

УДК 524.3, 524.354.4

В. Ф. Гопка¹, О. М. Ульянов², С. М. Андриевский¹

¹Научно-исследовательский институт «Астрономическая обсерватория»

Одесского национального университета им. И. И. Мечникова

65014 Одесса, Парк Шевченко

gorpka.vega@mail.ru

²Радиоастрономический институт НАН Украины

61002 Харьков, ул. Краснознаменная 4

oulyanov@rian.kharkov.ua

О гипотезе, позволяющей объяснить природу звезды Пшибыльского (HD 101065)

Многие неидентифицированные линии спектра звезды Пшибыльского (HD 101065) хорошо соответствуют длинам волн радиоактивных элементов, в том числе длинам волн короткоживущих изотопов. Их происхождение в атмосфере звезды остается неясным. В работе описывается сценарий, согласно которому появление некоторых тяжелых ядер радиоактивных элементов в спектре звезды вызвано ее перманентным облучением потоком γ -квантов (фотоядерные реакции) или прямым взаимодействием возникающих в ней свободных нейтронов с зародышевыми ядрами более легких химических элементов (r -процесс). В обоих случаях причиной появления γ -квантов и свободных нейтронов может быть нейтронная звезда, составляющая со звездой Пшибыльского тесную двойную систему и являющаяся источником быстрых электронов и позитронов. При этом γ -кванты возникают в результате тормозного излучения быстрых электронов и позитронов в атмосфере звезды при их взаимодействии с атомными ядрами, входящими в состав атмосферной плазмы, а свободные нейтроны могут возникать в реакциях прямого захвата быстрых электронов атмосферными протонами (ядрами атома водорода).

ПРО ГІПОТЕЗУ, ЯКА ДОЗВОЛЯЄ ПОЯСНИТИ ПРИРОДУ ЗІРКИ ПШИБИЛЬСЬКОГО (HD 101065), Гопка В. Ф., Ульянов О. М., Андриевський С. М. — Багато неідентифікованих ліній спектру зірки Пшибильського (HD 101065) добре відповідають довжинам хвиль радіоактивних елементів, зокрема довжинам хвиль короткоживучих ізотопів. Їхнє походження в атмосфері зірки залишається неясним. В роботі описується сценарій, згідно з яким поява важких ядер деяких радіоактивних елементів в атмосфері зорі Пшибильського викликана перманентним опромінюванням потоком γ -квантів (фотоядерні реакції) або прямою взаємодією нейтронів, що виникають в ній, із зародковими ядрами легших хімічних елементів (r -процес). В обох випадках причиною появи γ -квантів і вільних нейтронів може бути нейтронна зоря, яка разом з зорею Пшибильського складає тісну подвійну систему і є джерелом швидких електронів і позитронів. При цьому γ -кванти виникають у результаті гальмівного випромінювання швидких електронів і позитронів у зоряній

атмосфері при їхній взаємодії з атомними ядрами, які входять до складу атмосферної плазми, а вільні нейтрони можуть виникати у реакціях прямого захвату швидких електронів атмосферними протонами (ядрами атома водню).

ON THE HYPOTHESES TO EXPLAIN THE ORIGIN OF THE PRZYBYLSKI STAR (HD101065), by Gopka V. F., U'ianov O. M., Andrievskii S. M. — Recently it was found that wavelengths of some spectral lines well coincided with those of the radioactive elements with quite short lifetime. The origin of the appearance of short-lived isotopes in the Przybylski star atmosphere remains unclear. We consider the scenario explaining the appearance of heavy nuclei of some radioactive elements in the Przybylski star atmosphere as a result of its permanent irradiation by γ -quanta (photonuclear reactions) or by direct interaction between free neutrons formed there with seed nuclei of lighter elements (so-called r-process). In both cases the cause of the γ -quanta and free neutrons appearance can be a neutron star forming together with the Przybylski star the binary system. The neutron star is a source of fast electrons and positrons. The γ -quanta can appear due to the braking irradiation of the fast electrons and positrons in the stellar atmosphere after their interactions with the atomic nuclei that appear in the atmospheric plasma, while free neutrons can be formed during reactions of the direct capture of fast electrons by atmospheric protons (nuclei of hydrogen).

ВВЕДЕНИЕ

В 1961 г. Пшибыльским была исследована звезда HD 101065 [35], которая впоследствии стала одним из интереснейших объектов среди пекулярных звезд главной последовательности. Проблема отождествления линий в ее спектре до сих пор вызывает активные дискуссии. Звезда уникальна по количеству неотожествленных линий. В попытках объяснить наблюдаемый спектр звезды Пшибыльского (ЗП) высказан ряд гипотез. Звезда Пшибыльского имеет достаточно низкое значение эффективной температуры ($T_{\text{эф}} = 6600$ К), что не свойственно другим Ар-звездам (именно к этому классу химически пекулярных звезд причисляется ЗП). Такая температура соответствует более позднему спектральному классу F, но в атмосфере ЗП обнаруживаются некоторые аномалии элементов, которые присущи горячим магнитным звездам. Видимо по этой причине в каталоге HIPPARCOS [34] она упоминается как звезда спектрального класса В5р.

В 1973 г. Кучовичем [28] была сделана попытка интерпретации спектра звезды Пшибыльского, основанная на предположении о распаде сверхтяжелых радиоактивных элементов с атомными номерами около $Z = 114$. Описанный механизм образования радиоактивных элементов в атмосфере звезды не является единственной попыткой объяснить наблюдаемый спектр ЗП. Сброс материи в двойной системе звезд в результате взрыва одной из них (как Сверхновой) на другую, ставшую вследствие этого пекулярной, был рассмотрен в 1950-х годах. В частности, такой механизм происхождения пекулярности предложен в работе [16].

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЗВЕЗДЫ ПШИБЫЛЬСКОГО И ОСОБЕННОСТИ ЕЕ СПЕКТРА

Малоамплитудные изменения блеска ЗП были открыты в работе [29]. Частотный анализ фотометрических данных показал, что основной период составляет 12.141 мин, а амплитуда переменности блеска и лучевой скорости равны соответственно $\Delta B = 0.012^m$ [30] и $\Delta v = 500$ м/с [33]. Как видно, изменения блеска и лучевой скорости ЗП действительно малы, и в

первом приближении не влияют на профили спектральных линий, степень надежности их отождествления и оценку содержания химических элементов. Сама ЗП является прототипом пульсирующих γ Ar-звезд спектральных классов В8–F. Для холодных быстро вращающихся звезд характерны изменения блеска и магнитного поля в пределах 6–15 мин и изменения амплитуды в пределах $\Delta B = 0.0003\text{—}0.0008^m$ относительно средней кривой В-блеска [31].

По оценкам величины магнитного поля ЗП в разные годы получены разные значения: 0.25 Тл в работе [45], 0.23 Тл в работе [20], 0.15 Тл по линиям Се II и 0.25 Тл по линиям Pr III и Sm II [12], 0.1014 ± 0.0072 Тл [26]. Согласно работе [42] мы наблюдаем околополярную область ЗП.

Необходимо также отметить следующие важные спектральные особенности исследуемой звезды.

1. Большинство линий поглощения в спектре ЗП не принадлежит к группе железа, в то время как она обильна в спектрах звезд с близкими параметрами атмосфер ($T_{\text{эф}} = 6600$ К, $\lg g = 4.2$ [11]). Согласно работе [21] линий поглощения железа очень мало, и долгое время даже оспаривалось их наличие в спектре ЗП [38]. Позже были обнаружены сильные линии железа в УФ-части спектра [43]. В основном идентифицируются линии поглощения лантаноидов [11, 17, 21, 23, 35, 36, 39, 44, 47].

2. Идентифицированы линии радиоактивных элементов прометия и технеция [17, 48]. Определено содержание технеция (3.0–3.5dex [47]). Отметим, что период полураспада прометия всего 17.7 лет.

3. В работах [11, 41] указывается на высокое содержание лития, а в работах [18, 19] — на аномальное соотношение изотопов кальция. В частности, в работе [19] показано, что усилен вклад со стороны нейтронно-избыточного изотопа кальция ^{48}Ca в линию кальция λ 854.2 нм.

4. Идентификация линий радиоактивных элементов [13, 22, 24] вызвала бурную критику, особенно идентификация короткоживущих радиоактивных элементов. Напомним, что списки линий, отождествленных Байдельманом [13] и нами [22, 24], подтвердили наличие линий одних и тех же радиоактивных элементов.

Естественно, что стандартная теория звездной эволюции не может объяснить наличие в атмосфере ЗП радиоактивных элементов с коротким временем полураспада. Если предположить, что именно взрыв близкой к ЗП Сверхновой ответственен за наблюдаемые в ее атмосфере избытки тяжелых элементов, то мы должны наблюдать другие свидетельства этого события. Такие свидетельства на сегодняшний день не получены.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗВЕЗДЫ И ХИМИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ ЗП

Теоретический анализ процессов, в результате которых возможно появление короткоживущих радиоактивных изотопов на поверхности звезды, выполнил впервые Горизели [25, 45]. Вычисления механизма воздействия высокоэнергетических частиц на атмосферное вещество звезды показали, что ряд особенностей химического состава ЗП и других Ar-звезд могут быть объяснены попаданиями высокоэнергетических частиц на звезду. В работе Арнольда и др. [http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0705/0705.4512v1.pdf.] указывается, что эффективность γ -процесса увеличивается с увеличением концентрации электронов в звездном ветре.

Идея возможности протекания ядерных реакций на поверхности звезды не нова. В 1950-х гг. первые работы по исследованию химического состава Ar-звезд показали, что избытки тяжелых элементов в их атмосферах

реально существуют. Так, в монографии [1] сказано: «Годовая работа по измерению спектра звезды α^2 CVn, отождествлению линий, а также по измерению и анализу тысяч эквивалентных ширин привела нас к заключению, что действительно имеет место повышенное содержание тяжелых элементов в атмосфере α^2 CVn... Список элементов с повышенным содержанием наводил нас на мысль, что в этом случае мы имеем дело с ядерными, а не с атомными процессами, и что где-то и каким-то образом в этом участвуют нейтроны». Тем не менее механизм, ответственный за столь необычный процесс обогащения атмосфер некоторых звезд тяжелыми элементами, установлен не был.

Предложенная Горизли модель синтеза радиоактивных элементов за счет попадания высокоэнергетических частиц (протонов и α -частиц) в атмосферу звезды, не уточняет местоположение их источника. Заметим, что не только протоны и α -частицы высокой энергии могут приводить к образованию короткоживущих изотопов. Наличие ультрарелятивистских электронов и позитронов, наличие жестких γ -квантов или космических лучей при взаимодействии со стабильными изотопами способно индуцировать формирование короткоживущих изотопов в верхней атмосфере звезды.

Для реализации такого сценария необходим механизм фотоядерных реакций и/или синтеза нейтронов в реакциях захвата протоном электрона ($p + e^- \rightarrow n + \nu$, где p — протон, e^- — электрон, n — нейтрон, ν — нейтрино). При фотоядерных реакциях требуется, чтобы энергия γ -кванта, возмущающего ядро атома, была больше энергии связи нуклонов в ядре атома $W_{CB} > 5$ МэВ [5, 9]. Можно предположить, что требуемые γ -кванты возникают вследствие тормозного излучения быстрых электронов (позитронов) в верхней атмосфере самой звезды вследствие взаимодействия с ядрами имеющихся там атомов. Спектр энергий частиц, порождающих γ -кванты, должен быть непрерывным и простирается выше указанного порога.

Во втором варианте свободные нейтроны, появляющиеся в атмосфере звезды при воздействии потока быстрых электронов на атмосферную плазму (взаимодействие электронов с протонами), могут захватываться зародышевыми ядрами-мишенями более легких элементов с образованием в конечном счете тяжелых изотопов (γ -процесс), в том числе и радиоактивных.

МОДЕЛИ «ЗВЕЗДА ПШИБЫЛЬСКОГО — НЕЙТРОННАЯ ЗВЕЗДА»

Для объяснения рассмотренных выше аномалий химического состава ЗП мы предлагаем гипотезу, согласно которой ЗП имеет компаньона, который и может служить источником быстрых электронов/позитронов и/или γ -квантов. Такая звезда-компаньон должна быть релятивистским объектом, например нейтронной звездой (НЗ). Принимая модель, в которой имеет место взаимодействие между атмосферой ЗП и частицами, генерируемыми НЗ, мы прежде всего должны объяснить следующие наблюдаемые аномальные характеристики ЗП.

1. Химический состав, сходный с тем, который формируется при протекании γ -процесса для ряда элементов.
2. Высокое содержание лития и его аномальный изотопный состав.
3. Наличие в атмосфере короткоживущего изотопа прометия.
4. Наличие короткоживущих изотопов тяжелее висмута.
5. Вариации блеска и напряженности магнитного поля.

Принципиальным моментом является то, что электроны/позитроны, порождаемые НЗ и выпадающие на поверхность ЗП, должны быть ультрарелятивистскими, чтобы их кинетическая энергия $E \gg m_e c^2$. Наличие

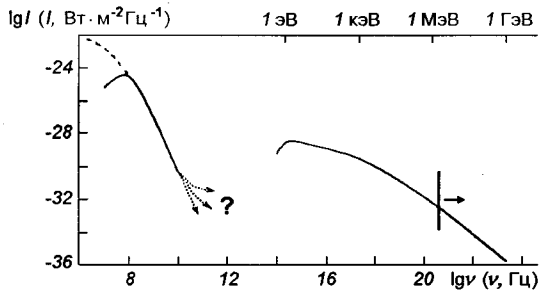


Рис. 1. Спектральная плотность мощности пульсара в Крабовидной туманности от радио- до гамма-диапазона. Линией и стрелочкой обозначена нижняя граница фотоядерного резонанса (по данным диссертации Алексиса Графа ван Хоэнсброэч «Поляризация пульсарного радиоизлучения»)

ультрарелятивистских частиц, взаимодействующих с ядрами атомов, позволяет генерировать γ -кванты с энергиями, превышающими энергию связи нуклонов в ядрах атомов ($E_{\text{св}} \approx 10$ МэВ). В случае «медленных» частиц γ -кванты генерироваться не будут из-за резкого обрезания спектра тормозного излучения на частотах, соответствующих кинетической энергии такой медленной частицы [2, 6] (везде далее для определенности мы будем говорить об электронах).

Оценки показывают, что γ -фактор электронов, необходимый для запуска фотоядерных реакций, должен превышать $\gamma > (10 \text{ МэВ}) / (m_e c^2) \approx 20$. Эта оценка является вполне реалистичной, поскольку по современным представлениям γ -факторы электрон-позитронной плазмы в верхней магнитосфере радиопулсара могут находиться в диапазоне значений 10—1000 [40]. В спектре одного из наиболее изученных пульсаров PSR B0531+21 (пульсар в Крабовидной туманности) наблюдаются γ -кванты в необходимом диапазоне энергий (рис. 1).

С другой стороны, наличие потока электронно-позитронной плазмы способствует также образованию нейтронов из протонов (ядер водорода), имеющих в верхней атмосфере звезды. Это происходит по схеме $p + e^- \rightarrow n + \nu$. Возможными являются также и обратные реакции образования протонов из нейтронов: $n + e^+ \rightarrow p + \nu$. Наличие свободных протонов в атмосферной плазме гарантирует формирование ядер тяжелых элементов, в том числе и короткоживущих, а при непрерывном потоке электронно-позитронной плазмы — и постоянное их пополнение.

В случае тесной двойной системы (именно такие системы и являются наиболее вероятными, что будет показано ниже) уже сама Ар-звезда может служить источником аккреции вещества на поверхность НЗ. В результате аккреции НЗ будет раскручиваться быстрее, соответственно период ее вращения будет уменьшаться, а около нее образуется диск из частиц ветра Ар-звезды. При этом ожидается, что интегральная интенсивность излучения такой НЗ в рентгеновском диапазоне будет иметь заметный вековой рост. По сути такая НЗ должна быть рентгеновским или даже гамма-пульсаром. Таким образом, НЗ может влиять на Ар-звезду за счет своего гамма-излучения и ультрарелятивистских частиц своего ветра. Фактически для «нормальной» звезды ее компаньон (НЗ) является пульсаром, который, однако, не проявляет себя в таком качестве для земного наблюдателя вследствие определенной ориентации осей вращения, магнитного диполя и пространственного положения орбитальной плоскости самой системы.

Весьма вероятно, что даже если в окрестностях Ар-звезды возник (оказался) радиопулсар, то относительно быстро он проэволюционирует в рентгеновский или гамма-пульсар. По данным работы [3] радиопулсар в двойной системе может существовать лишь на начальном этапе. В это время согласно предлагаемому сценарию мощность эжекции электрон-позитрон-

ной плазмы с границы светового цилиндра быстро вращающейся нейтронной звезды должна быть много больше, чем аккреция на нее частиц звездного ветра, выброшенного соседней звездой. Из-за замедления вращения мощность эжекции пульсара падает. Постепенно пульсарный ветер замещается аккрецией звездного ветра от ЗП на пульсар. Характерное время смены эжекции на аккрецию зависит от параметров двойной системы, и по данным [3] примерно равно 10^5 лет.

По оценкам [7, 40] мощности электромагнитного поля радиопулсара не хватает, чтобы преодолеть работу выхода ионов с его поверхности. Поэтому принципиальным моментом является то, что какие-либо ионы или протоны не могут отрываться с поверхности радиопулсара и создавать значимые концентрации в пульсарном ветре, а соответственно и попадать в атмосферу ЗП. Более реалистично ожидать наличия протонов в магнетарном ветре, так как напряженности электромагнитного поля на поверхностях магнетаров минимум на два порядка больше, чем у радиопулсаров [27]. Однако с точки зрения предложенного нами сценария общая картина появления короткоживущих изотопов в верхней ионосфере Ар-звезд не изменится. Заметим, что если ограничиться рассмотрением реалистичного диапазона значений $\gamma = 20-100$, то ветер НЗ не может повлиять на лучевые скорости, наблюдаемые у различных изотопов из-за большой разницы в массах ультрарелятивистского электрона/позитрона и, например, ядра атома водорода или гелия. Однако если в качестве падающего вещества мы будем рассматривать протоны (случай магнетара в качестве компаньона или протоны как компонент космических лучей), то такой ветер уже окажет заметное влияние на лучевые скорости, особенно легких атомов.

В предлагаемом нами сценарии целесообразно выделить две фазы. В первой фазе молодой радиопулсар (причиной его возникновения может быть либо взрыв сверхновой Ib-II типа в окрестностях ЗП, либо случайный захват «беглого» пульсара гравитационным полем ЗП) воздействует на ЗП высокоэнергичной ультрарелятивистской электрон-позитронной плазмой своего ветра. С одной стороны, попадая в верхнюю атмосферу ЗП, такой ветер порождает каскад высокоэнергетичных γ -квантов за счет тормозного излучения. Запускается механизм фотоядерных реакций в верхней атмосфере звезды и, соответственно, в ней появляются короткоживущие изотопы. С другой стороны, благодаря наличию в ветре электронов и позитронов из протонов (ядер водорода), имеющих в изобилии в верхней атмосфере ЗП, образуются нейтроны, наличие последних — одно из необходимых условий нуклеосинтеза на поверхности звезды.

Вторая фаза сценария предполагает перерождение радио-пульсара в рентгеновский, а затем и в γ -пульсар теперь уже за счет доминирования аккреции на НЗ звездного ветра Ар-звезды. Не исключено, что сама материнская НЗ будет источником γ -квантов нужной энергии, что опять же может приводить к появлению короткоживущих изотопов в верхней атмосфере Ар-звезд при попадании в них луча образовавшегося γ -пульсара. Впрочем, обе фазы данного сценария можно рассматривать независимо. Следует упомянуть о том, что недавно появилась теоретическая работа [4], которая поддерживает ту точку зрения, что каждый радиопулсар может одновременно являться источником γ -излучения. Если это предположение подтвердится, то роль звездного ветра в нашей гипотезе уже не будет столь решающей.

Таким образом, именно ранний радиопулсар, или далее гамма-пульсар, воздействуя на соседнюю звезду, приводит к появлению Ар-звезды. Следствием этого сценария будет усиление рентгеновского и гамма-излучения из верхней атмосферы Ар звезды и, вероятно, в области ее ветра.

В рамках предлагаемой гипотезы можно объяснить спектральные и фотометрические изменения, а также вариации напряженности магнитного поля в верхней атмосфере ЗП. Вариации напряженности магнитного поля можно интерпретировать как изменение высоты магнитопаузы над поверхностью ЗП, обусловленные вариациями плотности потока ветра, испускаемого вращающейся нейтронной звездой. При вращении НЗ активная область поворачивается в сторону ЗП, вызывая на ее поверхности кардинальные изменения. Многократное воздействие активной области НЗ разогревает отдельные области звезды, что приводит к появлению областей с повышенной температурой. В итоге мы наблюдаем в спектре звезды линии, характерные для звезд с более высокой температурой.

Двойная система ЗП-НЗ должна быть тесной. В настоящее время наблюдается большой разброс в оценках массы ЗП. В соответствии с зависимостью «масса — светимость» при $T_{\text{эф}} = 6600$ К масса ЗП должна составлять $M_{\text{ЗП}} \approx (2.1 \pm 0.2) M_{\odot}$. В то же время, если принять во внимание, что спектральный класс ЗП оценивается как B5p по пекулярным линиям [34], то принадлежность звезды к этому классу изменяет оценку ее массы до максимальной, которая может составлять $M_{\text{ЗП}} \approx 8 M_{\odot}$ [15].

Будем полагать, что наиболее реалистичные оценки возможных масс ЗП и НЗ составляют $M_{\text{ЗП}} \approx (1.5-8) M_{\odot}$ и $M_{\text{НЗ}} \approx (0.7-1.4) M_{\odot}$. Параболическая скорость в такой системе равна $V_{\text{пар}} = \sqrt{2G(M_{\text{ЗП}} + M_{\text{НЗ}})/R}$, где R — расстояние от центра масс до НЗ. Учитывая, что диапазон характерных скоростей для известных радиопульсаров $V_{\text{НЗ}} \approx 100-500$ км/с, и то обстоятельство, что $V_{\text{НЗ}} \leq V_{\text{пар}}$, получим диапазон параметров, при котором наиболее вероятно существование такой двойной системы. Данный диапазон приведен на рис. 2. Можно видеть, что расстояние, оцененное таким образом, составляет от 0.035 а. е. для минимального значения массы до 1.0 а. е. для максимального. При известном параллаксе 7.95 ± 1.07 мсд [34] можно сразу же оценить расстояние до ЗП ($d = 125.8 \pm 15.7$ пк) и угловые размеры предполагаемой двойной системы (от 0.17 до 14 мсд для минимального и максимального значений массы соответственно). Значение периода вращения НЗ относительно центра масс тесной двойной системы находится в интервале 0.7—260 сут.

Мы полагаем, что НЗ остается компаньоном тесной двойной системы. Взрыв Сверхновой с последующим «убеганием» НЗ из двойной системы не может объяснить длительного пребывания короткоживущих изотопов в атмосфере ЗП. Так как скорости расширения оболочек сверхновых звезд составляют тысячи км/с, даже при условии сильного торможения такой оболочки ветром ЗП время взаимодействия ее с атмосферой ЗП является весьма ограниченным по космическим масштабам.

В настоящее время мы не видим кинематических проявлений ЗП как двойной системы. Это можно объяснить тем, что орбита рассматриваемой системы находится близко к картинной плоскости. Второй факт, который следует принимать во внимание, связан с относительно большой возможной разницей в массах ЗП и НЗ. Отношение их масс может достигать до 10 [15]. Тогда положение Ар-звезды просто определяет центр масс системы.

На рис. 3 дано схематическое изображение предполагаемой модели. Исследование профиля линии лития показало, что мы наблюдаем действительно полусферу звезды практически с полюса [42]. Возможны варианты, когда мы не можем зафиксировать ранний радиопульсар ввиду недостаточной интенсивности излучения или из-за того, что Земля не попадает в диаграмму направленности излучения пульсара. Но все же более реально выглядит сценарий с НЗ при отсутствии у нее импульсного радиоизлучения.

Рис. 2. Ограничения параметров в тесной двойной системе ЗП-НЗ (здесь $T_{\text{орб}}$ — орбитальный период, $R_{\text{орб}}$ — расстояние от НЗ до центра тяжести системы). Семейства кривых рассчитаны для разных значений отношения массы пульсара к массе Солнца: от 1.3 (сплошная кривая) до 0.3 (пунктирная). Приведенные значения $R_{\text{орб}}$ соответствуют точкам пересечения тонкой кривой с параболическими скоростями, соответствующими заданному орбитальному периоду и массе звезды. Видно, что звезда с относительной массой меньше 9 не может удержать НЗ, имеющую скорость 100 км/с, на расстояниях больше 1 а. е. Диапазон возможных параметров двойной системы для разных $T_{\text{орб}}$ указан стрелками

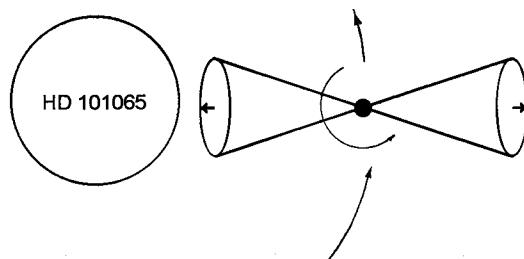
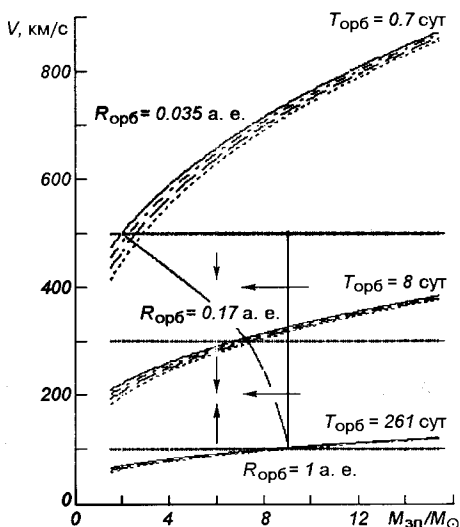


Рис. 3. Тесная двойная система звезда Пшибыльского — нейтронная звезда (пульсар). Орбита НЗ находится в картинной плоскости, а конус открытых силовых линий магнитного поля не проецируется на Землю. Ось вращения ЗП направлена практически вдоль луча зрения

Оценим энергетические потери НЗ (предполагаемого компаньона ЗП) и сопоставим их с интенсивностью бомбардировки ЗП. Мы будем исходить из того, что вначале НЗ была радиопульсаром. Усредняя энергетические потери всех пульсаров, приведенных в каталоге ATNF [<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>], можно полагать, что потери «среднего» радиопульсара должны составлять $8.43 \cdot 10^{28}$ Дж/с (рис. 4). Эти потери распределяются между излучением и кинетической энергией электрон-позитронной плазмы, образующей пульсарный ветер. Положим, что обе составляющие потерь приблизительно одинаковы. Далее рассмотрим такую конфигурацию тесной двойной системы, при которой на ЗП рассеивается минимальная энергия пульсарного ветра ($R = 1.0$ а. е.).

Полагая, что $E = 4\pi\sigma R^2 T_{\text{эф}}^4$ (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: $1300 \text{ К} \leq T_{\text{эф}} \leq 3000 \text{ К}$. Нижняя и верхняя оценки соответствуют средним энергетическим потерям всех пульсаров и средним энергетическим потерям молодых (high energy) пульсаров соответственно. В нашем сценарии такой дополнительный нагрев ЗП будет анизотропным, так как электрон-позитронная плазма будет более

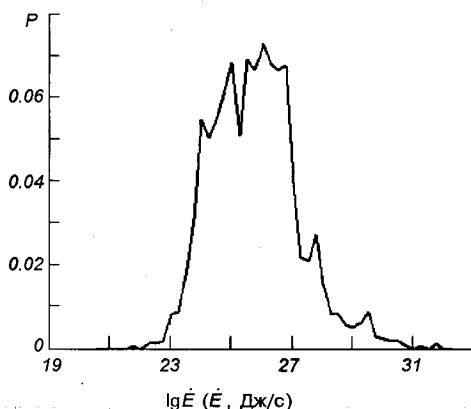


Рис. 4. Распределение относительного количества пульсаров из каталога ATNF по энергетическим потерям (общее количество пульсаров в каталоге равно 1627)

интенсивно выпадать в области повышенной напряженности магнитного поля ЗП на полусфере, обращенной к НЗ. Таким образом, некоторые локальные пятна в верхней атмосфере ЗП могут нагреваться еще больше, чем приведено в наших оценках.

Согласно предложенному сценарию объясняется и аномальное соотношение изотопов кальция и других изотопов в спектрах магнитных звезд за счет образования нейтроноизбыточных изотопов. Например, в процентном содержании кальция 96.94 % составляет изотоп, у которого 20 нейтронов. На долю стабильных изотопов кальция, содержащих 22, 23, 24, 26, 28 нейтронов, приходится только 0.06 % [8]. Радиоактивные изотопы кальция, содержащие 21, 25, 27, 28 нейтронов распадаются соответственно с периодами полураспада $1.4 \cdot 10^5$ лет, 164 сут, 4.54 сут, $2 \cdot 10^{16}$ лет [8]. Можно ожидать, что наличие нейтроноизбыточных изотопов в верхней атмосфере ЗП связано с интенсивным образованием нейтронов. Первичным материалом для образования нейтронов являются ядра водорода (протоны) и ультрарелятивистские электроны, поставляемые НЗ.

Локальные температурные неоднородности на поверхности ЗП (а именно области более высокой температуры), которые образуются под воздействием НЗ, могут быть причиной появления линий двукратно ионизированных лантаноидов в спектре ЗП, что в отсутствие таких горячих областей потребовало бы предположения о слишком высоком значении эффективной температуры этой звезды.

В рамках этой же гипотезы можно предположить, что вариации магнитного поля звезды обязаны сильному воздействию ветра или потока γ -излучения НЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предлагается сценарий, позволяющий объяснить наблюдаемые аномалии химического состава звезды Пшибыльского. Этот сценарий аналогичен сценарию [32], объясняющему природу бариевых звезд. Он основан на предположении о воздействии на ее атмосферу со стороны нейтронной звезды, с которой звезда Пшибыльского образует тесную систему. Согласно этому сценарию на поверхности звезды Пшибыльского непрерывно протекают ядерные реакции, инициированные потоком быстрых электронов и позитронов, выбрасываемых соседней нейтронной звездой. С одной стороны, это могут быть фотоядерные реакции с участием γ -квантов, образующихся при торможении эжектируемых нейтронной звездой частиц в поле атомных ядер атмосферной плазмы. С другой стороны — это захват ядрами-мишенями

ми более легких элементов свободных нейтронов, которые образуются в атмосфере звезды Пшибыльского путем взаимодействия быстрых электронов с протонами (ядрами атома водорода) ее атмосферы. В результате этих процессов в атмосфере появляются ядра тяжелых элементов, в том числе и ядра короткоживущих изотопов. Именно идентификация линий таких короткоживущих изотопов в спектре уникальной звезды Пшибыльского и сыграла решающую роль в построении данной модели.

Авторы благодарны исследовательскому фонду Национального университета Чонбук (Корея), лично доктору Чулхи Киму за поддержку данной работы, а также В. В. Илюшину и В. В. Захаренко за консультации.

1. Бербидж Е. М., Бербидж Дж. Р. Нуклеосинтез в Галактиках // *Ядерная астрофизика* / Под ред. Ч. Барнса, Д. Клейтона, Д. Шрама. — М.: Мир, 1986.—С. 24—32.
2. Гинзбург В. Л. Теоретическая физика и астрофизика. — М.: Наука, 1987.—487 с.
3. Дорошкевич А. Г., Ефремов Ю. А., Засов А. В. и др. Происхождение и эволюция галактик и звезд. — М.: Наука, 1976.—408 с.
4. Конторович В. М., Фланчик А. Б. О связи гамма излучения и радиоизлучения в пульсарах // *Письма в ЖЭТФ*.—2007.—85, № 6.—С. 323—327.
5. Кузмичев В. Е. Законы и формулы физики. — Киев: Наук. думка, 1989.—861 с.
6. Ленг К. Астрофизические формулы. — М.: Мир, 1978.—Т. 1.—448 с.
7. Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары. — М.: Мир, 1980.—292 с.
8. Радциг А. А., Смирнов Б. М. Параметры атомов и ионов. — М.: Атомиздат, 1986.—75 с.
9. Френкель Я. И. Принципы теории атомных ядер. — М.: Изд-во АН СССР, 1950.—294 с.
10. Хохлова В. Л. Магнитные звезды // *Итоги науки и техники / ВИНТИ. Астрономия*.—1983.—24.—С. 233—289.
11. Шаврина А. В., Полосухина Н. С., Павленко Я. В. и др. Особенности спектра уникальной γ звезды HD 101065 в области резонансного дублета лития 6708 Å // *Астрон. журн.*—2003.—80, № 7.—С. 538—544.
12. Шаврина А. В., Халак В. Р., Михайлицкая Н. Г., Полосухина Н. С. Учет магнитного расщепления линий при определении содержания лития в атмосфере γ -звезды HD1010165 // *Кинематика и физика небес. тел.*—2004.—20, № 1.—С. 43—52.
13. Bidelman W. P. Tc and other unstable elements in Przybylski's star // *ASP Conf. Ser.*—2005.—336.—P. 309—311.
14. Bidelman W. P., Keenan P. C. The Ba II-stars // *Astrophys. J.*—1951.—114, N 1.—P. 473—476.
15. Briquet M., Hubrig S., De Cat P., et al. On the co-existence of chemically peculiar Bp stars, slowly pulsating B stars and constant B stars in the same part of the H-R diagram // *Astron. and Astrophys.*—2007.—466, N 1.—P. 269—276.
16. Burbidge G. R. On the anomalous element abundances of magnetic stars // *Stellar and Solar Magnetic Fields: Proc. IUA-1965 Symp. N 22.* — Munchen, 1965.—P. 418—419.
17. Cowley C. R., Bidelman W. P., Hubrig S., et al. On the possible presence of promethium in the spectra of HD 101065 (Przybylski's star) and HD 965 // *Astron. and Astrophys.*—2004.—419, N 3.—P. 1087—1093.
18. Cowley C. R., Hubrig S. The calculation isotopic anomaly in magnetic CP stars // *Astron. and Astrophys.*—2005.—432, N 1.—P. 21—24.
19. Cowley C. R., Hubrig S., Castelli F., et al. Heavy calcium in CP stars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—377, N 4.—P. 1579—1587.
20. Cowley C. R., Mathys G. Line identifications and preliminary abundances from the red spectrum of HD101065 (Przybylski's star) // *Astron. and Astrophys.*—1998.—339, N 1.—P. 165—169.
21. Cowley C. R., Ryabchikova T., Kupka F., et al. Abundances in Przybylski's star // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2000.—317, N 1.—P. 299—309.
22. Gopka V., Yushchenko A., Goriely S., et al. Radioactive elements in stellar atmospheres // *International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2005: New Horizon of Nuclear Astrophysics and Cosmology: AIP Conf. proc.; Tokyo, Japan, 8—11 November, 2005.*—843.—P. 389—391.
23. Gopka V., Yushchenko A., Musaev F., et al. Stellar abundance patterns. What is the possible level of completeness today? // *IAUS.*—2003.—210.—P. E5.—(Proc. 210th Symp. of IAU held at Uppsala University (Uppsala, Sweden, 17—21 June, 2002) / Eds N. Peskunov, W. W. Weiss, D. F. D. Gray).
24. Gopka V., Yushchenko A., Shavrina A., et al. On the radioactive shells in peculiar main sequence stars: the phenomenon of Przybylski's star // *The A-Star Puzzle: IAU Symp. Poprad, Slovakia.*—2004.—224.—P. 119—127.

25. Goriely S. Nucleosynthesis by accelerated particle to account for the surface composition of HD101065 // *Astron. and Astrophys.*—2007.—466, N 2.—P. 619—626.
26. Hubrig S, Kurtz D. W., Banulo S., et al. Measurements of magnetic fields over the pulsation cycle in six roAp stars with FORS 1 at the VLT // *Astron. and Astrophys.*—2004.—415, N 1.—P. 661—669.
27. Kouveliotou C., Strohmayer T., Hurley K., et al. Discovery of a magnetar associated with the Soft GAMMA Repeater SGR 1900+14 // *Astrophys. J.*—1999.—510, N 2.—P. L115—L118.
28. Kuchowicz B. The peculiar stars and the origin of the heaviest chemical elements // *Quart. J. Roy. Astron. Soc.*—1973.—14, N 2.—P. 21—140.
29. Kurtz D. W. 12.15 Minute light variations in Przybylski's star, HD101065 // *Inform. var. stars.*—1978.—N 1436.—P. 1—2.
30. Kurtz D. W., Wegner G. The nature of Przybylski's star: An Ap star model infrared from the light variations and temperature // *Astrophys. J.*—1979.—232.—P. 510—519.
31. Martinez P., Kurtz D. W. Observations of pulsating Ap-stars in South Africa // *Astrophys. and Space Sci.*—1995.—230, N 1-2.—P. 29—39.
32. McClure R. D., Fletcher J. M., Nemeč J. M. The binary nature of the barium star // *Astrophys. J.*—1980.—238, N 2.—P. 35—38.
33. Mkrtichian D. E., Hatzes A. P. HD101065, the most peculiar star: high resolution spectroscopic results // *J. Astrophys. and Astron.*—2005.—26.—P. 185—191.
34. Perryman M. A. C., Lindegren L., Kovalevsky J., et al. The Hipparcos Catalogue // *Astron. and Astrophys.*—1997.—323, N 1.—P. L49—L52.
35. Przybylski A. A G0 Star with High Metal Content // *Nature.*—1961.—189, N 4766.—P. 739.
36. Przybylski A. Line of Holmium in the spectrum of HD 101065 // *Acta astron.*—1963.—13, N 4.—P. 217—228.
37. Przybylski A. Can the peculiarities of the HD 101065 be explained by fission of transuranium elements // *Proc. Astron. Soc. Austral.*—1975.—2.—P. 352—353.
38. Przybylski A. Is iron present in the atmosphere of HD 101065? // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1977.—178, N 1.—P. 71—84.
39. Przybylski A., Kennedy M. The spectrum of HD 101065 // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1963.—75, N 445.—P. 349—354.
40. Ruderman M. A., Sutherland P. G. Theory of pulsars: gaps, sparks, and coherent microwave radiation // *Astrophys. J.*—1975.—196, N 1.—P. 51—72.
41. Shavrina A. V., Polosukhina N. S., Khan S., et al. Lithium and $\text{Li}^6 - \text{Li}^7$ isotope ratio in the atmospheres of some sharp-lines roAp stars // *Astron. Rept.*—2006.—50, N 6.—P. 500—511.
42. 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. Rept.*—2000.—44.—P. 235—245.
43. Wegner G., Cummis D. J., Byrne P. B., Stickland D. J. Element identification in the ultraviolet spectrum of HD 101065 // *Astrophys. J.*—1983.—272, N 1.—P. 649—659.
44. Wegner G., Petford A. D. Abundance analysis of Przybylski's star (HD 101065) // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1974.—168, N 3.—P. 557—575.
45. Wolf S. C., Hagen W. The magnetic field of HD 101065 // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1976.—88.—P. 119—121.
46. 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 // *Nuclei in Cosmos. IX: Proc. Science, International Symp. on Nuclear Astrophysics, CERN, Switzerland, 25—30 June, 2006.* — P. 198—204.
47. Yushchenko A., Gopka V., Kim Chulhee, et al. Chemical abundances patterns for sharp-lined stars // *J. Korean Astron. Soc.*—2002.—35.—P. 209—220.

Поступила в редакцию 09.01.07