

Аналитический обзор

Соглашение от 24 августа 2012 года № 8406.

Тема: «Наблюдательные проявления эволюции звезд.»

**Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение наук
Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук**

Основная проблема в понимании эволюции звезд заключается в адекватном и критическом сопоставлении результатов современных наблюдений с результатами модельных расчетов звездной эволюции. Точные измерения параметров у репрезентативной выборки звезд и сопоставление их с модельными треками вполне могут решить проблему эволюции массивных звезд. Для одиночных звезд решение проблемы их эволюции заключается в правильном определении эволюционной последовательности различных типов звезд и скорости эволюции на разных этапах в зависимости от изначальной металличности (металличности данной галактики). Для двойных звезд задача эволюции становится существенно более многогранной, здесь кроме основных эволюционных диаграмм необходимо изучать двойственность звезд, влияние двойственности на эволюцию и исследовать рентгеновские источники в галактиках. Скорость накопления данных наблюдений, современная точность измерения параметров звезд, возможности современного моделирования эволюции звезд позволяют быть уверенным, что проблема эволюции звезд будет решена.

Проблема эволюции звезд одна из самых актуальных в современной астрофизике, многие вопросы этой проблемы можно разрешить (и часто это единственный способ) методами наблюдений на крупнейших наземных и космических инструментах. Звезды, и особенно, массивные звезды, являются прародителями сверхновых, гамма-всплесков, из них формируются релятивистские объекты - черные дыры и нейтронные звезды. Звезды являются единственными поставщиками химических элементов и пыли в космосе, другими словами, эволюция звезд они являются источниками жизни. Самые первые звезды Вселенной, появившиеся 13 млрд. лет назад ("население III"), снабдили Вселенную первыми тяжелыми элементами и сделали возможным формирование галактик и "обычных звезд". В современную эпоху массивные звезды влияют на динамику и состояние межзвездной среды посредством выброса вещества и кинетической энергии через ветер, через взрывы сверхновых, посредством ионизации среды излучением. Их роль в эволюции галактик значительна. Даже понимание эволюции галактик сейчас невозможно без знаний и понимания эволюции звезд. Итак, эволюция звезд является краеугольным камнем, фундаментом астрофизики, исследования эволюции звезд принципиально актуальны, наше

адекватное понимание эволюции звезд обеспечивает эффективность исследований в астрофизике.

Современные возможности и точности измерений позволяют сравнивать с современными моделями не только отдельные объекты, но и их статистические закономерности. Основные задачи проекта: 1) выделение репрезентативной выборки звезд в Галактике, а также массивных звезд в близких галактиках, выделение молодых скоплений звезд; 2) максимально точное определение фундаментальных параметров этих звезд (масса, светимость, температура, возраст); 3) определение фундаментальных параметров (масса, возраст, светимость) молодых скоплений звезд; 4) исследования намагниченности выборки звезд на разных стадиях эволюции; 5) исследования проявлений двойственности и кратности звезд отдельной выборки; 6) построение диаграмм цвет-светимость и цвет-цвет для звезд и скоплений, сопоставление положения исследуемых объектов с модельными треками эволюции звезд и скоплений, получение модельных распределений звезд на этих диаграммах. Последовательное решение этих задач позволит определить эволюционный статус всех изучаемых объектов, сделать выводы об особенностях эволюционных этапов звезд в зависимости от металличности и темпе звездообразования в галактиках, существенно уточнить существующие современные модели эволюции звезд. Репрезентативность выборки позволит быть уверенным в справедливости и надежности выводов.

Современные модели звезд предсказывают не только изменение основных параметров звезд и скоплений с возрастом, эволюция звезд и ее финальные стадии (вспышки сверхновых) существенным образом зависят от металличности материала, из которого сформирована звезда, от скорости вращения звезды, от намагниченности звезды и от двойственности и кратности звезд. Металличность звезд как правило известна на основе металличности данного типа населения Галактики или металличности исследуемых галактик, но остальные параметры задачи необходимо измерять. Измерения магнитных полей массивных звезд (типы OB, WR) в нашей Галактике и построение функций магнитных полей массивных звезд Галактики с привлечением литературных данных является весьма важной задачей. Такой же важной задачей, которая должна быть решена на телескопе БТА является анализ распределений звезд по периодам в двойных и кратных системах, по расстоянию между компонентами систем и по разности блеска компонент.

В современной астрофизике в понимании эволюции звезд становятся важными так называемые "дополнительные параметры", это кратность или двойственность звезд,

вращение и намагниченность звезд. Как точность наблюдений, так и возможности моделирования возросли настолько, что считавшиеся ранее незначительными, эффекты кратности и намагниченности существенным образом влияют на эволюцию звезд.

Магнетизм звезд широко распространенное явление, сейчас магнитные поля обнаружены в разнообразных объектах Галактики, находящихся на различных стадиях эволюции и расположенных в различных ее областях. Задача исследования механизмов образования магнитных полей в массивных звездах, их эволюции и взаимодействии с веществом важна для понимания физики вспышек сверхновых в нашей Галактике и за ее пределами. Сейчас становится понятным, что результат вспышки сверхновой (образование нейтронной звезды или черной дыры) и эффективность выброса струй во время вспышки (гамма-всплески) зависит от величины магнитного поля звезды. Кроме того, знания о намагниченности массивных значительно осложняют задачу. Необходимо проведение высокоточных измерений магнитных полей звезд разных типов массивных звезд. В мире такая работа только началась, особенно актуальны сейчас исследования общих закономерностей в звездном магнетизме.

Звездное население в галактиках теснейшим образом связано с населением рентгеновских источников (черные дыры, нейтронные звезды). От понимания эволюции звезд зависит наше понимание образования черных дыр и нейтронных звезд в галактиках, процессов выделения энергии и выброса вещества в результате аккреции газа на черные дыры в двойных системах на конечных стадиях эволюции. Это вопросы формирования релятивистских звезд и их связи с населением массивных звезд в галактиках разной металличности. Это также вопросы обмена и потери массы в двойных звездах, структуры аккреционных дисков вокруг релятивистских объектов, физика сверхкритической аккреции на черные дыры, вопросы формирования каналов в аккреционных дисках, струйных выбросов и истечения ветра из дисков. Принципиально важные вопросы эффективности энерговыделения в аккреционных дисках, накопления массы черными дырами и выброса массы в струях и ветрах при разных темпах аккреции вполне разрешаются наблюдениями отдельных объектов и сравнением результатов наблюдений с предсказаниями моделей.

Двойственность звезд кардинальным образом влияет на эволюцию, особенно на определенных этапах и критических стадиях эволюции. Важнейшей проблемой является изучение происхождения и эволюции кратных массивных звездных систем, а также изучение их химического состава, структурных особенностей и строения атмосфер. Для этого

необходимы точные определения фундаментальных параметров компонент молодых кратных массивных звезд (наиболее перспективна близкая Туманность Ориона) на основе высокоточных комплексных спекл-интерферометрических, фотометрических, поляриметрических и спектральных наблюдений. Выявление связи между кратностью звезд и их основными физическими параметрами является важнейшей проблемой.

Современные модели звезд предсказывают не только изменение основных параметров звезд и скоплений с возрастом, эволюция звезд и ее финальные стадии (вспышки сверхновых) существенным образом зависят от металличности материала, из которого сформирована звезда, от скорости вращения звезды, от намагниченности звезды и от двойственности и кратности звезд. Металличность звезд как правило известна на основе металличности данного типа населения Галактики или металличности исследуемых галактик, но остальные параметры задачи необходимо измерять. Измерения магнитных полей массивных звезд (типы OB, WR) в нашей Галактике и построение функций магнитных полей массивных звезд Галактики с привлечением литературных данных является весьма важной задачей. Такой же важной задачей, которая должна быть решена на телескопе БТА является анализ распределений звезд по периодам в двойных и кратных системах, по расстоянию между компонентами систем и по разности блеска компонент.

Современные возможности и точности измерений позволяют сравнивать с современными моделями не только отдельные объекты, но и их статистические закономерности. Основные задачи проекта: 1) выделение репрезентативной выборки звезд в Галактике, а также массивных звезд в близких галактиках, выделение молодых скоплений звезд; 2) максимально точное определение фундаментальных параметров этих звезд (масса, светимость, температура, возраст); 3) определение фундаментальных параметров (масса, возраст, светимость) молодых скоплений звезд; 4) исследования намагниченности выборки звезд на разных стадиях эволюции; 5) исследования проявлений двойственности и кратности звезд отдельной выборки; 6) построение диаграмм цвет-светимость и цвет-цвет для звезд и скоплений, сопоставление положения исследуемых объектов с модельными треками эволюции звезд и скоплений, получение модельных распределений звезд на этих диаграммах. Последовательное решение этих задач позволит определить эволюционный статус всех изучаемых объектов, сделать выводы об особенностях эволюционных этапов звезд в зависимости от металличности и темпе звездообразования в галактиках, существенно уточнить существующие современные модели эволюции звезд. Репрезентативность выборки позволит быть уверенным в справедливости и надежности выводов.

Основная проблема в понимании эволюции звезд заключается в адекватном и критическом сопоставлении результатов современных наблюдений с результатами модельных расчетов звездной эволюции. Точные измерения параметров у репрезентативной выборки звезд и сопоставление их с модельными треками вполне могут решить проблему эволюции массивных звезд. Для одиночных звезд решение проблемы их эволюции заключается в правильном определении эволюционной последовательности различных типов звезд и скорости эволюции на разных этапах в зависимости от изначальной металличности (металличности данной галактики). Для двойных звезд задача эволюции становится существенно более многогранной, здесь кроме основных эволюционных диаграмм необходимо изучать двойственность звезд, влияние двойственности на эволюцию и исследовать рентгеновские источники в галактиках. Скорость накопления данных наблюдений, современная точность измерения параметров звезд, возможности современного моделирования эволюции звезд позволяют быть уверенным, что проблема эволюции звезд будет решена.

Мы пришли к выводу, что необходимо провести новый анализ магнитных полей CP-звезд, находящихся на разных стадиях эволюции. Для этого необходимо получить новые данные при помощи прямых измерений спектров, полученных с зеемановским анализатором, и провести новое тщательное рассмотрение уже имеющихся наших результатов и сведений, взятых из литературы.

Наиболее подходящими объектами для исследования эволюции звездных магнитных полей являются магнитные Vp-звезды. Наша выборка этих объектов уже достаточно большая, что позволяет проводить статистический анализ, а их сильные поля можно измерить относительно точно. Возраста Vp-звезд находятся в широких пределах: от нескольких миллионов до нескольких сотен миллионов лет. Периоды вращения (как правило, от 1 до 20 суток) различаются значительно слабее по сравнению с Ap-звездами, поэтому эффекты эволюции можно отличить от эффектов, связанных с вращением. Около 1/3 найденных магнитных CP-звезд относятся к спектральному классу B - (так называемые Vp-звезды). Их эффективные температуры T_e находятся в пределах от 10000 К до 25000 К, а магнитные поля на поверхности достигают 30 кГс и больше. Значительная количество Vp-звезд найдено в молодых рассеянных скоплениях (в интервале возрастов от $\log t = 6$ до $\log t = 8$). Как правило, это быстрые ротаторы, периоды вращения которых не превышают нескольких суток, Скорости вращения холодных Vp-звезд в 2-3 раза ниже, чем у нормальных той же

температуры, а горячие объекты с усиленными линиями гелия имеют те же скорости вращения, что и нормальные. Депрессии континуума наблюдаются только у самых холодных Вр-звезд, имеющих T_e не более 12000 К.

Таким образом, мы показываем, что эволюцию магнитных полей СР-звезд с возрастом во время их пребывания на Главной последовательности следует изучать по Вр-звездам. На это есть несколько причин.

1. Возраст большинства Ар-звезд нашей выборки определялся по эволюционным трекам. В работе показано, что большинство величин $\log t$ сконцентрированы в интервале от 8.2 до 8.9, т.е. различаются не более, чем в 5-6 раз. В то же время, эти различия для Вр-звезд достигают двух порядков. Так как в среднем возраста магнитных Ар-звезд различаются мало, их использование не даст эффекта при попытках построения эволюционных зависимостей. Для этой цели необходимо исследовать и сравнивать объекты, возраста которых различаются существенно.

2. В отличие от Ар-звезд, возраста примерно половины Вр-звезд найдены исходя из возраста скоплений, членами которых они являются. Величина $\log t$ звезд скоплений определяется значительно увереннее, чем объектов поля по эволюционным трекам, поэтому можно считать, что в целом возраст Вр-звезд нашей выборки определен более надежно, чем Ар-звезд. Наши исследования показывают, что средний возраст большой выборки Вр-звезд составляет 1776 Гс, в то время как для выборки Ар-звезд - 1170 Гс. У горячих и массивных звезд поле в 1.5 раза больше, чем у холодных.

Мы предлагаем провести полный спектральный и магнитный обзор массивных Вр-звезд северного полушария в молодых скоплениях (возрастом менее 30 млн. лет), находящихся на расстоянии ближе 1 кпк. В настоящее время пределом для 6м телескопа является 11-я звездная величина V. Наш анализ, проведенный выше, показывает, что именно среди самых молодых Вр-звезд следует искать объекты со сверхсильными для звезд ГП магнитными полями, что является одной из главных целей нашей программы. Критерием отбора кандидатов для наблюдений поля будет служить наличие очень сильных линий гелия в спектре. К настоящему моменту мы знаем уже 6 объектов с явно недипольной структурой поля. И все они - горячие молодые звезды. Реально это значит, что поля у них значительно сильнее, чем это видно на кривой переменной продольной компоненты V_e и имеют сложную мультипольную структуру. Анализ полей сложной топологии представляет собой

трудную задачу, но она выполнима. Мы ожидаем, что у значительной части звезд с аномальными линиями гелия, магнитное поле которых исследовалось ранее по водороду, профили спектральных линий будут сложными. Мы надеемся, что моделирование таких сложных поляризованных профилей позволит найти сильные мультиполярные поля у этих объектов.

Необходим также тщательный анализ методических вопросов. Как правило, не возникает проблем в случае звезд с узкими и резкими линиями. Для таких объектов практически все методы дают одинаковые поля. Но при исследованиях быстровращающихся пятнистых звезд, имеющих сложные профили линий, поля, полученные разным способом, различаются порой очень существенно. Важнейшая цель работы - это определение частоты встречаемости магнитных Вр-звезд относительно нормальных. Список из 125 магнитных Вр-звезд, из которых примерно половина являются членами скоплений, еще очень небольшой для выполнения такого анализа. Поэтому надо находить новые магнитные Вр-звезды, особенно в скоплениях. В базе данных WEBDA приведен список рассеянных скоплений в которых найдены Ар и Вр-звезды методами среднеполосной фотометрии. Вызывает удивление малое количество пекулярных звезд, найденных в них. Как правило, это 1-3 объекта, в лучшем случае - несколько. Вопросу о встречаемости магнитных Вр-звезд в скоплениях необходимо уделить специальное внимание.

Несколько лет назад стартовал крупный международный проект MiMeS, посвященный комплексному исследованию массивных OB-звезд, в том числе поиску их магнитных полей. Получены первые результаты, из которых следует, что у O-звезд не наблюдается сильных (более нескольких сотен Гс) продольных полей. Итак, анализ наших собственных данных и всех доступных сведений, взятых в литературе, показывает, что наиболее сильными полями среди объектов Главной последовательности обладают B-звезды с аномальным химическим составом.