

О наблюдательных фактах, подтверждающих двойственность магнитных химически пекулярных звезд

В. Ф. Гопка, О. М. Ульянов¹, С. М. Андриевский

*Астрономическая обсерватория, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова,
г. Одесса, 65014, Украина
E-mail: gopka.vera@mail.ru; scan1.deneb@tenet.ua*

*¹Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: oulyanov@rian.kharkov.ua*

Предложенный нами ранее сценарий эволюции гоАр звезды Пшибыльского (HD101065), вращающейся с нейтронной звездой (пульсаром) в плоскости, перпендикулярной лучу зрения, можно распространить на другие магнитные звезды. Результаты наблюдений магнитных звезд в радио, рентгеновском и ИК диапазонах, свойства магнитных химически пекулярных звезд, а также феномен гоАр звезд объясняются в рамках предложенной гипотезы.

Введение

Согласно современной теории эволюции звезд конечной стадией эволюции звезд с массой больше массы Солнца являются белые карлики, нейтронные звезды или черные дыры. В двойных системах эти объекты эволюционируют более быстро, чем одиночные звезды. Пары с белыми карликами связывают с феноменом бариевых (Ba) звезд. Стоит подчеркнуть важность исследования химического состава атмосфер Ba звезд. Именно исследования химического состава атмосфер этих звезд позволили сначала выделить данные звезды в отдельную группу по ряду признаков [1], а затем была объяснена природа Ba звезд [2]. Звезда с большей массой в двойной системе, перед тем как стать белым карликом, в результате взрыва сбрасывает часть вещества с приобретенными в процессе эволюции изменениями химического содержания на вторую звезду, которая становится обогащенной элементами s-процесса Ba звездой. Процент этих объектов небольшой, ~1 % от общего числа G-K-звезд.

Обнаруженные в 1967 г. пульсары оказались быстровращающимися нейтронными звездами. В настоящее время в каталоге ATNF приведены параметры для 1775 пульсаров [3]. Двойные системы, в состав которых входят пульсары, также известны. Ряд нейтронных звезд излучают как рентгеновские пульсары (АХР) с периодом изменения импульсного излучения в рентгеновском диапазоне до 12 с. В этом случае вблизи них, как правило, находится аккрецирующий диск. В случае рентгеновских пульсаров можно предположить, что звезда-компаньон станет донором вещества для нейтронной звезды. Но до последнего времени не было уделено должного внимания исследованию влияния нейтронной звезды на обычную звезду и тому, к каким последствиям может привести это влияние. Методы исследования МСР (magnetic chemical peculiar – магнитных химически пекулярных) звезд настолько усовершенствовались, что точность измерения радиальной скорости их пульсаций выросла на порядок. На современных телескопах точность определения радиальной скорости ≤ 1 м/с [4].

В настоящей работе мы попытаемся показать, что МСР звезды могут входить в состав тесных двойных систем в паре с нейтронной звездой (пульсаром). Мы предлагаем модель, качественно объясняющую феномен таких МСР звезд и все наблюдаемые свойства этих звезд.

Отметим, что обнаружить пару нейтронная звезда – МСР звезда по данным каталогов пока не представляется возможным. Нами проанализированы окрестности всех пекулярных звезд, указанных в каталоге Бычкова, Бычковой и Мадея [5], и все двойные системы, в которые входят пульсары [3]. Также рассматривались окрестности МСР звезд, указанных в более поздних работах. Существенных различий между объектами, окружающими γ Ar звезды, или объектами отдельно той или иной подгруппы магнитных звезд не обнаружено. Однако такое рассмотрение носит явно селективный характер: известные пульсары в основном находятся на расстояниях свыше 1 кпк (в радиусе меньше 1 кпк от Земли находится всего 78 известных пульсаров), а большинство МСР звезд, атмосферы которых исследованы с целью детального определения химического состава, расположены внутри сферы радиуса 1 кпк. Т. е. основное количество известных пульсаров находится намного дальше, чем идентифицируемые МСР звезды.

Но многие свойства МСР звезд могут интерпретироваться естественным образом, если предположить, что все они входят в состав тесных двойных систем, где одним из компонентов является нейтронная звезда (пульсар). Предположения о двойственности магнитных звезд (т. е. нахождении МСР звезды в составе двойной системы) высказывались и ранее [6, 7]. Небольшое число фактически обнаруженных вторых компонентов вблизи МСР звезд еще не означает, что такие компоненты отсутствуют. Вероятно, что второй компонент может быть труднообнаружимым. Усов и Мелроуз в работе [8] сделали теоретические предсказания о возможном происхождении рентгеновского излучения в магнитных звездах ранних спектральных классов в предположении наличия второго компонента. Отметим, что малый процент МСР звезд, имеющих рентгеновское излучение, ставил под сомнения тот факт, что эти звезды являются источниками этого излучения [9]. Добавим, что у большинства обычных звезд обнаруживается присутствие спутника. Так, например, статистические исследования звезд спектрального класса А (в южной части неба) показали наличие почти 60 % двойных (и более кратных) гравитационно связанных звезд на расстоянии меньше 100 пк [10].

Рассмотрим магнитные звезды в рамках гипотезы, утверждающей, что МСР звезды входят в состав тесных двойных систем, вторым компонентом которых есть нейтронная звезда (НЗ). Ниже укажем данные наблюдений, поддерживающие наше предположение. Если удастся подтвердить эту гипотезу, то оценка количества таких систем, приведенная в монографии [11], должна измениться в сторону их увеличения. На сегодняшний день нет ответа на вопрос почему 5 ÷ 10 % звезд главной последовательности имеют химический состав, отличающий их от остальных, нормальных, звезд, имеющих химический состав, аналогичный составу Солнца [12]. Мы не будем касаться обсуждения немагнитных звезд, как более горячих – Hg-Mn звезд (ртутно-марганцевых), так и более холодных – Am звезд (металлических). В настоящей работе мы рассмотрим эволюционный статус магнитных химически пекулярных звезд, занимающих на диаграмме Герцшпрунга–Рессела промежуточное положение между ртутно-марганцевыми и металлическими звездами.

Основные свойства магнитных химически пекулярных звезд

Самая простая классификация химически пекулярных (CP) звезд верхней части главной последовательности – это деление на магнитные (МСР) и немагнитные звезды (Hg-Mn – ртутно-марганцевые звезды и Am-Fm – металлические). Магнитные химически пекулярные звезды – это звезды, для которых наблюдаются периодические вариации магнитного поля, блеска, показателя цвета и переменность некоторых спектральных линий в оптическом диапазоне. Для ряда звезд обнаружена переменность и в более широком диапазоне длин волн: радио, ИК, рентгеновском. Диапазон эффективных температур для магнитных звезд составляет от 7000 до 22000 К согласно Курцу и Мартинесу [13]. Известно, что Vp-Ar звезды принадлежат главной последовательности, но точный эволюционный статус остается спорным для звезд с измеряемым магнитным полем. Известно также, что МСР звезды должны иметь сложную природу [6, 7, 14]. Несмотря на то что этот феномен изучается с 50-х гг. прошлого века, он не понят до настоящего времени. Исследуя данные объекты с помощью разных методов, мы получаем важную информацию, но именно исследование химического состава звезд стало главной подсказкой для понимания их феномена. Рассмотрим следующие факты, полученные в результате более чем полувековых исследований химического состава атмосфер МСР звезд, переменности их блеска, явления γ Ar звезд, радионаблюдений, рентгеновских, ИК наблюдений МСР звезд.

Исследования химического состава атмосфер МСР звезд

В 50-60 гг. прошлого века первые детальные исследования химического состава атмосфер нескольких магнитных звезд показали, что мы "...имеем дело с ядерными, а не с атомными процессами и что где-то и каким-то образом в этом участвуют нейтроны" [15]. Известно, что если речь идет об аномалиях СР звезд главной последовательности, то это аномалии химического состава верхних слоев атмосферы. Для магнитных и немагнитных звезд при одной и той же температуре химический состав может сильно различаться [16]. В ряде работ, например в работе Бербиджа [17], считалось, что взрыв сверхновой в двойной системе мог бы послужить тем фактором, который способствует возникновению аномалий у звезд главной последовательности. Действительно, процентное содержание ряда элементов таково, что приближается к содержанию изотопов, образованных в результате г-процесса (HR465) [18]. Уорнером было отмечено, что наблюдаются продукты г-процесса в атмосфере звезды Пшибыльского (ЗП) [19]. Результаты по исследованию линий самых тяжелых элементов в спектрах магнитных звезд, в том числе линий кюрия (См) и америция (Ам) в спектре звезды HD25354, а также линий прометия (Рм) в спектре HR465, дали основание Кушовичу [20] обсуждать возможность протекания ядерных реакций на поверхности звезд. Кушовичем [20] указывается, что на поверхности звезд ядерные реакции возможны в следующих случаях:

- 1) под действием гамма лучей от близкой сверхновой звезды;
- 2) под влиянием высокоэнергетических атомов, переносимых материей выброшенной в результате взрыва соседней звезды;
- 3) из-за разогрева верхних слоев звезды, находящихся под облучением сверхновой;
- 4) из-за переноса магнитных полей.

Среди всех СР звезд, принадлежащих верхней части главной последовательности, особое место занимает звезда HD101065 (ЗП), обнаруженная Пшибыльским в 1961 г. [21]. Спектр звезды насыщен линиями лантаноидов [22-26]. При исследовании области спектра ЗП в окрестности линии лития 6708 Å Шавриной было обнаружено большое количество линий поглощения лантаноидов. Ею были просмотрены неидентифицированные линии в спектре ЗП, исходя из атомных данных по потенциалам верхнего и нижнего уровня для лантаноидов. Отметим, что в области линии лития 6708 Å линии поглощения практически отсутствуют у Прокциона – звезды с параметрами (температура атмосферы и ускорение силы тяжести), идентичными параметрам ЗП. С появлением данных NIST количество лантаноидов, идентифицированных в спектре, возросло сразу в несколько раз.

Для ЗП было получено значение содержания лития, близкое к свежесинтезированному в космических лучах. Первым, кто отметил наличие линии лития в спектре HD101065 и оценил содержание лития в атмосфере звезды, был Уорнер [19]. Позже в ряде работ Шавриной и др. выполнен более точный анализ содержания лития с учетом магнитного поля как для ЗП, так и для других магнитных звезд [27-31].

Отождествление линий радиоактивных элементов прометия и технеция (Тс) в спектрах таких звезд, как ЗП, HR465, HD965, является предметом многолетней дискуссии. С 1970 г. в печати появляется серия работ о том, обнаруживаются или нет линии прометия и/или технеция в спектрах этих звезд, или это линии других элементов. Иными словами, могут ли атмосферы сравнительно молодых звезд содержать прометий и/или технеций [32-40]? Напомним, что прометий имеет атомный номер $Z = 61$, лантаноид, период полураспада самого долгоживущего изотопа прометия ^{145}Pm составляет 17.7 года [39]. Технеций имеет большой период полураспада. Все изотопы технеция радиоактивны, время жизни наиболее долгоживущих ^{99}Tc , ^{98}Tc , ^{97}Tc более $2.1 \cdot 10^5$ года [40]. Согласно современной теории эволюции звезд этих элементов не должно было бы быть в атмосфере звезды на стадии горения водорода в ядре. Исследование линий некоторых стабильных элементов в спектре ЗП и других магнитных звезд показывает изотопные сдвиги, например для кальция [41, 42], что свидетельствует о присутствии нейтронноизбыточных изотопов таких элементов.

Хотя часть линий NdIII учитывалась нами при расчете синтетического спектра HD101065, очень сильные линии NdIII дополнительно были идентифицированы Рябчиковой [43]. Но значительная часть линий по-прежнему не поддавалась идентификации. При расчете синтетического спектра использовались данные по содержанию элементов, полученные в работе Каули и др. [25]. Сопоставление линий неидентифицированных элементов в реальном спектре с синтетическим спектром, рассчитанным при увеличенном содержании в атмосфере ЗП того или иного стабильного элемента, приводит к ухудшению согласия расчетного и реального спектров. При попытках согласовать эти спектры были учтены практически все стабильные изотопы.

Лишь при сопоставлении длин волн радиоактивных элементов с атомными номерами от 83 до 99 (эйнштейний) и длин волн неидентифицированных линий в спектре ЗП было получено четкое согласие в совпадении длин волн. Часть упомянутых выше элементов не рассматривалась ранее при изучении звездных спектров. Результаты идентификации линий трансвисмутовых элементов в спектре ЗП, выполненной независимо Гопкой и др. [44] и Байдельманом [45], хорошо согласуются. Использование новых баз атомных данных для идентификации тяжелых радиоактивных элементов подтверждают ранее полученные результаты [46, 47]. Такой подход увеличивает число обнаруженных звезд с трансвисмутовыми элементами [48, 49]. Стоит отметить более обширные списки длин волн для отождествленных нами линий плутония [46, 47]. Аналогично линиям двукратно ионизированных лантаноидов, например линиям NdIII, в спектре ЗП были идентифицированы и линии двукратно ионизированного актиноида AcIII [46]. Известно, что эти линии возникают в спектрах звезд более ранних спектральных классов, т. е. более горячих, чем ЗП, температура которой $T_{\text{eff}} = 6600$ К. Этот факт также указывает на необычные условия, имеющиеся в атмосфере ЗП, что характерно и для других МСР звезд.

Стало ясно, что проблема состоит уже не в подтверждении или отрицании присутствия линий радиоактивных элементов в спектрах звезд (период полураспада некоторых, как например эйнштейния, исчислялся даже днями), а в том, чтобы понять и объяснить происхождение этих элементов в верхней части атмосферы достаточно молодых звезд. Каков механизм, отвечающий за образование радиоактивных элементов в атмосфере ЗП и других МСР звезд? В 2007 г. Горизэли [50] теоретически показал возможность нуклеосинтеза (в том числе и нуклеосинтеза тяжелых радиоактивных элементов) за счет попадания высокоэнергетических частиц в атмосферу ЗП. Им был проанализирован один из вариантов нуклеосинтеза, ранее предложенный Кушовичем. Горизэли [50] использовал следующие данные о ЗП:

- а) высокое содержание лития и его изотопов [30];
- б) присутствие короткоживущих изотопов прометия и нейтроноизбыточного изотопа кальция в атмосфере [33, 42];
- в) наличие короткоживущих трансвисмутовых элементов [44, 45].

Горизэли в своей работе не указывает источник частиц высокой энергии. Таким источником, в принципе, могла бы быть сверхновая звезда, вспыхнувшая поблизости от ЗП. Тем не менее взрыв сверхновой в двойной системе и последующая аккреция вещества на поверхность звезды-компаньона не решает проблемы с наблюдаемыми особенностями в спектре ЗП. Должен быть механизм, поддерживающий постоянное возникновение короткоживущих радиоактивных элементов в атмосфере звезды. Ламберт в частной переписке [51] указывает, что для того чтобы процесс образования радиоактивных элементов шел непрерывно, необходим постоянный приток высокоэнергетических частиц. В работе [52] указывает, что протекание г-процесса более эффективно при наличии достаточного количества электронов.

Чтобы удовлетворить целому ряду наблюдательных данных, а именно: высокому содержанию лития и его изотопов, близкому к свежесинтезированному в космических лучах [27-31]; данным по нейтроноизбыточным изотопам ряда элементов магнитных звезд [41, 42]; наличию короткоживущих радиоактивных элементов, таких, как прометий [39], трансвисмутовых элементов, в том числе актиноидов [44-49], – нами была предложена модель ЗП [53-56]. В рамках этой модели ЗП входит в состав тесной двойной системы и подвергается бомбардировке высокоэнергетическими частицами

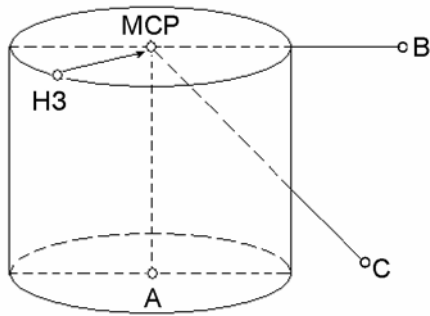


Рис. 1. Наблюдение тесной двойной системы MCP звезда – H3 при различных углах между лучом зрения и плоскостью орбиты (верхний торец цилиндра). Наблюдения из точки A моделируют условия наблюдений HD 101065 (ЗП), наблюдения из точки B – условия наблюдений CU Vir. Если наблюдатель расположен в точке C, то это соответствует наиболее общему случаю

ультрарелятивистской электрон-позитронной плазмы, исходящей от второго компонента системы – нейтронной звезды. Прямым следствием предложенного механизма должна стать возможность наблюдения эмиссионной линии аннигиляции электрон-позитронных пар вблизи энергии 511 кэВ. На рис. 1 схематически изображена геометрия системы, включающей в себя MCP звезду, H3 и наблюдателя при разных положениях последнего относительно орбитальной плоскости двойной системы. В рамках данной геометрии из точки A наблюдатель видит MCP звезды, аналогичные ЗП, из точки B – звезды, подобные звезде CU Vir. Направление из точки C может быть таким, что поочередно наблюдается или область магнитного полюса или область магнитного экватора звезды.

Следует сказать, что еще Хавнис и Конти [57] в 1971 г. представили модель магнитных звезд с наличием вблизи них аккрецирующего вещества [58]. Но только в 2008 г. [54, 55] нами был предложен конкретный механизм протекания ядерных реакций в атмосферах MCP звезд и указан источник высокоэнергетических частиц, необходимых для реализации этого процесса.

Переменность блеска и интенсивностей спектральных линий

Переменность профиля линий в спектрах MCP звезд указывает на то, что мы наблюдаем неоднородности на поверхности звезды, области или пятна с повышенным содержанием хрома, лантаноидов, лития, железа, кремния и т. п., которые из-за вращения звезды (доплеровский сдвиг) позволяют нам исследовать локальные области того или иного элемента [59]. Уже в ранних работах, например в работе Стиббса [60], исследовалась звезда HD125248, для которой изменение интенсивности линий аналогично тому, что наблюдается у некоторых других магнитных звезд. Так, например, усиленные линии поглощения хрома сменяется усиленными линиями поглощения лантаноидов. Аналогичную картину мы наблюдаем для гоAr звезды HR465. Наряду с лантаноидами для звезды HR465 даже в видимой области наблюдаются линии актиноидов: ThIII, ThII, UIII, UII. С периодом около 23 лет претерпевают изменения (но уже в меньшей степени) линии других элементов: Mn, Th, U, – и линии инертных газов [61]. Исследования показывают, что область лития расположена вблизи магнитного полюса звезды [27-31]. Можно предположить, что при смене положения звезды мы поочередно наблюдаем околополюсную область, которая сменяется при повороте видимой областью магнитного экватора (область хрома).

Изменения цвета и блеска (несколько сотых звездной величины) соответствуют небольшим вариациям температуры (несколько сотен градусов) [59]. В обзоре Хохловой [59] приводятся расчеты температуры пятен, которые подтверждают наши оценки [54, 56]. Указывается, что сильные изменения претерпевают линии, которые мало чувствительны к изменениям температуры и давления. Хохловой получено, что для звезды CU Vir (HD124224, Sp = B8, $T_{\text{eff}} = 14000$ K) нужно было бы увеличить температуру более чем на 4000 K, чтобы получить наблюдаемое изменение эквивалентных ширин для линии SiII ($\lambda 4128+4130$), в то время как изменения блеска и цвета соответствуют изменению температуры лишь на $300 \div 400$ K.

Воздействие ультрарелятивистской электрон-позитронной плазмы пульсара на магнитные полюсы звезды-компаньона могло бы разогреть эти участки до более высокой температуры, подхо-

дующей для возбуждения атомов определенного элемента. Именно такое воздействие может увеличить температуру на 3000 К и более [54, 56], что и наблюдается [59]. Оценим энергетические потери НЗ, предполагаемого компаньона ЗП, и сопоставим их с интенсивностью бомбардировки атмосферы ЗП. Мы будем исходить из того, что изначально НЗ была радиопульсаром. Усредняя энергетические потери всех пульсаров, приведенных в каталоге ATNF [3], можно полагать, что потери “среднего” радиопульсара должны составлять $8.43 \cdot 10^{35}$ эрг/с. Эти потери распределяются между излучением и кинетической энергией электрон-позитронной плазмы, образующей ветер от пульсара. Положим, что обе составляющие потерь приблизительно одинаковы. Далее рассмотрим такую конфигурацию тесной двойной системы, при которой на ЗП рассеивается минимальная энергия ветра пульсара ($R = 1.0$ а. е.). Полагая, что $E = 4\pi\sigma R^2 T_{\text{eff}}^4$ (где E – кинематические потери НЗ, σ – постоянная Стефана–Больцмана, R – расстояние ЗП–НЗ), получим оценку дополнительной температуры нагрева поверхности ЗП из-за рассеяния на ней излучения и плазменного потока: $1300 \text{ К} \leq T_{\text{eff}} \leq 3000 \text{ К}$. Нижняя и верхняя оценки соответствуют средним энергетическим потерям всех пульсаров и средним энергетическим потерям молодых, т. н. “high energy” пульсаров соответственно. В нашем сценарии такой дополнительный нагрев МСР звезды будет анизотропным, т. к. электрон-позитронная плазма будет более интенсивно выпадать в области повышенной напряженности магнитного поля на полусфере, обращенной к НЗ. Таким образом, некоторые локальные пятна в верхней атмосфере МСР звезды могут нагреваться еще больше, чем это следует из наших оценок.

О гоАр звездах

Среди более холодных МСР звезд выделяется подгруппа SrCrEu звезд с изменениями блеска в тысячные доли звездной величины и небольшими периодами (порядка минут), называемая группой гоАр звезд (быстро осциллирующие звезды). Согласно определению Курца [62] гоАр звезды – это химически пекулярные А звезды с сильным магнитным полем, которые пульсируют на высоких обертонах с периодом $5 \div 21$ мин. Они активно наблюдались начиная со времени их открытия [62]. В обзоре Рябчиковой [63] указан период от 4 до 16 мин. Первой звездой, у которой Курцем в 1978 г. были обнаружены осцилляции, была ЗП [64]. Частотный анализ фотометрических наблюдений (больше 100 циклов кривой блеска у HD 101065) установил, что основной период составляет 12.141 мин с амплитудой переменности блеска $\Delta B = 0.012$ звездной величины [64].

Исследования [65] показали, что Ар звезды, для которых не были обнаружены пульсации, необыкновенно похожи на гоАр звезды во многих аспектах (индексы цвета, содержание химических элементов, магнитное поле). Незначительное различие между двумя группами по их кинематическим свойствам, указанные в ряде работ, в том числе и работе [65], позднее не подтвердилось [66]. Однако указывалось, что возможно гоАр являются более эволюционировавшими звездами. Как упоминалось выше, за последние годы спектроскопия с высоким спектральным и временным разрешением сыграла большую роль: точность измерений лучевой скорости выросла на порядок величины. В этом плане стоит указать работу Кочухова и др. [67], в которой авторами исследуется выборка десяти гоАр звезд с небольшой скоростью вращения. Кочухов и др. [67] полагают, что модуляции эквивалентных ширин линий являются следствием периодического расширения и сжатия слоев в верхней атмосфере гоАр звезд. Эти результаты очень важны. Они подтверждают нашу гипотезу о возможном влиянии НЗ на соседнюю звезду. Можно предположить, что мы наблюдаем явление гоАр звезд для менее массивных МСР звезд, и это связано с отношением масс звезд в двойной системе. Их взаимное влияние максимально при равновеликих массах. Напомним, что оценка максимальной массы пульсара дает $(1.35 \div 1.60)M_{\odot}$ (где M_{\odot} – масса Солнца) [68]. Характерные массы гоАр звезд в среднем меньше, чем у неппульсирующих Ар звезд, и составляют $(1.5 \div 2.5)M_{\odot}$ [66].

Большая разница в массах (до 10 раз для наиболее горячих звезд ранних спектральных классов), малый размер нейтронной звезды не способствуют обнаружению МСР звезд как звезд, эволюционирующих в двойных системах. С нашей точки зрения, только для более поздних спектральных классов главного компонента, когда массы звезд компаньонов в системе становятся сопоставимыми, влияние пульсара может быть обнаружимым. В этом случае мы и наблюдаем явление гоАр звезды.

В рамках такого сценария можно объяснить и вариации напряженности магнитного поля в верхней атмосфере. Например, их можно интерпретировать, как изменение высоты магнитопаузы над поверхностью МСР звезды. Эти изменения высоты могут быть обусловлены вариациями плотности потока ветра, испускаемого вращающейся НЗ [54] и наличием собственных колебательных мод у МСР звезды.

Радиоизлучение МСР звезд

Часть МСР звезд является радиоисточниками в сантиметровом диапазоне. Радиоизлучение от МСР звезд было впервые обнаружено в 1970 г. Траско и др. [69], Кодера и Формалонт [70]. Траско и др. было обнаружено радиоизлучение от хорошо исследованной звезды α^2 CVn, которая является прототипом подкласса Ар звезд. Кодера и Фомалонт для тринадцати Ар звезд с периодом от 2.88 до 159.3 дня зафиксировали радиоизлучение на длине волны 6.2 см с верхним пределом плотности потока $S(\nu)$ меньшим или равным $1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$ для всех звезд.

В результате одного из обзоров, проведенного на VLA (Дрейк и др. в 1987 г. [71]), из 34 химически пекулярных звезд спектральных классов В и А с сильными магнитными полями только у 5 звезд было обнаружено радиоизлучение на длине волны 6 см. Угловое разрешение этого обзора было лучше $1''$, а чувствительность лучше 0.5 мЯн. Из работы [72] следует, что у 25 % МСР звезд наблюдается нетепловое радиоизлучение. Более горячие звезды имеют более сильное радиоизлучение, т. е. существует четкая корреляция интенсивности радиоизлучения с эффективной температурой звезды. Однако наличие сильного магнитного поля не является достаточным условием для регистрации радиоизлучения у звезды. Так, ни у одной из девяти исследованных Ар звезд, имеющих характерные флуктуации магнитного поля $\sim 70 \div 960 \text{ Гс}$ (у звезды HD 65339А эти флуктуации достигали 7.3 кГс), радиоизлучение не было обнаружено. В 1987 г. Дрейк предложил модель излучения для описания радиоэмиссии He-strong звезд как эмиссии умеренно релятивистских нетепловых электронов. Эти электроны сосредоточены в оптически толстом источнике гиросинхротронного излучения, который расположен в закрытом поле магнитосферы на расстоянии от 2-х до 10-ти звездных радиусов. Нетепловое радиоизлучение преобладает в В-классе МСР. Спектр этого излучения плоский или имеет отрицательный спектральный индекс с нерегулярными (до 2-х раз) вариациями уровня. Поляризация для этого излучения не была зарегистрирована. Основным механизмом радиоизлучения – это синхротронное излучение электронов с гамма-фактором $\gamma \sim 2$. Далее был сделан вывод, что открыт новый класс радиоизлучающих звезд, свойства излучения которых не похожи на свойства спокойного радиоизлучения со слабой круговой поляризацией, наблюдаемого, например, в двойной системе RS CVn, включающей в виде компаньона К субгигант или гигант с характерной величиной магнитного поля 100 Гс. Наибольшее сходство, по мнению авторов, зарегистрированное радиоизлучение имело с радиоизлучением Юпитера.

Отметим некоторую непоследовательность данной интерпретации в том аспекте, что при килогауссовых магнитных полях и синхротронном механизме радиоизлучения поляризация такого радиоизлучения должна регистрироваться. В цитируемом обзоре Дрейк и др. не было обнаружено радиоизлучения звезды α^2 CVn, которое ранее наблюдалось Траско и др. на частоте 5 ГГц (6 см). Обращает на себя внимание то, что отсутствие ра-

диоизлучения у всех Ар звезд (кроме 53 Cam) коррелирует с низкими флуктуациями магнитного поля, наблюдавшимися у этих звезд. С точки зрения нашей гипотезы это может означать неблагоприятную геометрию двойной системы и наблюдателя во время проведения обзора. Необнаружение в обзоре Дрейк и др. звезды $\alpha^2 CVn$, для которой Траско зарегистрировал радиоизлучение на уровне ~ 0.01 Ян вблизи нескольких фаз относительно 5.5 дневного периода вариаций магнитного поля этой звезды, свидетельствует, что для обнаружения радиоизлучения у таких объектов следует проводить длительные обзоры.

В 1998 г. Трилио и др. [73] были выполнены наблюдения звезды спектрального класса B9p CU Vir (HD 124224), имеющей очень короткий период вращения, 0.52 суток. Данные наблюдения были проведены с помощью радиointерферометра VLA на четырех частотах: 1.4, 5, 8.4, 15 ГГц. На частоте 1.4 ГГц был зафиксирован сильный, периодически повторяющийся радиоотклик в фазах 0.4 и 0.8 относительно периода кривой блеска CU Vir со 100 %-й правой круговой поляризацией, что соответствует нулевому углу между направлением магнитного поля и лучом зрения. В рамках предложенной нами гипотезы эти результаты можно интерпретировать следующим образом. НЗ, являющаяся источником ультрарелятивистских электронов и позитронов, образует очень тесную двойную систему с CU Vir. Если массы обоих объектов соизмеримы, то должно наблюдаться сложное движение обоих объектов вокруг общего центра тяжести, подверженное гравитационным возмущениям. В фазах 0.4 и 0.8 НЗ может находиться близко к картинной плоскости вместе с CU Vir (справа и слева относительно луча зрения на CU Vir). Часть ее ветра попадает в верхнюю атмосферу CU Vir с вектором скорости, близким к перпендикулярному направлению относительно магнитного поля данной звезды. В атмосфере ветер НЗ должен тормозиться до гамма-фактора $\gamma \approx 1$ (т. е. $v \ll c$, где v и c – скорости ветра и света соответственно), прежде чем он будет захвачен магнитным полем. При этом должно возникать тормозное излучение из-за взаимодействия электронов/позитронов с кулоновскими полями ядер (прежде всего водорода как наиболее распространенного элемента). Спектр этого излучения будет ограничен максимальными кинетическими энергиями частиц налетающей плазмы и простирается в сторону понижения частоты (вплоть до нулевых частот) с некоторым повышением интенсивности. Электроны и позитроны, потерявшие основную часть своей кинетической энергии, могут захватываться магнитным полем и излучать циклотронное излучение. Гиромагнитная частота электронов рассчитывается по классической формуле: $\omega_m = eB \sin(\varphi) / m_e$ [74], где e , m_e – заряд и масса покоя электрона; $B \approx 1$ Тл (1000 Гс) – магнитная индукция; $\sin(\varphi) \approx 0.5$; $\gamma \approx 1$. Эти параметры подобраны так, чтобы частота циклотронного резонанса равнялась 1.4 ГГц. Заметим, что в данной интерпретации электроны и позитроны будут вращаться вокруг силовых линий магнитного поля в противоположных направлениях. Поскольку между ними будут действовать силы Кулона, часть электронов и позитронов аннигилирует. Наиболее вероятным сценарием аннигиляции будет реализация двухфотонного канала $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$, при котором оба образовавшихся фотона разлетятся в диаметрально противоположные стороны (в системе центра масс электрона и позитрона) с одинаковыми уносимыми энергиями $E = m_e c^2 \approx 0.510994$ МэВ. Фактически эмиссионная линия аннигиляции должна быть сдвинута в сторону несколько больших энергий из-за взаимодействия встречных потоков частиц. Этот сдвиг позволит оценить скорости электронов и позитронов в зоне аннигиляции, ширина линии – эффективную температуру, а Зеемановское расщепление – напряженность магнитного поля. Менее вероятными сценариями будут трехфотонная аннигиляция и аннигиляция с образованием большего количества фотонов. Данные сценарии приведут к аддитивной добавке энергии в спектре тормозного излучения. Отношение сечений рассеяния при различных сценариях можно оценить по формуле:

$$\frac{\sigma(2\gamma)}{\sigma(m\gamma)} = \left(\frac{\sqrt{\alpha^{-2}}}{\sqrt{\alpha^{-m}}} \right)^2 \equiv \frac{1}{\alpha^{m-2}},$$

где $\alpha = 1/137$ – постоянная тонкой структуры, $m > 1$ – число образовавшихся фотонов. Не аннигилировавшие электроны и позитроны при винтовом движении (со взаимно противоположными спиралями) вдоль магнитного поля должны излучать обыкновенные и необыкновенные волны, имеющие круговые (левую и правую) поляризации. Вероятнее всего, в силу специфики анизотропной магнитоактивной среды (направление магнитного поля и т. п.) собственные моды с левой круговой поляризацией сильно затухают при распространении вдоль магнитного поля. В результате наблюдатель на Земле видит практически 100 %-ю правую круговую поляризацию.

Разумеется, здесь рассматривается только качественная интерпретация наблюдений с привлечением предложенной нами гипотезы. Однако поскольку в таком аспекте ситуация еще никак не рассматривалась, следует особое внимание обратить на прямое следствие предложенной гипотезы, а именно на наличие эмиссионной линии аннигиляции электронов и позитронов, которую у данного типа объектов еще никто не наблюдал. Наличие такой линии является закономерным финальным аккордом эволюции электрон-позитронной плазмы, затормозившейся в нейтральной мишени практически до нулевых скоростей. В электрон-ионной плазме (без античастиц) этого явления принципиально не возникает. Если такую линию удастся пронаблюдать в гамма-диапазоне, то это не только подтвердит нашу гипотезу, но и даст возможность более точно определить физические условия в верхних атмосферах МСР звезд.

Отметим, что детальные модели, которые согласовывают радиоспектр, его поляризационные особенности с особенностями классификации и специфики звезд, излучающих в радиодиапазоне, еще не разработаны.

МСР звезды как источники рентгеновского и гамма-излучения

Некоторые МСР звезды являются источниками рентгеновского излучения. Более сильное рентгеновское излучение регистрируется у звезд ранних спектральных классов [8]. Но рентгеновское излучение наблюдается у сравнительно небольшого количества этих звезд, около 10 %. С точки зрения статистики, действительно, этот процент небольшой. Но главная причина в отрицании того факта, что МСР звезды могут быть источниками рентгеновского излучения, связана с тем, что до сих пор не была понятна природа рентгеновского излучения этих звезд. Даже после теоретических расчетов, выполненных Усовым и Мелроузом в 1992 г., и их утверждения, что рентгеновская светимость сильно зависит от того, является ли звезда двойной или одиночной [8], в 1999 г. Дрейк излагает сомнения относительно того, что рентгеновское излучение принадлежит МСР звездам [9].

Дрейк отмечает, что свойства рентгеновского излучения МСР звезд все еще не определены, вопрос существования значительного количества плазмы при температуре 10^6 К остается неясным и все еще неподтвержденным остается тот факт, что рентгеновское излучение, наблюдаемое на протяжении 20 лет [9], – это общее явление, связанное с МСР звездами. Причина наличия рентгеновского излучения не объяснена, и в этом случае Дрейк считает, что статус МСР звезд как класса звезд излучающих в рентгеновском диапазоне еще не доказан. Возможно, потребуется пересмотр модели Усова и Мелроуза [8] и предсказанной ими рентгеновской светимости порядка $7 \div 8$ звездной величины.

Согласно нашему сценарию в первой фазе молодой радиопульсар (причиной его возникновения может быть либо взрыв сверхновой II типа в окрестностях ЗП, либо случайный захват “беглого” пульсара гравитационным полем МСР звезды) воздействует на МСР звезду за счет высокоэнергетической ультррелятивистской электрон-позитронной плазмы своего ветра. С одной стороны, попадая в верхнюю атмосферу МСР звезды, такой ветер порождает каскад высокоэнергети-

ческих гамма-квантов за счет тормозного излучения, возникающего из-за взаимодействия электронов/позитронов с кулоновскими полями атомных ядер. Наличие гамма-квантов в области энергий $2 \div 30$ МэВ приводит к запуску фотоядерных реакций в верхней атмосфере звезды и соответственно появлению в ней короткоживущих изотопов. С другой стороны, благодаря наличию в ветре электронов и позитронов из протонов (ядер водорода), имеющих в изобилии в верхней атмосфере ЗП, образуются нейтроны ($p + e^- \rightarrow n + \nu$; $n + e^+ \rightarrow p + \bar{\nu}$). Из этих протонов и нейтронов могут возникнуть как стабильные, так и нестабильные изотопы. Следствием этого сценария будет усиление рентгеновского и гамма-излучения из верхней атмосферы Ар звезд.

С линией 0.511 МэВ диапазон $2 \div 30$ МэВ связан весьма косвенно, так как по нашей логике частицы, порождающие оба этих явления, одни и те же (это электроны и позитроны). В результате того что эти частицы тормозятся в кулоновских полях ядер атомов (в основном водорода), их кинетическая энергия трансформируется в фотоны и высвечивается в пределах от гамма-диапазона до нулевых частот, но верхняя частота ограничена именно значением кинетической энергии каждой тормозящейся частицы (это, собственно, и есть тормозное излучение). Теперь посмотрим, что происходит с остановившимися электронами и позитронами (они действительно теряют скорость практически до нулевых значений, так как имеющаяся в атмосфере ион-электронная плазма и налетающая электрон-позитронная плазма в целом нейтральны и баланс зарядов должен поддерживаться, а толщина атмосферы звезды огромна). Между электронами и позитронами продолжают действовать только силы кулоновского притяжения, которые с неизбежностью приведут к аннигиляции этих частиц с появлением эмиссионной линии 0.511 МэВ.

Просмотр каталогов объектов, наблюдаемых в гамма-диапазоне, показал, что практически все типы объектов являются также источниками рентгеновского излучения [75]. Гамма-излучение зарегистрировано у ряда объектов [76, 77] и является интересным с точки зрения тестирования нашего предположения о природе МСР звезд. Объектами исследований в гамма-диапазоне являются гамма- и радиопульсары, маломассивные двойные звезды с рентгеновским излучением (LMXB) и массивные двойные звезды с рентгеновским излучением (HMXB), компонентом которых может быть пульсар [78].

В настоящее время идет речь об обнаружении гамма-источников непосредственно в атмосфере МСР звезд. Наша гипотеза найдет свое подтверждение, если удастся отождествить атмосферы МСР звезд с областями, излучающими линию аннигиляции электронов и позитронов. В этой связи представляется перспективным использовать гамма-телескоп спутника GLAST, который успешно выведен на орбиту летом 2008 г.

ИК наблюдения МСР звезд

Начиная с работы Престона [79], где были заложены основы систематизации пекулярных звезд по их свойствам, и до недавнего времени считалось, что пекулярные звезды главной последовательности имеют две основных особенности: пекулярный химический состав и наличие или отсутствие магнитного поля. Такие свойства выделялись для упрощенного подхода к исследованию этих звезд, и не было никаких причин искать пылевые частицы в окрестности этих звезд. Но после работы Шаллиса и Блеквелла [80], где уточнялись значения эффективной температуры этих объектов, для этого были привлечены потоки СР звезд в ИК диапазоне, вопрос о наличии пыли в окрестностях Ар звезд был пересмотрен.

В 80-х гг. прошлого столетия Грут и Кауфман [81, 82] находят значительные избытки в распределении энергии (до 20 % по отношению к нормальным звездам) на длине волны 4.8 мк для магнитных звезд. Последующая серия работ не подтверждает этого, и только для одной из 17 звезд авторы обнаруживают наличие пылевой составляющей [81-83].

Крол и др. [84], используя данные IRAS, показали, что для пекулярных звезд ранних классов, за исключением двух звезд СР4, нет каких-либо отклонений от нормального распределения энергии вплоть до 25 мк. Две звезды показали наличие холодной околозвездной материи, что не является неожиданностью для ранних В звезд.

Леон и Каталано [85] заметили, что при использовании моделей звезд Куруча с предполагаемым солнечным химическим составом и при согласовании теоретических и реальных дан-

ных в диапазоне от 5500 до 16500 Å поток имеет слабый избыток, который составляет всего несколько процентов от общего потока. В 1991 г. Каталано и др. [86] нашли, что при мониторинге семь звезд из восьми являются переменными в ИК диапазоне. Но амплитуда переменности была более слабой, чем в видимом диапазоне. И, наконец, в работе 1998 г. [87] при исследовании 20 звезд было обнаружено, что наблюдаются ИК потоки для ряда звезд, в том числе для очень важного для нас объекта – ЗП. Это свидетельствует о наличии вблизи всех этих объектов пылевых оболочек.

Аккрецирующую на поверхность нейтронной звезды пылевую оболочку можно рассматривать как источник рентгеновских и гамма-квантов. В свою очередь, за счет рассеяния на ней оптических и более высокочастотных фотонов эта пылевая субстанция регистрируется в ИК диапазоне. Вся совокупность наблюдательных фактов указывает на высокую вероятность того, что в окрестностях ЗП когда-то произошел взрыв сверхновой. Подтверждением того, что по космическим масштабам такой взрыв произошел не очень давно, является наблюдаемый дефицит висмута и свинца – конечных продуктов распада более тяжелых радиоактивных элементов, который был обнаружен в атмосфере данной звезды [44].

Выводы

Химический состав элементов той или иной атмосферы звезды является действенным средством к пониманию ее природы и эволюции. Уникальные результаты по содержанию радиоактивных элементов, полученные для МСР звезд, дали толчок к развитию гипотезы, согласно которой МСР звезды являются объектами, входящими в состав тесных двойных систем. Такие системы в качестве второго компонента содержат НЗ. Взаимодействие НЗ (пульсара) и звезды главной последовательности может объяснить многие наблюдаемые факты, а именно:

- а) периодические вариации магнитного поля, возникновение горячих пятен на поверхности звезды, периодические изменения блеска (менее 0.2 звездной величины);
- б) феномен $\text{H}\alpha$ звезды;
- в) наличие в верхних атмосферах МСР звезд (или вблизи них) радиоизлучения, ИК излучения, рентгеновского излучения;
- г) наличие короткоживущих радиоактивных элементов в атмосферах некоторых МСР звезд (например, в атмосфере ЗП).

Наша модель предполагает возможность регистрации у МСР звезд эмиссионной линии аннигиляции электрон-позитронных пар вблизи энергии 0.510994 МэВ. Наличие этой линии или отсутствие таковой и будет важнейшим тестом предложенной гипотезы.

Литература

1. Bidelman W. P., Keenan P. C. The Ba II-stars. *Astrophys. J.* 1951, Vol. 114, pp. 473-476.
2. McClure R. D., Fletcher J. M., & Nemeč J. M. The binary nature of the barium star. *Astrophys. J.* 1980, Vol. 238, pp. 35-38.
3. <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>
4. Kurtz D. W. *Astroseismology: Past, Present and Future.* *J. Astrophys. Astr.* 2005, Vol. 26, pp. 123-138.
5. Bychkov V. D., Bychkova L. V., Madej J. Catalog of averaged stellar effective magnetic fields. I. Chemically peculiar A and B type stars. *A & A.* 2003, Vol. 407, pp. 631-642.
6. Масевич А. Г., Тутуков А. В. Эволюция звезд: Теория и наблюдения. М., Наука. 1988, С. 278.
7. Hurbig S., North P., and Mathys G. Magnetic Ap stars in the Hertzsprung-Russell diagram. *Astrophys. J.* 2000, Vol. 539, pp. 352-363.
8. Usov V. V., Melrose D. B. X-ray emission from single magnetic early – type stars. *Astrophys. J.* 1992, Vol. 395, pp. 575-581.
9. Drake S. A. High-energy phenomena in magnetic CP stars as revealed by X-ray and radio emission. *CoSca.* 1998, Vol. 27, pp. 382-389.
10. Grenier S., Burnage R., Farraggiana R., Gerbaldi M., Delmas F., Gomez A. E., Sabas V., and Sharif L. Radial velocities of Hipparcos southern B8-F2 type stars. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 2003, Vol. 135, pp. 503-509.
11. Дорошкевич А. Г., Ефремов Ю. А., Засов А. В. Происхождение и эволюция галактик и звезд. Москва, Наука. 1976, С.408.
12. North P., Cramer N. A. 23 Internat. Coll. On Astroph. "Upper Main Sequence CP-stars", Ap star detected in open cluster by the Geneva photometry. *Liege.* 1981, Vol. 23, No. 9, pp. 55-59.

13. Kurtz B. D. and Martinez P. Observing roAp stars with WET: a primer. *Balt. A.* 2000, Vol. 9, pp. 253-353.
14. Rudiger A., Scholz G. A search for the age – dependency of Ap star parameters. *Astron. Nachr.* 1988, Vol. 309, No. 3, pp. 181-195.
15. Бербидж Е. М., Бербидж Дж. Р. Нуклеосинтез в Галактиках. В сб. *Ядерная физика*. под ред. Барнса Ч., Клейтона Д., Шрама Д. Москва, Мир. 1986, с. 24-32.
16. Proffitt C. R., Michaud G. Abundances anomalies in A and B stars and the accretion of nuclear-processed material from supernovae and evolved giants. *Astrophys. J.* 1989, Vol. 345, pp. 998-1007.
17. Burbidge G. R. On the anomalous element abundances of magnetic stars. *Proceedings of the IUA Symp.* No. 22, pp. 418-419.
18. Cowley C. R., Hartoog M. R., Aller M. F., Cowley A. P. Abundances of trace elements in HR465: Evidence for the r-process. *Astrophys. J.* 1973, Vol. 183, pp. 127-131.
19. Warner B. Lithium in the peculiar star HD 101065. *Nature.* 1963, Vol. 211, No. 5044, pp. 55-56.
20. Kuchowicz B. The Peculiar A Stars and the Origin of the Heaviest Chemical Elements. *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society.* 1973, Vol. 14, No. 2, pp. 21-140.
21. Przybylski A. A G0 Star with High Metal Content. *Nature.* 1961, Vol. 189, No. 4766, pp. 739.
22. Przybylski A. Line of Holmium in the Spectrum of HD 101065. *Acta Astronomica.* 1963, Vol. 13, No.4, pp. 217-228.
23. Przybylski A., Kennedy M. The spectrum of HD 101065. *Publ. Astr. Soc. Pac.* 1963, Vol. 75, No. 445, pp. 349-354.
24. Wegner G., Petford A. D. Abundance analysis of Przybylski's star (HD101065). *MNRAS.* 1974, Vol. 168, No. 3, pp. 557-575.
25. Cowley C. R., Ryabchikova T., Kupka F., Bord D. J., Mathys G., Bidelman W. P. Abundances in Przybylski's star. *MNRAS.* 2000, Vol. 317, No. 1, pp. 299-309.
26. Gopka V., Yushchenko A., Musaev F., Galazutdinov G., Shavrina A., Polosukhina, Kim C., Pavlenko Ya. V., North P. Stellar abundance patterns. What is the possible level of completeness today? *IAU Symp. No. 210, Modelling of stellar atmospheres.* Edited by N. Piskunov, W.W. Weiss, D.F. Gray. 2003, A5.
27. Shavrina A. V., Polosukhina N. S., Tsymbal V. V. et al. Quantative Analysis the spectrum of the Magnetic roAp Star HD 83368 with "Lithium" Spots. *Astron. Repot.* 2000, Vol. 44, pp. 235-245.
28. Shavrina A. V., Polosukhina N. S., Khan S., et al. Lithium and Li6 –Li7 isotope ratio in the atmospheres of some sharp-lines roAp stars// *Astron. Report.* 2006, Vol. 50, No. 6, pp. 500-511.
29. Шаврина А. В., Полосухина Н. С., Павленко Я. В., Ющенко А. В., Гопка В. Ф. Особенности спектра уникальной roAp звезды HD 101065 в области резонансного дублета лития 6708 А. *Астрон. журн.* 2003, Т. 80, № 7, с. 538-544.
30. Shavrina A. V., Polosukhina N. S., Pavlenko Ya. V., Yushchenko A. V., Quinet P., Hack M., North, Gopka V. F., Zverko J., Zhiznovsky J., Veles A. The spectrum of the Li 6708 A spectral region. *A & A.* 2003, Vol. 400, No. 2, pp. 707-713.
31. Shavrina A. V., Khalack V., Polosukhina N. S., Zverko J., Zhiznovsky J., Gopka V. F., North P., Tsymbal V. V., Yushchenko A. V. Lithium blend fitting for roAp star HD101065 (Przybylski's star). *Odessa Astron. Publ.* 2001, Vol. 14, No. 1, pp. 249-252.
32. Wegner G., Petford A. D. Abundance analysis of Przybylski's star (HD101065). *MNRAS.* 1974, Vol. 168, No. 3, pp. 557-575.
33. Cowley C. R., Bidelman W. P., Hurbig S., Matis G., Bord D. J. On the possible presence of promethium in the spectra of HD 101065 (Przybylski's star) and HD 965. *A & A.* 2004, Vol. 419, No. 3, pp. 1087-1093.
34. Aller M., Cowley C. R. The possible identification of promethium in HR 465. *Astrophys. J.* 1970, Vol. 162, No. 3, pp. 145-148.
35. Cowley C. R., Mathys G. Line identification and preliminary abundances from the red spectrum of HD101065 (Przybylski's star). *A & A.* 1998, Vol. 339, No. 1, pp. 165-169.
36. Yushchenko A., Gopka V., Goriely S., et al. About the possibility of explanation of the spectrum of Przybylski's star by the lines of radioactive elements. *Proceedings of Science, International Symposium on Nuclear Astrophysics-Nuclei in Cosmos-IX, CERN, Switzerland, June - 2006,* pp. 25-30.
37. Wolff S. C. & Morrison N. D. Remarks on the proposed identification of promethium in HR 465. *Astrophys. J.* 1970, Vol. 175, No. 2, pp. 473-475.
38. Hartoog M. R., Cowley C. R., Cowley A. P. The application of wavelength coincidence statistics to the line identification: HR 465 and HR 7575. *Astrophys. J.* 1973, Vol. 182, No. 3, pp.847-858.
39. Fivet V., Quinet P., Biemont E., Jorissen A., Yushchenko A. V., and S. Van Eck. Transition probabilities in singly ionized promethium and the identification of Pm II lines in Przybylski's star and HR465. *MNRAS.* 2007, Vol. 380, pp. 771-790.
40. Palmery P., Quinet P., Biemont E., Yushchenko A. V., Jorissen A. and S. Van Eck. Radiative decay of the 4d5 (6 S) 5p2 5.7 P0 states in TcII: comparison along the homologous and isoelectric sequences. *Application to astrophysics.* *MNRAS.* 2007, Vol. 474, pp.307-315.
41. Cowley C. R., Hubrig S., Castelli F., et al. Heavy calcium in CP stars. *MNRAS.* 2007, Vol. 377, pp. 1579-1587.

42. Cowley C. R., Hubrig S. The calculation isotopic anomaly in magnetic CP stars. *A & A.* 2005, Vol. 432, No. 1, pp. L21-L24.
43. Ryabchikova T., Ryabctsev A., Kochukhov O., and Bagnulo S. Rare-earth elements in the atmosphere of the magnetic chemically peculiar star HD 144897. New classification of the NdIII spectrum. *A & A.* 2006, Vol. 456, pp. 329-338.
44. Gopka V., Yushchenko A., Shavrina A., Mkrtychian D. E., Hatzes A. P., Andrievsky S. M., and Chernyshova L. V. On the radioactive shells in peculiar main sequence stars: the phenomenon of Przybylski's star. The A-Star Puzzle. IAU Symp. Poprad, Slovakia. 2004, Vol. 224, pp. 119-127.
45. Bidelman W. P. Tc and other unstable elements in Przybylski's star. *Cosmic Abundances as Records of Stellar Evolution and Nucleosynthesis in honor of David L. Lambert, ASP Conference Series.* 2005, Vol. 336, pp. 309-311.
46. Гопка В. Ф., Ющенко А. В., Ющенко В. А., Панов И. В., Чулки Ким. Об идентификации линий поглощения актиноидов с коротким периодом полураспада в спектре звезды Пшибыльского (HD101065). *Кинематика и физика небесных тел.* 2008, Т. 24, № 2, с. 43-54.
47. Yushchenko A., Gopka V., Shavrina A., Nazarenko V., Young Woon Kang, C. Kim, and Yushchenko V. Radioactive elements in stellar atmosphere: are the atmospheres of Przybylski's and HR 465 contaminated by recent Supernovae? Thailand-Korea Joint Workshop on Stellar Astrophysics. 2007, (accepted).
48. Quinet P., Argante C., Fivet V., Terranova C., Yushchenko A.V., Biemont E. Atomic data for radioactive elements RaI, RaII, AcI, AcIII// *A & A.* 2007, Vol. 474, pp. 307-314.
49. Gopka V., Yushchenko A., Goriely S., Shavrina A., Kang Y. W. Radioactive elements in stellar atmospheres. AIP (American Institute of Physics) Conference proceedings, Vol. 843, Origin of matter and evolution of the galaxies International symposium on Origin of matter and Evolution of galaxies. 2005, New horizons of nuclear astrophysics and cosmology. Tokyo, Japan, 8-11 November 2005, Editors S. Kubono, W. Aoki, T., Kajno, T. Motobayashi, K. Nomoto, pp. 389-391.
50. Goriely S. Nucleosynthesis by accelerated particle to account for the surface composition of HD101065. *A & A.* 2007, Vol. 466, No. 2, pp. 619-626.
51. Lambert D. частное сообщение, 2006.
52. Arnould M., Goriely S. and K. Takashi The r-process of stellar nucleosynthesis: Astrophysics and nuclear physics achievements and mysteries. http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0705/0705.4512v1.pdf
53. Гопка В. Ф., Ульянов О. М. О гипотезе, позволяющей объяснить природу звезды Пшибыльского. *Изв. КрАО.* 2008, Т. 104, (принята к публикации).
54. Гопка В. Ф., Ульянов О. М., Андриевский С. М. О гипотезе, позволяющей объяснить природу звезды Пшибыльского. *Кинематика и физика небесных тел.* 2008, Т. 24, № 1, с. 50-60.
55. Gopka V. F., Ulyanov O. M., Andrievsky S. M. Neutron stars as source of short-lived nuclides in Ap-star atmospheres. *AIP Conf. Proc.* May 21, 2008, Vol. 1016, pp. 460-462.
56. Gopka V. F., Ulyanov O. M., Andrievsky S. M. About the possible nature of MCP stars: the models of HD101065 and HR465. *Odessa Astron. Publ.* 2007, Vol. 20, pp.57-61.
57. Havnes O. and Conti P. S. Magnetic accretion process in peculiar A-stars. *J. Astr. Ap.* 1971, Vol. 14, pp. 1-14.
58. Scholz G. Spectroscopic investigation in the magnetic Ap-star HD 9996. *Astron. Nachr.* Vol. 299, pp. 81-92.
59. Хохлова В. Л. Магнитные звезды. *Итоги науки и техники: серия Астрономия, Москва: ВИНТИ.* 1983, Т. 24, с. 233-289.
60. Stibbs D. W. N. A study of the spectrum and magnetic variable star HD 125248. *MNRAS.* 1950, Vol. 110, pp. 395-404.
61. Гопка В. Ф., Шаврина А. В., Ющенко В. А. О содержании химических элементов в атмосфере HR465. *Хром. Изв. КрАО.* 2008, Т. 104, (принята к публикации).
62. Kurtz D. W. Rapidly oscillating Ap stars. *MNRAS.* 1982, Vol. 200, pp. 807-859.
63. Ryabchikova T. N. Magnetic Ap stars: Evolutionary status and abundance anomalies. IAU Symp. Poprad, Slovakia. 2001, Vol. 145, pp. 149-160.
64. Kurtz D. W. 12.15 Minute light variations in Przybylski's star, HD101065. *Information bulletin on variable stars.* 1978, No. 1436, pp. 1-2.
65. Nelson J. M., Kredl I. J. New limits on the instability strip on the HRD: Observations from a northern sky survey of Ap stars for rapid variability. *Asrophys. J.* 1993, Vol. 105, pp. 1903-1907.
66. Hubrig S., Kharchenko N., Mathys C., North P. Rapidly oscillating Ap (roAp) are cool magnetic star Ap SrCrEu stars. *A & A.* 2000, Vol. 355, pp. 1031-1040.
67. Kochukhov O., Ryabchikova T. N., Weiss W. W., Landstreet J. D., and Lyashko D. Line profile variations in rapidly oscillating Ap stars: resolution of the enigma. *MNRAS.* 2007, Vol. 376, No. 2, pp. 651-672.
68. Попов С. Б., Прохоров М. Е. Астрофизика одиночных нейтронных звезд: радиотихие нейтронные звезды и магнитары. *Труды Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга. Том LXXII. Москва.* 2003, с. 80.
69. Trasco J. D., Wood H. J., and Roberts M. S. Radio Observations of α^2 CVn. *Asrophys. J. Letters.* 1970, Vol. 161, L129- L131.
70. Kodaira K. and Fomalont E. B. An attempt at radio observation of peculiar A stars. *Astrophys. J.* 1970, Vol. 161, pp. 1169-1171.

71. Drake S. A., Lynsky J. L. X-ray emission from chemically peculiar stars. *Astrophys. J.* 1994, Vol. 420, pp. 387-391.
72. Drake S. A., Lynsky L., Wade G. A. Radio and X-ray emission properties of magnetic chemical peculiar stars. 201st AAS Meeting. 1987, *Bulletin Astronomical Society*, Vol. 34, p. 1156.
73. Triglio C., Leto P., Leone F., Umana G., & Buemi C. Coherent radio emission from the magnetic chemically peculiar star CU Vir. *A & A.* 2000, Vol. 362, No. 1, pp. 593-601.
74. Ленг К. *Астрофизические формулы* Т. 1. М.,: Мир. 1978, С. 448.
75. Diehl R. Nuclear astrophysics with γ -ray line observations. *Proceedings of Science, International Symposium on Nuclear Astrophysics-Nuclei in Cosmos-IX, CERN, Switzerland, June 2006, No. 1*, pp. 14-23.
76. Diehl R. and Timmes F. X. Gamma – ray line emission from radioactive isotopes in stars and Galaxy. *PASP.* 1998, Vol. 1106, No. 748, pp. 637-659.
77. Diehl R., Prantzos N., von Ballmoos P. Astrophysical constraints from gamma-ray spectroscopy. *Nucl. Phys. A.* 2005, Vol. 777, pp. 70-97.
78. in't Zandt J. J. M., Jonker P. G., Nelemans G., Steeghs D., O'Brien K. Optical identification of IGR J19140+0951. *A & A.* 2006, Vol. 448, pp. 1101-1106.
79. Preston G. The chemically peculiar stars of the upper main sequence. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics.* 1974, Vol. 12, pp. 257-277.
80. Shallis M. I., Blackwell D. E. Angular diameters, radii, and effective temperatures of Ap stars. *A & A.* 1979, Vol. 79, pp. 48-55.
81. Groote D. & Kaufmann J. D. The infrared – excess of peculiar band stars. *A & A.* 1981, Vol. 944, No. 2, pp. 23-24.
82. Groote D. & Kaufmann J. D. Infrared magnitudes (JKLM) for 105 chemically peculiar A & B –stars. *Astron. & Astrophys. Suppl. S.* 1983, Vol. 53, pp. 91-96.
83. Baruch J. E. & Griffin W. K., Groote D., Mauntin C. M., Selby M. J., Nittmann J., Shallis M. J. A study of peculiar A-type stars in the infrared. *MNRAS.* 1983, Vol. 202, pp. 691-695.
84. Kroll R., Schneider H., Voit H. H., Catalano F. A. Infrared properties of CP stars. *A & A.* 1987, Vol. 67, No. 2, pp. 195-202.
85. Leone F. & Catalano F. A. The overall flux distributions of magnetic chemically peculiar stars. *A & A.* 1991, Vol. 242, No. 1, pp. 199-205.
86. Catalano F. A., Kroll R., Leone F. Infrared variability of some magnetic chemically peculiar stars. *A & A.* 1991, Vol. 248, No. 1, pp. 179-187.
87. Catalano F. A., Leone F., Kroll R. Near infrared light variations of CP stars. The SiSrCrEu stars. *A & A.* 1998, Vol. 131, No. 1, pp. 63-72.

Щодо даних спостережень, які підтверджують подвійність магнітних хімічно-пекулярних зірок

В. Ф. Гопка, О. М. Ульянов, С. М. Андриевський

Запропонований нами раніше еволюційний сценарій для роAp зірки Пшибильського (HD101065), що обертається разом з нейтронною зіркою (пульсаром) у площині, перпендикулярній до променя зору, можливо поширити на інші магнітні зірки. Результати спостережень магнітних зірок в радіо, рентгенівському та ІЧ діапазонах, властивості магнітних хімічно пекулярних зірок, та феномен роAp зірок також можуть бути пояснені у рамках запропонованої гіпотези.

On the Observation Data which Confirm Binary Nature of Magnetic Chemically Peculiar Stars

V. F. Gopka, O. M. Ulyanov, and S. M. Andrievsky

A new evolutionary scenario of the roAp Przybylski star (HD101065) that revolves with a neutron star (pulsar) in the plane which is perpendicular to the line of sight that we proposed earlier can be extended to other magnetic stars, too. Observations in radio, X-ray, and IR regions, properties of the magnetic chemically peculiar stars, as well as phenomenon of roAp stars, can be explained within the proposed hypothesis.