

Санкт-Петербургский государственный университет  
Кафедра астрофизики

# Механизмы формирования магнитных полей звёзд

Екатерина Макаренко  
591 группа

Декабрь 2018

## 1. Введение

Магнитные поля играют одну из ключевых ролей в эволюции звёзд. В момент рождения звёзд, магнитные поля способствуют фрагментации в коллапсирующих молекулярных облаках, на стадии главной последовательности участвуют в формировании звёздного ветра (МГД волны). На протяжении всей жизни звезды, на её поверхности и внутри существуют магнитные поля. Подобно гравитации, магнитное поле влияет на структуру звезды, однако, если гравитация в основном зависит от массы звезды, то на магнитные поля влияют разные параметры: масса, скорость вращения звезды, стратификация химических элементов на разных глубинах, считая от поверхности звезды, история объекта и др. Благодаря этому, построение теории формирования магнитных полей и их эволюции является очень трудоёмкой задачей. И всё же, сейчас мы имеем уже достаточно всеобъемлющую теорию звёздного магнетизма. Например, мы можем утверждать, что во многих случаях, магнитные поля звёзд создаются действием динамо механизма, который преобразует кинетическую энергию звезды в магнитную. Другие магнитные поля, вероятно, унаследованы от магнитных полей на более ранних стадиях эволюции звезды. Сегодня, у нас есть много подсказок для построения теории формирования магнитных полей, в связи с появлением наблюдательных данных (обзоры BOV, MiMes и др.), развитием численного моделирования и всё более и более тщательным изучением магнитного поля самой хорошо знакомой для нас звезды - Солнца. Этот обзор посвящён вопросу образования магнитных полей в звёздах. В пункте 2 мы кратко опишем историю изучения магнетизма. Далее представим основные теории о формировании магнитных полей и обсудим вопрос их устойчивости. В пункте 4 рассмотрим какие теории магнетизма применимы к звёздам разных масс. Как итог, в пункте 5 изложим некоторые основные результаты, открытые вопросы современных теорий и анализ будущих перспектив.

## 2. История открытия магнитных полей

Методы измерения магнитных полей, как космических, так и наземных, основаны на эффекте Зеемана. Так называется явление расщепления спектральных линий под действием внешнего магнитного поля, открытое нидерландским физиком Питером Зееманом в 1896 г. при лабораторных исследованиях свечения паров натрия. При этом картина

расщепления существенным образом зависит от направления магнитного поля относительно луча зрения — таким образом, различают поперечный и продольный эффект Зеемана. При поперечном эффекте, когда наблюдаемое поле перпендикулярно лучу зрения, все наблюдаемые компоненты спектральной линии поляризованы линейно, часть — параллельно полю, часть — перпендикулярно; при наблюдении вдоль поля остаются детектируемыми только две частоты, имеющие круговую поляризацию, правую и левую. Таким образом, величина и направление магнитного поля звезды могут быть определены путём изучения линий, подверженных эффекту Зеемана.

Звёздное магнитное поле впервые было обнаружено Дж. Хейлом в 1908 году (который построил первый спектрогелиограф) на Солнце по зеемановскому расщеплению фраунгоферовых линий в спектрах пятен. После этого начались систематические наблюдения магнитного поля Солнца и поиск его у других объектов (звёзд, туманностей и др.). До этого открытия, единственным подтверждённым магнитным полем в космосе оставалось магнитное поле Земли. Благодаря исследованиям Бэбкока (1958 г.), удалось открыть, что другие звёзды тоже имеют магнитные поля, которые могут достигать нескольких килогаусс, что значительно больше, чем магнитное поле Солнца. Он опубликовал первый каталог магнитных звёзд и открыл звезду с самым сильным магнитным полем на ГП - HD 215441 ( $3.4 \cdot 10^{14}$  Гс, известную, как звезда Бэбкока) (см. подробнее в [3]).

В 1949 году астрономы Уильям Хилтнер и Джон Холл обнаружили слабую поляризацию звездного света в нашей Галактике. Они попытались объяснить ее действием магнитного поля на частицы космической пыли и оказались правы. Звездный свет с различной поляризацией по-разному рассеивается на пылинках, которые вращаются вокруг магнитных силовых линий. Это позволяет нам узнать, как выглядят магнитные поля далеких галактик.

После обнаружения сильных полей в звездах главной последовательности Блэккет (1947) предположил, что если магнитный поток сохраняется, некоторые белые карлики должны проявлять магнитные поля до  $10^7 - 10^8$  Гс. Однако спектроскопические исследования, направленные на обнаружение магнитных полей в белых карликах дали отрицательные результаты (Престон, 1970). Кемп (1970) утверждал, что электроны в магнитном поле будут излучать линейно и по кругу поляризованное

излучение, которое должно быть обнаружено в континууме сильномагнитных белых карликов. Спектрополяриметрический обзор белых карликов привел к открытию сильной круговой поляризации в континууме белого карлика *Grw + 708247* (Kemp et al. 1970). В 1931 году Ландау предположил возможность существования плотных звёзд, которые выглядят как одно гигантское ядро - это можно рассматривать как первое предсказание существования нейтронных звёзд, сделанное до открытия нейтрона (см. подробнее в [8]). Бааде и Цвикки (1934) предположили, что сверхновая может быть результатом быстрого перехода нормальной звезды в нейтронную звезду. Бааде (1942) и Минковский (1942) обнаружили необычное излучение, возникающее в центральной части части Крабовидной туманности. Позднее были открыты радиопульсации в этой туманности (1968). Такое радиоизлучение было предсказано Шкловским (1953) как вызванные релятивистскими электронами, двигающихся по спирали вокруг силовых линий магнитного поля.

### 3. Механизмы формирования магнитных полей

Существуют две основные теории формирования магнитных полей в звёздах:

- теория магнитного динамо
- теория реликтового магнитного поля (см. подробнее в [4]).

Согласно первой, в конвективном ядре звезды работает динамо-механизм, который усиливает начальное магнитное поле. Это магнитное поле затем "всплывает" к поверхности. Причину этого можно понять следующим образом: магнитный элемент (например, магнитная трубка) должен находиться в полном равновесии давления с немагнитным окружением: сумма газового и магнитного давления внутри элемента должна быть равна давлению в окружающей среде. Но из-за того, что давление внутри трубки больше, она начинает расширяться. Плотность трубки уменьшается, и она под действием силы Архимеда всплывает. Однако, оказывается, что сроки всплытия трубок больше, чем время жизни звезд на главной последовательности, если только трубки не малы. Это не согласовывается с наблюдениями, которые предполагают в основном крупномасштабную структуру на поверхности. Также загадкой в этой теории является огромный диапазон напряжённостей полей различных звезд,

которые, как предсказывается, имеют одинаковые конвективные ядра.

Теория реликтового поля лучше объясняет наблюдения, в частности крупномасштабную геометрию и большие напряженности полей. Основная идея заключается в том, что вместо непрерывной регенерации в каком-то продолжающемся динамо-процессе, поле находится в устойчивом равновесии в статической излучательной зоне, а магнетизм в звездах является реликтом межзвездного поля протозвёздного облака, из которого родилась звезда.

### *3.1. Модель 1: динамо-механизм*

Теория динамо (гидромагнитного динамо, т.к. усиливается или поддержания стационарное, либо колебательное состояние магнитного поля гидродинамическими движениями проводящей среды) является ветвью магнитогидродинамики. Релятивистские эффекты, токи смещения обычно не учитываются. В этом смысле магнитное поле не зависит от системы отсчёта и можно пользоваться представлением о магнитных силовых линиях (см. подробнее [5]).

Название "гидромагнитное динамо" появилось из-за схожести процесса с работой динамо-машины. Особенность механизма состоит в том, что оно должно быть самовозбуждающимся, т. е. не поддерживаемым за счёт внешних источников поля. Сформулируем определение динамо так: пусть в объёме плазмы с заданной проводимостью поддерживаются движения плазмы и создано слабое магнитное поле, не поддерживаемое далее внешними источниками. Если со временем поле и полная магнитная энергия рассматриваемого объёма не убывают, несмотря на действие омической диссипации, то имеет место гидромагнитное динамо.

Магнитные поля звёзд, согласно теории солнечного динамо, вызваны движением вещества в конвективной зоне звезды. Магнитное поле вращающегося проводящего газа или жидкости генерирует самоусиливающиеся электрические токи и связанные с ними магнитные поля, вследствие сочетания дифференциального вращения (вращения с разными угловыми скоростями на различных широтах звезды), силы Кориолиса и индукции. Распределение токов может быть достаточно сложным, с многочисленными открытыми и закрытыми петлями, и, таким образом магнитное поле этих токов в непосредственной близости от них также

достаточно сложно распределено. На больших расстояниях, однако, магнитные поля токов, текущих в противоположных направлениях взаимно компенсируются, и остаются только дипольные поля, медленно уменьшающиеся с расстоянием. Поскольку основной ток движется в направлении вращения звезды (экваториальных течений), основной компонент порожденного магнитного поля направлен перпендикулярно экватору, создавая магнитные полюса вблизи географических полюсов вращающегося тела.

В случае дипольной конфигурации направление оси магнитного диполя часто близко к направлению оси вращения звезды, с заметными исключениями, такими как у некоторых пульсаров. Еще одна особенность этой модели динамо в том, что токи, скорее переменные, а не постоянные. Токи (и, следовательно, магнитное поле, которое они производят) испытывают более или менее периодические изменения амплитуды и направления. Однако, они всё равно в целом остаются совмещены с осью вращения звезды.

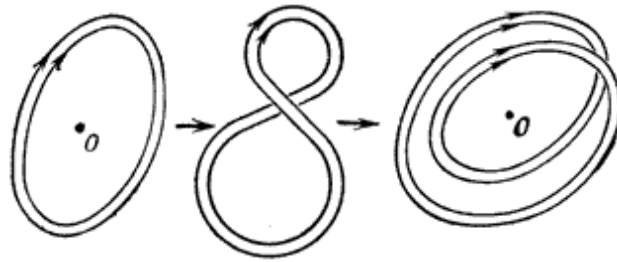


Рис. 1: Усиление магнитного поля путём перекручивания и удвоения петель: движения среды придают линиям начального тороидального магнитного поля форму восьмёрки, затем совмещают петли восьмёрки и растягивают получившийся тор до начальных размеров. После этого процесс повторяется. При каждом удвоении числа петель происходит двукратное усиление магнитного поля

Эффекты генерации магнитного поля благодаря неоднородному (дифференциальному) вращению и спиральности турбулентности составляют основу теории турбулентного гидродинамо крупномасштабных магнитных полей (см. подробнее [6]). Эта теория используется при решении ряда астрофизических задач: генерация магнитных полей в ядрах планет, в дисках двойных рентгеновских источников, в галактическом диске, в объяснении солнечного цикла и др. Дифференциальное вращение в проводящей среде с магнитным полем в меридиональной (содержа-

щей ось вращения) плоскости приводит к появлению (накручиванию) азимутального (перпендикулярного меридиональной плоскости в данной точке) поля. В то же время турбулентные движения запутывают магнитные силовые линии, уменьшая их характерный масштаб. Для усиления и поддержания крупномасштабных полей турбулентные движения не должны обладать зеркальной симметрией. Нарушение зеркальной симметрии означает преобладание вихрей одного знака (правовинтовых или левовинтовых). Такая турбулентность не типична для лабораторных экспериментов, однако естественным образом возникает в космических условиях благодаря вращению неоднородных небесных тел. Как показали теоретические исследования, зеркально-несимметричные случайные движения способны генерировать крупномасштабное магнитное поле. В дополнение к указанным двум эффектам крупномасштабное поле подвергается турбулентной диффузии, которая гораздо эффективнее омической. Кроме того, неоднородная (в частности, у границ) турбулизованная проводящая среда ведёт себя подобно диамагнетику, т. е. крупномасштабное магнитное поле выталкивается из турбулентной области. К выталкиванию магнитных силовых линий приводят и крупномасштабные течения плазмы с замкнутыми линиями тока. Своеобразный эффект вытеснения поля возможен в ячеистой конвекции, в которой жидкость поднимается в центре ячейки и опускается у её границ.

### *3.2. Солнечное динамо*

Пусть цикл начинается с полоидальных (дипольного типа) магнитных полей. Со временем, посредством дифференциального вращения, линии полоидального типа растягиваются в азимутальную плоскость, становясь тороидальными. При этом также происходит их усиление. В связи с тем, что диффузия у основания конвективной зоны мала, в этой области магнитное поле сохраняется дольше. Считается, что когда поле достигает определенного порога (порядка  $10^5$  Гс), магнитные трубки начинают подниматься с основания конвективной зоны к поверхности. Данный механизм и называется магнитной плавучестью. Далее, благодаря альфа-эффекту, имеющему по разным моделям разное пространственное распределение в конвективной зоне, из магнитных линий тороидального типа образуется полоидальная компонента, которая с помощью меридиональной циркуляции переносится к полюсам. Следует отметить, что новое полоидальное поле имеет обратную полярность по сравнению с

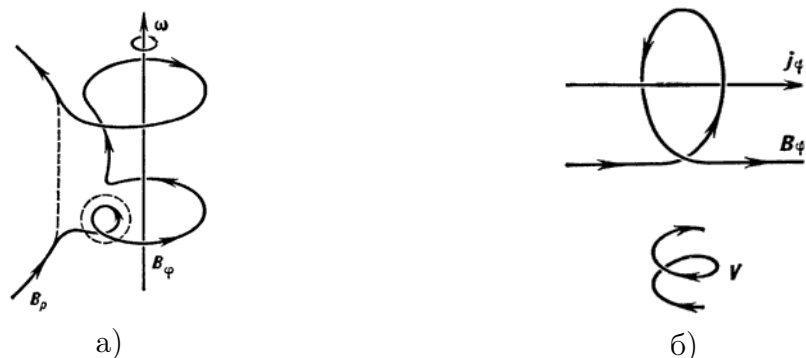


Рис. 2: На левом рисунке изображена генерация магнитного поля в случае неоднородного вращения плазмы. В результате накручивания вмороженных магнитных силовых линий из исходного полоидального (меридионального) поля образуется азимутальное поле. Штриховым кружком отмечена одна петля, созданная турбулентными движениями, которая изображена на правом рисунке, где продемонстрирован эффект гидромагнитного динамо при наличии средней спиральности движений плазмы. Преобладание течений указанного на рисунке типа (левосторонняя спираль) приводит к появлению электрического тока, параллельного магнитному полю. Такой ток в свою очередь создаёт магнитное поле, перпендикулярное исходному полю. Повторное применение эффекта к новому полю позволяет создать поле, параллельное (или антипараллельное) исходному, т. е. приводит к самовозбуждению системы.

изначальным полем.

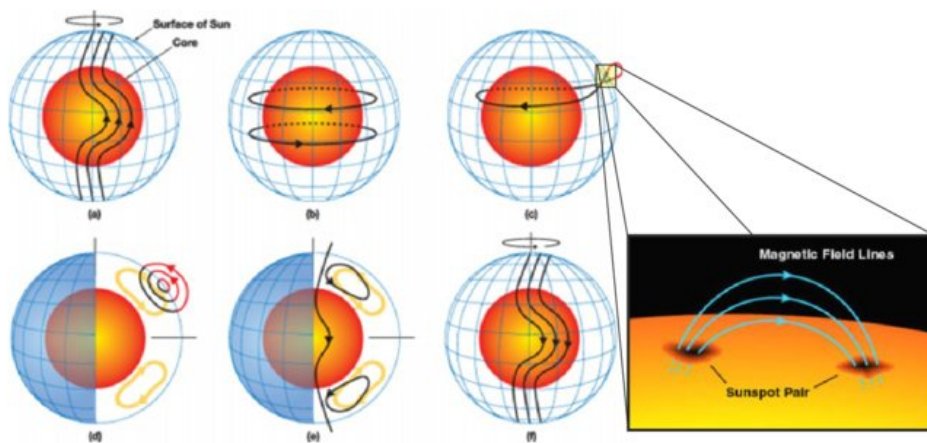


Рис. 3: Демонстрация динамо-механизма на солнце



### 3.3. Модель 2: реликтовое магнитное поле

Гипотеза реликтового магнитного поля была предложена Коулингом (1945), который показал, что временная шкала омической диссипации магнитного поля в звездах с массами  $M \geq 1.5 - 2M_{\odot}$  превышает временной масштаб их эволюции. Поэтому, Коулинг пришел к выводу, что звездные магнитные поля могут быть остатками магнитных полей протозвездных облаков. Как уже было сказано выше, поле находится в равновесии в статической излучательной зоне. В МГД магнитное поле  $B$  определяется в соответствии с уравнением:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B} - \eta \nabla \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

где  $\mathbf{u}$  - скорость жидкости, а  $\eta$  - магнитная диффузия, обратная электропроводности.

В свою очередь, поле скоростей связано с силами, действующими на газ, то есть с градиентом давления, силой тяжести и силой Лоренца через уравнение импульса:

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g + \frac{1}{4\pi\rho} (\nabla \times \mathbf{B}) \mathbf{B} \quad (2)$$

где  $P, \rho, g$  - давление, плотность и сила тяжести соответственно. В равновесной немагнитной звезде, градиент давления и гравитация уравновешивают друг друга. При добавлении произвольного магнитного поля, сила Лоренца заставит газ двигаться приблизительно с альвеновской скоростью  $v_A = B/\sqrt{4\pi\rho}$  и система эволюционирует со временем:  $\tau_A = R/v_A$ , (где  $R$  - радиус звезды), которое для звезды с полем 1 кГс составляет примерно 10 лет. В конце концов, можно надеяться на достижение равновесия - реликтовое магнитное поле (fossil field)- где три силы уравновешивают друг друга и  $\mathbf{u} = 0$ , так что первый член из уравнения исчезает, а поле развивается только на диффузионной шкале времени  $R^2/\eta$ . Коулинг первым понял, что эта шкала времени составляет порядка  $10^{10}$  лет в излучающем ядре Солнца, и что поле в равновесии может существовать в течение всего времени жизни звезды. Однако магнитное равновесие также должно быть стабильным, потому что временные масштабы неустойчивости имеют порядка альвеновского времени  $\tau_A$ , который может составлять всего лет (см. подробнее в [2]).

Много усилий было приложено для нахождения таких устойчивых конфигураций. К сожалению, с помощью аналитических методов их существование невозможно продемонстрировать. Это было серьезным недостатком теории реликтового поля, но с учетом слабых сторон теории динамо, такие равновесные состояния должны были существовать. Аналитические попытки найти такие равновесия делятся на две части: сначала найти само положение равновесия, а затем проверка его устойчивости. Совсем недавно стало возможным найти устойчивые равновесия с использованием численных методов. Самая простая равновесная конфигурация состоит из одной трубки магнитного поля вокруг магнитного экватора звезды, в окружении области полоидального поля. Более сложные конфигурации могут иметь в основе более одной трубки. Из наблюдений магнитных А, В и О звезд видно, что и простые, и более сложные конфигурации существуют в природе.

По сути, численный метод состоит в расчете эволюции магнитного поля звезды, содержащей изначально некоторое произвольное начальное поле. Можно смоделировать упрощенную (но радиационную) звезду: самогравитирующий газовый шар с уравнением состояния идеального газа, соотношением удельных теплоемкостей  $\gamma = 5/3$  и стратификацией давления и плотности, как в политропе с  $n = 3$ , вложенный в атмосферу с низкой электропроводностью. В течение нескольких альвенских временных периодов поле самоорганизуется в осесимметричное равновесное поле как с тороидальной, так и с полоидальной составляющими в конфигурации скрученного тора:

#### *3.4. Образование реликтового поля*

Характерные размеры областей, занимаемых космическими телами, обычно столь велики, что даже при умеренной проводимости плазмы характерные времена омического затухания поля огромны. Поэтому магнитные силовые линии практически "приклеены" к движущейся проводящей среде, которая увлекает за собой поле. Если силовая линия проходила через какие-либо две близкие частицы среды, то она будет проходить через них и в дальнейшем. В условиях вмороженности произведение индукции магнитного поля на площадь любого движущегося со средой контура (магнитный поток) сохраняется, что может привести к усилению магн. поля при деформации (например при сжатии) контура.

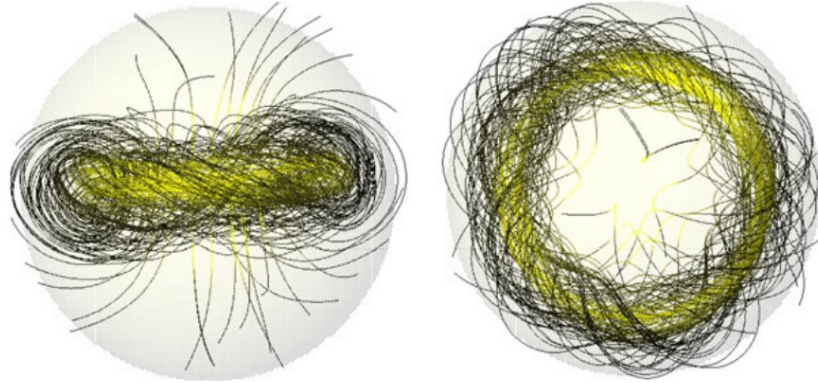


Рис. 4: Форма стабильного поля в звезде, если смотреть вдоль и перпендикулярно оси симметрии. Прозрачная поверхность представляет поверхность звезды; сильное магнитное поле показано желтыми линиями поля, слабое черным. Рисунок из работы: Braithwaite J, Nordlund A. 2006

Таким образом, согласно традиционной модели, изменения напряженности магнитного поля в межзвездной среде (ISM) просто переносятся в звезду. Однако в свете недавних результатов, включая обнаружение слабых магнитных полей у Веги и Сириуса А, этот сценарий, по крайней мере в его самой простой форме, теперь выглядит очень маловероятным - диапазон в напряженности поля у звезд намного больше, чем у исходных протозвёздных облаков. Подводя итог, можно сказать, что такая простая модель игнорирует большую часть процесса звездообразования и поэтому сама по себе не может объяснить того, что мы видим в звездах.

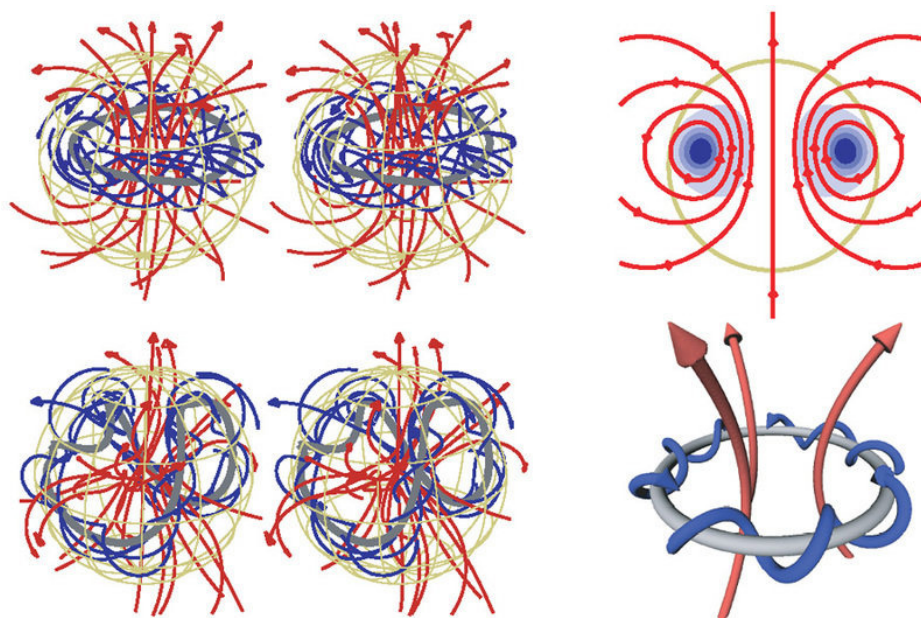


Рис. 5: Приведённая иллюстрация демонстрирует результат моделирования эволюции магнитного поля звезды в [7]. На изображениях слева видно, что силовые линии внутри звезды, переплетаясь друг вокруг друга, образуют кольцо (обозначено синим цветом), и сдерживают и стабилизируют другие линии магнитного поля, пробивающиеся сквозь поверхность звезды (обозначены красным). Схематический рисунок в правом нижнем углу и изображение звезды в разрезе в правом верхнем более наглядно демонстрируют устройство магнитного поля. Со временем (на протяжении сотен миллионов лет) магнитное поле постепенно вытесняется наружу, затем искривляется, приобретая форму полоски на теннисном мячике, и исчезает

Слияния звёзд или протозвёзд (*mergers*) являются одним из самых вероятных механизмов образования сильных реликтовых полей. Богомазов, Тутуков (2009) предполагают, что Ар-звёзды могут быть результатом слияния двойных звезд с конвективными оболочками, орбиты которых сближаются в результате магнитного торможения. Это кажется более вероятным на стадии эволюции до главной последовательности. Как именно слияние должно произвести такое магнитное поле, не понятно, но мы можем, по крайней мере объяснить таким образом наблюдаемый диапазон магнитных полей звёзд. Самый важный недостаток такого сценария - существует слишком мало магнитных двойных систем (1-2% от всех), чтобы объяснить малость доли наблюдаемых магнитных звёзд (7-8%).



Рис. 6: (NASA/ESA Hubble) Это компактная зона звездообразования в созвездии Лебедя. Недавно сформированная звезда под названием *S106 IR* окутана пылью в центре изображения и отвечает за форму песочных часов окружающего газового облака и видимую внутри нее турбулентность. Излучение от водорода окрашен в синий цвет.

## 4. Магнитные поля звёзд разных масс

### 4.1. Маломассивные звёзды

Будем считать маломассивными звёздами те, которые имеют конвективные оболочки во время горения водорода. Тогда, все звезды с низкой массой должны обладать магнитными полями. То есть наличия конвективной оболочки достаточно для создания поля. Хотя более быстрые ротаторы имеют тенденцию проявлять более высокую магнитную активность, но даже медленные, как наше Солнце, обладают значительным магнитным полем. Эти поля приводят к эффективной потере углового момента за время жизни этих звезд в той мере, в которой их скорость вращения зависит от их возраста.

#### *4.2. Звёзды промежуточных масс*

Такие звёзды оказываются в основном немагнитными (т.е. у большинства из них не измерено достоверно магнитное поле). Только около 10% звезд во время горения в ядре водорода в этом диапазоне масс демонстрируют сильное крупномасштабное поле, составляющее порядка нескольких сотен гаусс, в то время как оставшиеся 90% имеют поля, которые слабее одного гаусса. Структура магнитных полей звёзд промежуточных масс, по-видимому, проста по сравнению с полями звезд низкой массы (Donati & Landstreet 2009). Звёзды промежуточных масс с магнитными полями обычно являются медленными ротаторами. Хотя их ядра конвективны и могут генерировать магнитное поле в глубине, маловероятно, что это поле может переноситься в радиационную оболочку или даже на поверхность звезды. А оболочки этих звёзд являются радиационными, так что динамо-механизм здесь не работает. Как упоминалось выше, Braithwaite & Spruit (2004) обнаружили стабильную конфигурацию магнитного поля в этих звездах. Тем не менее, в то время как предложенные геометрии поля вполне совместимы с наблюдаемыми, это не позволяет сделать вывод о происхождении этих полей.

#### *4.3. Массивные звёзды*

Наблюдательные данные свидетельствуют о том, что массивные звезды главной последовательности показывают как мелкомасштабные поля, создаваемые конвективными динамо-оболочками, так и крупномасштабные стабильные поля, как они наблюдаются в звездах промежуточной массы (см. подробнее [1]).

##### *4.3.1. Мелко-масштабные магнитные поля*

Cantiello et al. (2009) указал, что массивные звезды главной последовательности имеют конвективные оболочки, которые способны создавать наблюдаемые магнитные поля. Хотя зоны конвекции возникают под поверхностью звезды из-за пиков непрозрачности, возникающих при рекомбинации железа и гелия, их расстояние до поверхности настолько мало, что трубки с магнитным потоком могут всплывать на поверхность за короткое время. Их пространственная протяженность составляет значительную долю радиуса звезды. Существует множество наблюдательных свидетельств существования этих подповерхностных конвекционных зон.

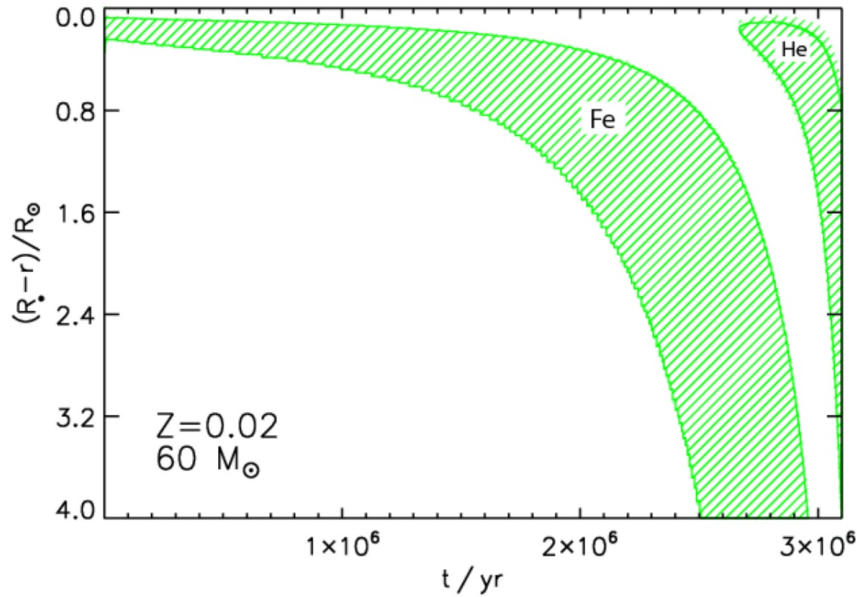


Рис. 7: (Cantiello et al. (2009): эволюция протяжённости подповерхностных гелиевых и железных конвективных областей (заштрихованных) как функция времени от главной последовательности нулевого возраста до конца горения водорода в ядре для звезды  $60 M_{\odot}$ . Верхняя часть графика представляет звездную поверхность. На графике показаны только верхние  $4R_{\odot}$  звезды, а сам звездный радиус увеличивается в процессе эволюции. Звезда имеет металличность  $Z = 0,02$ , а ее эффективная температура снижается с  $48000 \text{ K}$  до  $18000 \text{ K}$  за время эволюции на ГП.

#### 4.3.2. Крупно-масштабные магнитные поля

Было определено, что доля магнитных ОВ-звезд составляет порядка  $10\%$  (Grunhut & Wade 2012), и магнитные конфигурации аналогичны тем, которые встречаются у звезд промежуточных масс, с преобладанием сильно наклоненных к оси вращения звезды магнитных диполей или мультиполей низкого порядка. Косвенным свидетельством малости доли магнитных звёзд среди массивных звёзд является диаграмма Хантера ранних В-звезд LMC, которая показывает, что  $15\%$  из них являются медленными ротаторами, обогащенными азотом (Hunter et al. 2008, Brott et al. 2011b). Morel et al. (2008) идентифицировали похожую популяцию в нашей Галактике и показали, что у большей части этих объектов действительно обнаружено магнитное поле.

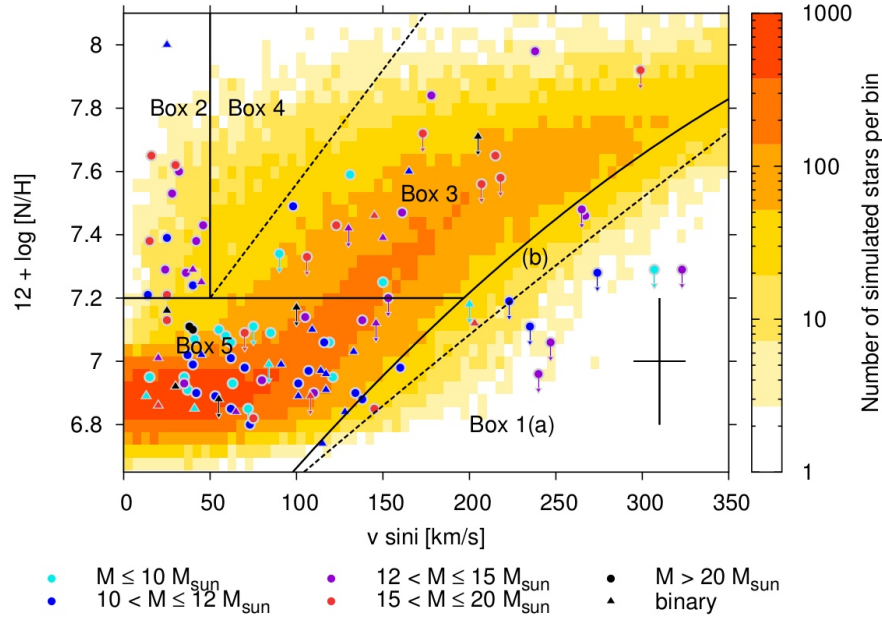


Рис. 8: Диаграмма Хантера для ранних В-звезд (LMC) из обзора the VLT-FLAMES Survey of Massive Stars, показывающая прогнозируемую скорость вращения в зависимости от их содержания на поверхности азота. Одиночные звезды изображены в виде кругов, переменные лучевой скорости в виде треугольников. Результат моделирования с помощью популяционного синтеза, который основан на модели эволюции одной звезды с вращательным перемешиванием, показан в виде графика плотности (от белого до красного) (Brott et al. 2011ab). Крест в правом нижнем углу - типичная ошибка наблюдений

## 5. Основные результаты и открытые вопросы

Растущее качество и количество наблюдательных данных дает много подсказок и ограничений теории образования магнитных полей, чем когда-либо прежде. Параллельно растет реализм численного моделирования МГД, что делает их эффективным и незаменимым средством проверки теоретических предположений. Примером является предмет «ископаемых полей», которые стали предпочтительной интерпретацией устойчивых магнитных полей, видимых на звездах Ар, Вр и О. Здесь численный расчёт МГД не только убедительно воспроизвел диапазон наблюдаемых поверхностных распределений этих звезд, но также обеспечил физическое понимание их стабильности и внутренней структуры. Одна-



ко, как уже объяснялось ранее, теория реликтового магнитного поля ещё имеет много недостатков, так что приходится делать всё новые и новые теоретические предположения.

Итого, основные нерешённые проблемы теорий формирования магнитных полей звёзд следующие:

- теория и численные расчёты всё ещё не объясняют наблюдаемые магнитные поля: мы можем описать их только частично, в зависимости от разных параметров звезды
- ни один из этих механизмов не объясняет малую долю магнитных звёзд среди заданного интервала масс
- почти во всех случаях численного моделирования, воссоздание реальных физических условий в недрах звёзд останется недостижимым в обозримом будущем, независимо от ожидаемого увеличения вычислительной мощности

## Список литературы

- [1] Langer N., *Magnetic Fields in Stars: Origin and Impact*, Proceedings IAU Symposium No. 302, (2014)
- [2] Braithwaite J., Spruit H.C. *Magnetic fields in non-convective regions of stars*, R. Soc. open sci. 4 (2017)
- [3] Ferrario L., Melatos A., Zrake J., *Magnetic Field Generation in Stars*, Space Science Reviews, Volume 191, Issue 1-4, pp. 77-109, (2015)
- [4] Dudorov A., Khaibrakhmanov S., *Theory of fossil magnetic field*, Advances in Space Research, Volume 55, Issue 3, p. 843-850, (2015)
- [5] <http://www.astronet.ru/db/msg/1191490> - гидромагнитное динамо
- [6] Прохоров А.М., *Физика космоса*, изд. Советская энциклопедия, (1986)
- [7] Braithwaite J., Nordlund A., *Stable magnetic fields in stellar interiors*, Astron.& Astrophys. 450, 1077–1095 (2006)
- [8] Яковлев Д.Г., Хэнсель П., Бейм Г., Петик К., *Л.Д.Ландау и концепция нейтронных звёзд*, Успехи Физических Наук, том 183 №3, 307-314 (2013)