекращения нестабильной фазы мелкомасштабные неоднородности затухают быстрее крупномасштабных вследствие омических потерь за время, определяемое формулой (1). Поэтому к моменту выхода на ZAMS остаются только относительно крупные неоднородности, которые имеют преобладающий магнитный вектор, фиксируемый нами как дипольное поле, и которые сохраняются дольше других.

Имея в виду большое возможное время жизни  $t \sim 10^{10}$  лет наблюдаемых крупных сложных магнитных структур, можно предположить, что они могли сохраниться со времени начальных фаз эволюции. Такие структуры наблюдаются даже у самых старых известных звезд с возрастом  $t \sim 10^9$  лет [2,48]. Возможно, в процессе поздних стадий эволюции сложные структуры иногда могут искажаться неравномерной дисковой аккрецией достаточно крупных масс. Но

вряд ли она определяет целиком наблюдаемые структуры. Вследствие избирательной релаксации крупномасштабное дипольное поле у молодых звезд Ae/Be Хербига появляется только к моменту выхода их на ZAMS. Оно остается относительно слабым на фоне преимущественно сложных, запутанных структур, образовавшихся в нестационарной фазе трека Хаяши, но оно растет по мере исчезновения мелких структур. Это хорошо видно из рис.7 [49].

Вследствие медленной релаксации запутанных магнитных полей, происходящей практически в течение всей жизни магнитной звезды на Главной последовательности, как это видно из рис.7, магнитное поле имеет двухкомпонентную структуру, состоящую из глобальных дипольных структур плюс мелкомасштабные фракции  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \Sigma \mathbf{v}_i$ . Соотношение этих двух составляющих постепенно изменяется в сторону увеличения  $\mathbf{B}_0$  [29]. На рисунке даны две кривые. Величины  $B_s$  исправлены за влияние сильного уменьшения поля со временем вследствие эволюционного роста радиуса звезд. Кружками обозначен вариант кубического уменьшения поля, треугольниками - вариант квадратического уменьшения поля. Точная величина степени пока неизвестна, но она находится между двумя и тремя. Полный магнитный поток в течение жизни звезды на Главной последовательности остается практически постоянным в течение  $10^9$  лет [48], что много меньше теоретического времени жизни магнитного поля у звезд с  $M > 2 M_\odot$  равного  $t = 10^{10} - 10^{11}$  лет. Реликтовая крупномасштабная составляющая, по-видимому,

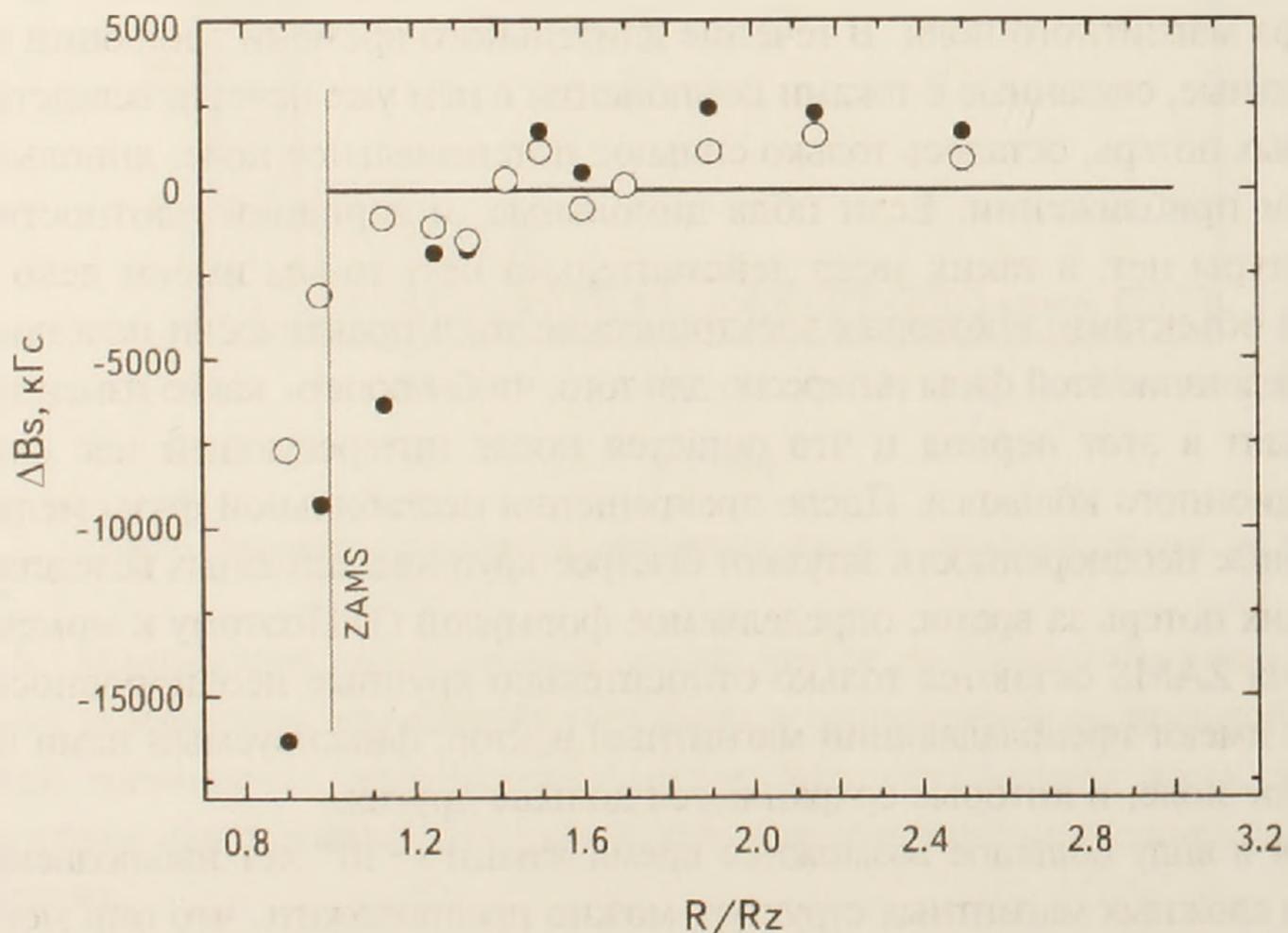


Рис.7. Рост поверхностного магнитного поля по мере эволюционного движения звезд поперек полосы Главной последовательности. Зависимости исправлены за счет эволюционного изменения радиуса. Черные кружки - учет кубического изменения, белые кружки - учет квадратического изменения.

мало искажается последующими стадиями эволюции. Как уже говорилось раньше, по четкому максимуму зависимости на рис.6 не заметно, чтобы она была сильно искажена в последующих фазах эволюции. Это говорит о том, что в нестационарной фазе трека Хаяши и в фазе звезд Ae/Be Хербига крупные структуры вряд ли заметно искажались. После нестационарной фазы во *внутреннем объеме* стабильных лучистых молодых Ae/Be-звезд дипольное магнитное поле формируется в результате избирательной релаксации, по-видимому, без препятствий. Это видно на примерах моделей Ae/Be-звезд HD 200775, V380 Ori и HD 101412 [49,50], которые подходят к ZAMS, имея поле с хорошо выраженной дипольной структурой.

7. *Потеря момента вращения и ориентация магнитных структур.* Мы предполагаем, что одно из самых примечательных свойств - потеря момента вращения магнитных протозвезд и преимущественная ориентация магнитных силовых линий тоже произошли в фазах гравитационного коллапса до нестационарной фазы (см. раздел 4). Поиски причин медленного вращения магнитных звезд проводились активно в течение длительного времени. В литературе рассматривались многие механизмы потери момента вращения звезд с участием магнитного поля. Флэком [51] была разработана теория гидромагнитного механизма, Местел [52], а также Стриттматер и Норрис [53], предложили механизм потери массы в присутствии магнитного поля, приводящий к потере момента вращения. Хавнес и Конти [54], а также Местел [55], показали возможность торможения действием аккреции в присутствии сильного магнитного поля и т.д. Эти механизмы относятся к звездам в период эволюции между фазой Хаяши и Главной последовательностью. Хорошо известны также работы, в которых анализируется возможность торможения звезд путем взаимодействия сильного дипольного поля и звездного ветра с окружающим межзвездным газом. Наши и другие ранние исследования потери момента вращения магнитных звезд с участием их предполагаемых магнитосфер не привели к положительным результатам [56]. Клочкова и Копылов [57] нашли, что  $v \sin i$  у магнитных звезд не меняется с возрастом, и что торможение, вероятно, происходит до Главной последовательности. Хартуг [58] тоже не нашел корреляции  $v \sin i$  с возрастом. В работе [1] показано, что связь величины магнитного поля и скорости вращения более сложная (см. раздел 4). Главная проблема состоит в том, что все предложенные механизмы *требуют наличия сильного дипольного магнитного поля*. Но магнитосферы начинают появляться только на ZAMS. Мало того, преимущественная ориентация магнитных полей вдоль плоскости экватора вращения не может быть объяснена перечисленными и другими подобными механизмами, а разнообразие магнитных структур и величин магнитного поля вносит серьезные трудности для предложенных механизмов торможения. Например, вычисления в работе

[59] показали, что для эффективного торможения с участием магнитосферы звезды необходимо выполнить следующие условия: 1) поверхностное поле звезды должно быть достаточно сильным  $B_s \sim 5 \text{ кГс}$ , 2) массы звезд должны быть  $M < 3M_\odot$ , потому что только звезды с малыми массами имеют достаточно время для того, чтобы успеть потерять угловой момент и 3) наиболее медленные ротаторы с  $P > 25$  дней должны иметь углы  $\beta < 20^\circ$  между осью диполя и осью вращения и  $\beta > 60^\circ$  для быстрых ротаторов.

В наших предварительных исследованиях на достаточно большом количестве данных [1] показано, что в первом случае  $\alpha = 20^\circ \pm 5^\circ$ , а во втором  $\alpha = 36^\circ \pm 8^\circ$ , т.е. различие незначимо. Как видно из рис.7 в работе [1], магнитные звезды логичнее делить на быстрые и медленные ротаторы с границей не на  $P = 25^d$ , а на  $P$  около 5 - 10<sup>d</sup>, где находится максимум распределения. Но и в таком случае для быстрых ротаторов  $\alpha = 48^\circ \pm 2^\circ$ , для медленных  $\alpha = 64^\circ \pm 3^\circ$ , т.е. различие незначимо. Кроме этого, надо помнить, что после нестационарной фазы невозможна организация достаточно мощной магнитосферы [2]. Таким образом, ни одно из приведенных требований не выполняется и гипотеза магнитного торможения звезд в промежутке между нестационарной фазой и Главной последовательностью отпадает.

Следует учесть, что после неустойчивой фазы, когда формируется молодая звезда с лучистым переносом, концентрация частиц оказывается  $> 10^4$  и магнитное торможение становится менее эффективным [31,60], чем в протозвездных облаках. Поэтому наиболее вероятный период потери момента вращения и разделения звезд на магнитные и нормальные - это период гравитационного коллапса. Кроме того надо учесть, что после нестационарной фазы, вследствие "запуганных" магнитных силовых линий, особенно в верхних слоях, общий вектор магнитного поля  $\mathbf{B} \sim 0$  [2], звезда окружена падающей на нее крайне нестационарной аккреционной оболочкой, в которой запутанная система силовых линий тоже не способна создать достаточно мощную магнитосферу, которая в дальнейшем могла бы участвовать в различных магнитогидродинамических процессах, в том числе затормозить вращение звезды. Магнитосферы начинают появляться только перед выходом звезды на Главную последовательность [2]. Поэтому в работе [60] высказывалось предположение, что причину медленного вращения магнитных звезд надо искать в начальных фазах эволюции. Учитывая сказанное, в том числе в разделе 4, можно сделать предположение, что наиболее вероятный механизм потери момента вращения и ориентации магнитных диполей в магнитных звездах заключается в следующем.

Механизм магнитного торможения протозвездного облака рассмотрен в работе [61]. Оказывается, что магнитное торможение облака путем переноса углового момента во внешнюю среду сильнее в том случае, если угловой момент ( $\mathbf{j}$ ) облака и магнитное поле ( $\mathbf{B}$ ) перпендикулярны. В такой ситуации

угловой момент протозвездного облака может измениться на несколько порядков величины за время  $10^6$  лет. Эффективность магнитного торможения в случае ( $\mathbf{j} \parallel \mathbf{B}$ ) много меньше, чем в случае ( $\mathbf{j} \perp \mathbf{B}$ ). В среднем эффективность торможения их различается в 10 раз. Таким образом, это как раз тот механизм, который делает магнитные протозвезды медленными ротаторами. Этот же механизм приводит к тому, что наиболее замедленными оказываются те протозвездные облака, у которых магнитные силовые линии находятся в плоскости вращения, т.е.  $\alpha = 0^\circ$ . Таких объектов оказывается всего 10%, поэтому относительное количество магнитных звезд так мало. В таком случае потеря углового момента и преимущественная ориентация магнитных полей магнитных звезд создаются *единым механизмом*. По-видимому, потеря момента вращения магнитных звезд приводит также к известному дефициту тесных двойных среди них.

*Процесс* торможения протозвездных облаков приводит к тому, что происходит отделение 10% доли магнитных звезд от остальных вследствие того, что 1) звезд с магнитным полем, параллельным плоскости экватора вращения мало, 2) доля сильно намагниченных протозвездных облаков тоже невелика, 3) магнитные звезды ограничиваются также величиной  $v \sin i = 150$  км/с (рис.4), которая, по-видимому, определяется возникновением дифференциального вращения при  $v \sin i > 150$  км/с, закручивающего магнитные силовые линии в тороидальную форму у будущих нормальных звезд. В работе [62] показано, что немагнитные CP-звезды типа Am, HgMn и др. тоже ограничены этой величиной  $v \sin i$ . Заметим, что зависимости  $N(v \sin i)$  на рис.4 для магнитных и немагнитных звезд практически одинаковы, т.е. магнитное поле не участвует в разделении звезд. Следовательно медленное вращение звезд, меньше критической величины  $v_c$ , является единственным фактором отделения магнитных и немагнитных CP-звезд от общей массы "нормальных" звезд. При медленном вращении звезды дифференциальное вращение не возникает, в результате в стабильной атмосфере происходят условия для сохранения магнитного поля. Различие между магнитными и химически пекулярными звездами без поля, по-видимому, состоит только в том, что при полной стабильности атмосферы в первом случае диффузия химических элементов происходит вследствие лучевого давления, гравитации и ветра в магнитном поле, а во втором то же, но без участия поля.

В ранних работах, когда структуры магнитных полей звезд рассматривались с точки зрения модели центрального диполя, высказывалось мнение, что наклон осей диполей возникал вследствие меридиональной циркуляции [27,62]. Однако, из приведенных выше данных очевидно (см. работу [2] и разделы 4 и 7), что у всех звезд, и молодых и старых, диполи находятся преимущественно в плоскости экватора вращения. Это еще раз доказывает, что

гипотеза меридиональной циркуляции в случае магнитных звезд не состоятельна, основную роль играет механизм избирательного торможения магнитным полем протозвездных облаков [1]. Звезды теряют угловой момент сильнее тогда, когда силовые линии параллельны плоскости вращения. Очевидно, что протозвезды без магнитного поля (Am, HgMn и др.) не могли затормозиться, поэтому можно предположить, что они происходят из конца распределения общей массы звезд (рис.4). Образование немагнитных CP-звезд свидетельствует о том, что *не все облака намагничены*.

8. *О зависимости свойств магнитных звезд от величины поля.* Многие авторы искали связь получаемых из наблюдений параметров магнитных звезд от величины магнитного поля. Обычно это плохо получалось вследствие большого разброса точек. Из приведенных выше данных видно, что наблюдается сложное взаимодействие магнитного поля с процессами, происходившими на всех стадиях эволюции звезд, вплоть до Главной последовательности, на которой звезды полностью стабилизируются. Благодаря стабилизации звездного вещества путем подавления магнитным полем любых движений вещества, возникают условия для управляемой магнитным полем диффузии химических элементов или неуправляемой в случае немагнитных Am, HgMn-звезд. Протозвездные родительские облака, неравномерно намагниченные, с неравномерной плотностью и сложной структурой, могут создать намагниченные звезды тоже с большим диапазоном величин магнитного поля, скоростей вращения и структур магнитных полей. Величина поля влияет на степень торможения протозвезд, но на нее влияет также начальная скорость облака, его плотность, структура облака, размеры, степень ионизации и др. Величина поля влияет также на критическое значение  $v_c$ , в результате чего граница возникновения дифференциального вращения размывается. Несомненно, в нестационарной фазе, а также вследствие разных темпов аккреции и других нестационарных эффектов, изучаемые зависимости от магнитного поля тоже нарушаются. Очевидно, что искать зависимости следует в комплексе, учитывая все перечисленные эффекты. Игнорирование этого требования, например, при длительных поисках зависимости степени химических аномалий от величины магнитного поля не приводили к четким зависимостям.

9. *Заключение.* В данной работе мы попытались рассмотреть условия возникновения основных свойств магнитных звезд в период гравитационного коллапса протозвездных облаков до наступления нестационарной фазы трека Хаяши. Основные свойства магнитных звезд, которые требуют объяснения, следующие: 1) магнитные звезды обладают глобальными дипольными магнитными полями с преимущественной ориентацией магнитных силовых линий вдоль плоскости экватора вращения, 2)

магнитные звезды медленно вращаются, 3) значительная часть звезд имеет сложные структуры магнитного поля, 4) звезды разделены на магнитные и нормальные в пропорции 1:10.

1) Анализ результатов моделирования магнитных структур CP-звезд показывает, что они скорее всего формируются из неравномерно намагниченных протозвездных облаков. Величина магнитного поля в облаках местами часто не пропорциональна плотности. Поэтому возникают звезды, у которых после сжатия максимальная напряженность магнитного поля не совпадает с максимальной плотностью. Возникают структуры магнитного поля типа "смещенного диполя", или даже многодипольные, в зависимости от количества намагниченных фрагментов в протозвездном облаке.

2) Если протозвездное облако достаточно однородно по величине магнитного поля, или если величина поля пропорциональна плотности облака, то при коллапсе магнитное поле усиливается в центре протозвезды, где максимальная плотность. Возникают магнитные звезды со структурой поля, соответствующей модели центрального диполя.

3) Нет оснований предполагать, что крупномасштабные структуры поля могли сформироваться в период нестабильной фазы трека Хаяши или в период формирования лучистой молодой звезды до ZAMS. Для этого пришлось бы предположить слишком мощные, глобальные пертурбации внутри звезд, которые еще должны были бы каким-то образом сориентировать магнитные силовые линии вдоль экватора вращения.

4) Поскольку время жизни наблюдаемых крупных магнитных структур магнитного поля  $t \sim 10^9 - 10^{10}$  лет, то скорее всего они сформировались еще в начальных фазах эволюции до нестационарной фазы. Такие структуры наблюдаются даже у самых старых известных магнитных звезд возрастом  $t \sim 10^9$  лет. Факт долговременной стабильности структур магнитных полей противоречит предположению о действии внутри магнитных звезд меридиональной циркуляции, дифференциального вращения и других нестабильных явлений, которые некоторые авторы предполагают. Очевидно, что магнитные звезды вращаются твердо, как это давно предполагается.

5) Четкий максимум зависимости на рис.4, в пределах  $\alpha = 0^\circ - 20^\circ$ , является признаком того, что зависимость, возникшая в период времени "до нестационарной фазы", не была сильно искажена в последующих фазах эволюции. Это говорит о том, что в нестационарной фазе Хаяши и в фазе звезд Ae/Be Хербига крупномасштабные структуры магнитного поля вряд ли искажались сильно. Этот важный результат свидетельствует о том, что магнитные звезды в этих фазах не испытывали драматических пертурбаций.

6) Выше было показано, что вероятнее всего в период гравитационного коллапса произошла эффективная потеря момента вращения протозвездного облака под действием магнитного поля, но только у тех протозвездных

облаков, у которых силовые линии магнитного поля были ориентированы преимущественно вдоль экватора вращения облака. Таких объектов оказывается всего около 10%. Это обстоятельство объясняет преимущественную ориентацию силовых линий магнитного поля вдоль экватора вращения и малую пропорцию магнитных звезд.

7) После потери момента вращения намагниченного протозвездного облака вероятно происходит разделение звезд на магнитные и нормальные. В тех случаях, когда скорость вращения превышает критическую величину  $v_c$ , в протозвездном облаке возникает дифференциальное вращение, которое закручивает магнитное поле в "невидимую" тороидальную форму и приводит таким образом звезды к состоянию "нормальных" немагнитных звезд. Отсутствие дифференциального вращения необходимо также для создания стабильных условий для диффузии химических элементов.

8) В результате рассмотренных выше данных можно сделать вывод, что сильнейшими признаками реликтовой природы магнитных полей рассматриваемого типа звезд являются: а) преимущественная ориентация магнитных диполей, б) медленное вращение звезд, с) сложные внутренние и поверхностные структуры магнитного поля у части звезд, д) разделение звезд на магнитные и нормальные, е) 10% доля магнитных.

9) Нестационарные фазы и период эволюции Ae/Be Хербига, вероятно нестабильны не столь драматически, чтобы заметно искажать магнитные структуры, поэтому основные свойства, приобретенные в стадии гравитационного сжатия, сохраняются у магнитных звезд до Главной последовательности.

10) Из показанных выше результатов очевидно, что для формирования магнитных CP-звезд необходимо выполнение условия медленного вращения, меньше  $v_c$ . Если магнитное поле отсутствует, медленное вращение должно быть у звезды изначально, т.е. она должна происходить из конца распределения скоростей вращения. К таким звездам, очевидно, относятся химически пекулярные звезды без поля.

11) Из рассмотрения перечисленных выше свойств магнитных звезд можно прийти к выводу, что магнитное поле непосредственно влияет только на степень торможения протозвездного облака, подавляет турбуленцию в атмосфере звезды, влияет слегка на степень химических аномалий.

12) Перечисленные выше свойства вместе показывают, что наиболее важный период формирования магнитной звезды и ее крупномасштабной магнитной структуры это период гравитационного коллапса "до нестационарной фазы Хаяши".

13) Формулы (1) и (2) для магнитных звезд имеют фундаментальное значение. На их основании предполагается вывод, что любые структуры, кроме дипольных (точнее полоидальных), нестабильны. На этом предпо-

ложении основана настоящая работа. На наш взгляд, полученные в этой работе результаты носят самосогласованный характер, все основные свойства сформировались в период "до нестационарной фазы трека Хаяши".

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

## THE MAGNETIC PROTOSTARS

Yu.V.GLAGOLEVSKIJ

The possible option of evolution of magnetic protostars at a stage "before Hayasha's phase" is discussed. Arguments in favor of the assumption that the main properties of magnetic stars are given: 1) magnetic stars possess a global dipolar magnetic fields with the primary orientation of magnetic power lines along the plane of the equator of rotation, 2) slow rotation, 3) complex, two and three dipolar structures of a magnetic field of considerable part of stars, 4) division of stars on magnetic and normal in a proportion 1:10 are formed in the period of gravitational collapse of protostar clouds "before Hayasha's phase".

Key words: *magnetic protostars: slow rotation*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.В.Глаголевский, *Астрофизика*, **57**, 337, 2014, (*Astrophysics*, **57**, 315, 2014).
2. Yu.V.Glagolevskij, *Astrophys. Bull.*, 2015 (in press).
3. Ю.В.Глаголевский, *Астрофизика*, **58**, 37, 2015, (*Astrophysics*, **58**, 29, 2015).
4. А.Е.Дудоров, *Итоги науки и техники, сер. Астрономия*, **39**, 77, 1990.
5. L.Mestel, *Magnetic and Related stars* (Baltimore, Mono Book Co., 1967), 101, 1967.
6. T.G.Cowling, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **105**, 166, 1945.
7. L.Spitzer, *Diffuse Matter in Space*, New York. Intersc. Publ. J.Wiley and Sons. 1968.
8. A.E.Dudorov, *Modern problems of stellar evolution*, Moskow, 1998, p.28.
9. L.Mestel, D.Moss, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **178**, 27, 1977.
10. D.Moss, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **236**, 629, 1989.
11. D.Moss, *IAU Symp.*, **224**, 245, 2004.

12. *D.Moss*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **226**, 297, 1987.
13. *D.Moss*, ASP Conf., **248**, 305, 2001.
14. *J.Braithwaite, A.Nordlung*, Astron. Astrophys., **450**, 1077, 2006.
15. *E.Gerth, Yu.V.Glagolevskij, G.Scholz*, Stellar magnetic fields, Moskow, 1997, p.67.
16. *E.Gerth, Yu.V.Glagolevskij*, Magnetic fields of chemically peculiar and related stars, Moskow, 2000, p.151.
17. *E.Gerth, Yu.V.Glagolevskij*, Physics of magnetic stars, Nizhnij Arkhyz, 2007, p.148.
18. *E.Gerth, Yu.V.Glagolevskij*, Bull. SAO, **56**, 25, 2003.
19. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **66**, 158, 2011.
20. *G.W.Preston*, Astrophys. J., **150**, 547, 1967.
21. *G.W.Preston*, The Magnetic and Relating stars, Baltimore Mono Book Corp. 1967, p.3.
22. *J.D.Landstreet*, Astrophys. J., **159**, 1001, 1970.
23. *E.Flowers, M.A.Ruderman*, Astrophys. J., **215**, 302, 1977.
24. *Ю.В.Глаголевский, И.И.Романюк, И.Д.Найденов, В.Г.Штоль*, Изв. САО, **27**, 34, 1989.
25. *Yu.V.Glagolevskij*, Magnetic stars, Leningrad, Nauka, 1988, p.206
26. *D.Moss*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **168**, 61, 1974.
27. *D.W.N.Stibbs*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **110**, 395, 1950.
28. *G.Preston*, Publ. Astron. Soc. Pacif., **83**, 571, 1971.
29. *Ю.В.Глаголевский*, Астрофизика, **56**, 441, 2013, (Astrophysics, **56**, 407, 2013).
30. *А.Е.Дудоров, А.В.Тутуков*, Астрон. ж., **67**, 342, 1990.
31. *D.J.Price, M.R.Bate, C.L.Dobbis*, Rev. Mex. Astron. Astrophys., **36**, 128, 2009.
32. *R.B.Larson*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **194**, 809, 1981.
33. *P.North*, Astron. Astrophys., **141**, 328, 1984.
34. *E.F.Borra et al.*, Astron. Astrophys., **149**, 266, 1985.
35. *E.F.Borra, J.D.Landstreet*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **42**, 421, 1980.
36. *P.Didelon*, Astron. Astrophys., **55**, 69, 1984.
37. *Ю.В.Глаголевский*, Астрофизика, **22**, 545, 1985, (Astrophysics, **22**, 323, 1985).
38. *Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth*, Magnetic stars, Nizhij Arkhyz, 2011, p.153.
39. *Ю.В.Глаголевский*, Астрофизика, **56**, 189, 2013, (Astrophysics, **56**, 173, 2013).
40. *H.Abt, N.I.Morrell*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **99**, 135, 1995.
41. *N.S.Schulz*, From dust to stars, Chichester, 2004 (Chapter 5-7).
42. *V.Glagolevskij, G.A.Chountonov*, Bull. SAO, **51**, 88, 2001.
43. *Yu.V.Glagolevskij, G.A.Chountonov*, Bull. SAO, **45**, 105, 1998.
44. *Yu.V.Glagolevskij, G.A.Chountonov*, Stellar magnetic fields, Moskow, 1998, p.116.
45. *E.Alecian et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **400**, 354, 2009.
46. *T.Cowling*, The Sun, ed. G.P.Kuiper, Univ. of Chikago Press, Chikago (1953), Chapter 8.
47. *E.N.Parker*, Cosmical magnetic fields, Clarendon Press, Oxford 1979.
48. *Ю.В.Глаголевский*, Астрофизика, **57**, 217, 2014, (Astrophysics, **57**, 204, 2014).

49. Ю.В.Глаголевский, *Астрофизика*, **55**, 189, 2012, (*Astrophysics*, **55**, 169, 2012).
50. Yu.V.Glagolevskij, *Astrophys. Bull.*, **69**, 305, 2014.
51. R.C.Jr.Fleck, *Astrophys. J.*, **240**, 218, 1980.
52. L.Mestel, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **8**, 79, 1975.
53. P.A.Strittmatter, J.Norris, *Astron. Astrophys.*, **15**, 239, 1971.
54. O.Havnes, P.S.Conti, *Astron. Astrophys.*, **14**, 1, 1971.
55. L.Mestel, *Stellar evolution*, Cambridge MIT Press, 1972, p.643.
56. Ю.В.Глаголевский, *Астрофизика*, **48**, 229, 2005, (*Astrophysics*, **48**, 194, 2005).
57. В.Г.Клочкова, И.М.Копылов, *Астрон. ж.*, **65**, 947, 1985.
58. M.R.Hartug, *Astrophys. J.*, **212**, 723, 1977.
59. K.Stepien, *Astron. Astrophys.*, **353**, 227, 2000.
60. А.Е.Дудоров, А.В.Тутуков, *Астрон. ж.*, **67**, 342, 1990.
61. T.C.Mouschovias, E.V.Paleologou, *Astrophys. J.*, **230**, 204, 1979.
62. D.Moss, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **209**, 607, 1984.

