Be-ФЕНОМЕН

А. Е. Тарасов

НИИ Крымская астрофизическая обсерватория, 48409 АР Крым, п. Научный
e-mail: tarasov@crao.crimea.ua

Приведен краткий обзор состояния проблемы физики Be-звезд. Современные интерферометрические наблюдения позволяют измерять размеры звездных дисков у B- и Be-звезд и их деформацию, вызванную быстрым вращением. Кратко рассмотрены вопросы связи быстрого вращения и Be-феномена. Анализируются также дополнительные факторы, связанные с активностью Be-звезд, а именно – нерадиальные колебания и магнитные поля. Более детально описаны различные типы массивных двойных систем с Be-компонентом, такие как классические алголи, серпентиды, системы с рентгеновскими пульсарами и голубыми субкарликами. Рассмотрен вопрос об эволюционном статусе Be-звезд.

ВВЕДЕНИЕ

Be-звезды относятся к нормальным карликам или гигантам спектрального класса B, в спектрах которых наблюдается или когда-либо наблюдалась эмиссия в линиях бальмеровской серии водорода или хотя бы в одной из них, обычно это линия H_α. Иногда, чаще у Be-звезд ранних спектральных типов, эмиссия также присутствует в линиях He I и ионизированных металлов. Первая Be-звезда γ Cas была обнаружена 23 августа 1866 г. падре Анжело Сеччи (Angelo Secchi), директором Римской Коллегии [45].

Струве [49] первым связал формирование эмиссии у Be-звезд с протяженной оболочкой, в которой газ ионизируется ультрафиолетовым излучением звезды. Обычно оболочка Be-звезды рассматривалась в виде тонкого экваториального диска. Современные интерферометрические наблюдения ряда Be-звезд подтверждают эту гипотезу [40, 52]. В настоящее время Be-звезды представляются нормальными B-звездами с выше средней скоростью вращения, которые, вследствие пока еще не до конца ясных причин, инжектируют вещество звезды в тонкий, относительно плотный и холодный, с низкими скоростями радиальных движений экваториальный диск. Излучение от диска наблюдается не только в эмиссионных линиях, но и проявляется в виде инфракрасного избытка и собственной линейной поляризации объектов.

Кроме относительно холодного газового диска, в полярных областях Be-звезд присутствует ускоряемый излучением, высокоскоростной звездный ветер низкой плотности и высокой температуры. Он проявляется в виде широких профилей P Cyg ультрафиолетовых резонансных линий элементов высокой степени ионизации (III – V).

ВРАЩЕНИЕ Be-ЗВЕЗД

Наиважнейшей характеристикой Be-звезд является их быстрое вращение, настолько значительное, как ни у какого иного класса невырожденных звезд. Как только это стало понятно, возникла гипотеза, что их экваториальная скорость может быть достаточно близка к критической скорости вращения, так что фотосферы Be-звезд истекают в диск [49]. Действительно, Be-звезды, в среднем, вращаются быстрее, чем B-звезды того же спектрального класса, однако считается, что скорости их вращения, тем не менее, существенно не достигают критического значения. По разным оценкам, они составляют 0.70 – 0.88 от критической [10, 19].

Если вращение действительно играет ключевую роль в формировании Be-феномена, то, вероятно, оно прежде всего уменьшает эффективную силу тяжести на экваторе, что и позволяет атмосфере звезды частично уходить в диск. Однако, для того, чтобы происходило истечение со скоростями меньше звуковых, вращение должно быть намного ближе к критической величине, а именно, 0.95 от критического значения [37].

Вопрос о величине близости скоростей вращения Be-звезд к критической остается открытым, так как вследствие значительной деформации звезды возникает температурный градиент, который, с одной стороны, маскирует реальное положение звезды на диаграмме Герцшпрунга–Рессела, а с другой, применяемый метод определения скорости вращения звезд по полуширинам спектральных линий мало или вовсе не чувствителен при определении скоростей более 0.7 от критического значения [53].

Относительная частота встречаемости Be-звезд в плоскости Галактики, в зависимости от спектрального класса, постепенно увеличивается, начиная от спектральных классов O8 – O9, достигая максимального значения в 15% для B1, и затем плавно спадает, простираясь вплоть до спектральных классов B8 – B9 [57]. Исследование скоростей вращения Be-звезд указывает на то, что звезды более поздних спектральных классов показывают, в среднем, скорости существенно более близкие к критическим, чем ранние B-звезды. Обе эти зависимости, в распределении частоты встречаемости Be-звезд и их относительных скоростей вращения, можно объяснить механизмом ускорения звездного ветра ультрафиолетовым излучением от звезды. Действительно, ветер у звезд, более ранних чем B1, существенно выше и достаточно эффективно разрушает относительно холодный диск. В то же время, для звезд, более поздних чем B1, радиус ионизации H I постепенно сокращается, и для необходимой потери массы звездой она должна вращаться со скоростью, более близкой к критической. Таких объектов мало, что и определяет постепенный спад относительного содержания Be-звезд [5].

Измеренные скорости вращения отдельных Be-звезд достигают значений в 450 км/с, что приводит к периодам их вращения от 0.6 дня. Современные интерферометрические наблюдения B- и Be-звезд позволяют определять форму объектов, деформированных быстрым вращением. Так в работах [6, 14, 32] получены формы дисков для известных быстровращающихся B- и Be-звезд Альтаира, αЕридана и Регула.

Таким образом, только быстрого вращения, скорее всего, недостаточно для потери массы звездой. Нужны дополнительные механизмы, причем эти механизмы должны быть неустойчивыми, т. е. приводить к быстрому, на временных интервалах дни – месяцы (переход из B- в Be-фазу), сбросу малой части внешних слоев звезды и формировать диск вокруг звезды. Обычно рассматривается два таких дополнительных фактора: нерадиальные колебания фотосфер B-звезд и магнитные поля, глобальные и/или локальные.

МОДЕЛЬ ДИСКА Be-ЗВЕЗДЫ

В настоящее время, общепризнанной моделью формирования диска вокруг Be-звезды является модель Бьеркмана–Кассинелли [7]. В данной модели ответственным за формирование диска является вращающийся звездный ветер от звезды. Так как в случае Be-звезд, ускорение ветра наружу мало по сравнению с вращением, ветер с обоих полушарий звезды движется к экватору. После прохождения 1/4 орбиты эти две составляющие ветра сталкиваются на экваторе. В результате столкновения возникает пара ударных фронтов (над и под экватором), и вследствие процессов радиативного охлаждения, формируется плотный, относительно холодный диск с плотностью $\rho_{eq}/\rho_{pole} \sim 100$. Таким образом, в данной модели формирование диска происходит не в результате истечения вещества с экватора звезды, а вследствие перераспределение ветра по долготе так, что плотность ветра на полюсе понижается и, наоборот, увеличивается на экваторе.

Результаты поляриметрических и интерферометрических наблюдений в видимой области спектра указывают на то, что движения газа в диске Be-звезды близко к кеплеровскому [40]. Более того, диски представляют собой не некий вытянутый эллипс, как предполагалось ранее, а тонкий диск с углом раствора всего 3°, что находится в хорошем согласии со шкалой высот кеплеровского диска. Спектральные наблюдения высокого разрешения, выполненные в ряде работ для оптически тонких линий Fe II, также указывают на близкие к кеплеровским движения газа в диске [21, 22].

НЕРАДИАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ФОТОСФЕР Be-ЗВЕЗД

Переменность профилей фотосферных линий у Be-звезд на временных интервалах в несколько часов хорошо известна и активно изучается, начиная с их обнаружения [55]. Благодаря прогрессу в теоретических расчетах пульсационной неустойчивости у массивных горячих звезд [15], стало ясно, что у звезд, попадающих в полосу нестабильности объектов типа β Cep, наблюдаются нерадиальные пульсации. К этой группе также относятся медленно пульсирующие звезды типа 53 Per и Be-звезды, занимающие более обширную область на диаграмме Герцшпрунга–Рессела. В случае Be-звезд, нерадиальные колебания или их нестабильность во времени может быть связана с возникновением Be-феномена. На основе расчетов пульсационной неустойчивости, в работе [36] (современное состояние проблемы [54]) показано, что нерадиальные колебания звезд могут переносить угловой момент из недр звезды наружу, в основном в экваториальные области звезды. Таким образом, нерадиальные колебания могут способствовать формированию дисков у Be-звезд.

Современные спектральные наблюдения указывают на то, что Be-звезды имеют тенденцию пульсировать на низких модах с $l = m = 2$. Периоды таких пульсаций составляют несколько часов и сопоставимы как с периодом вращения звезды, так и с длиной земных суток, что вносит заметные трудности в процесс их идентификации и исследование нестабильности. Чтобы обойти часть этих проблем,

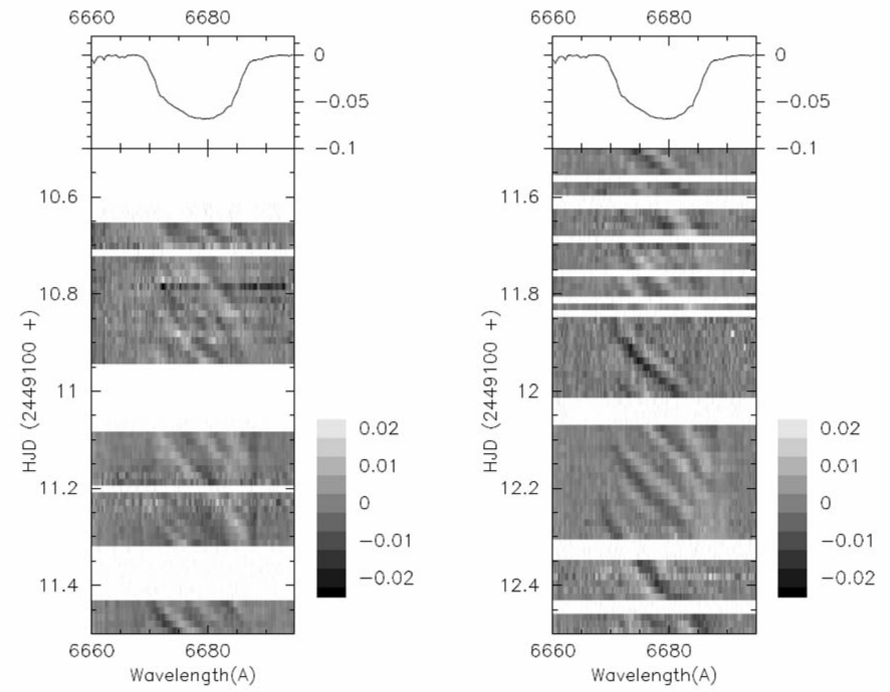


Рис. 1. Уклонения индивидуальных профилей линии He I λ 6678 от среднего профиля для Be-звезды ζ Oph в течение нескольких ночей непрерывных наблюдений [29]. Движущиеся структуры по профилю линии связаны с нерадиальными колебаниями звезды на нескольких модах

был выполнен ряд непрерывных (в течение недели и более) спектральных наблюдений, в том числе и с участием сотрудников КрАО, для ряда наиболее типичных по пульсационным свойствам объектов.

На рис. 1 представлены результаты патрульных наблюдений для известной Be-звезды спектрального типа O9.5 III со значительными по амплитуде нерадиальными колебаниями. Спектры получены в области линии He I λ 6678 [29]. Как видно из рисунка и анализа переменности отдельных деталей профиля линии, звезда нерадиально пульсирует, как минимум, с тремя периодами 2.02, 3.34 и 2.43 часа.

Другой звездой этой же программы изучения колебаний Be-звезд, была избрана активная Be-звезда EW Lac, имеющая протяженный и плотный диск. Для данного объекта в течение восьми суток непрерывных наблюдений выявлены нерадиальные пульсации с периодом 0.6 дня и модой, соответствующей $l = m = 2$. Кроме того, зарегистрированы эпизодические выбросы вещества из фотосферы звезды, более того, диск вокруг звезды оказался в значительной степени неоднородным, на что указывает ряд прохождений уплотнений в оболочке по диску звезды [18].

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ Be-ЗВЕЗД

Известно, что некоторые типы B-звезд имеют упорядоченные (дипольные или квадрупольные) магнитные поля. Вначале поля были обнаружены у звезд He-weak и He-strong – объектов, демонстрирующих заметные аномалии химического состава их атмосфер [8, 9]. Отсутствие заметных аномалий химического состава у большинства B- и Be-звезд как будто бы указывало на то, что значительные магнитные поля у этих звезд наблюдаются крайне редко. Однако, обнаружение магнитного поля напряженностью 300 Гс у β Cep [26], которая одновременно является и Be-звездой, и у классической Be-звезды ω Ori, так же как и обнаружение магнитных полей у трех из 16 Be-звезд в работе [28] и у двух в [47], указывают на то, что магнитные поля у B- и Be-звезд – достаточно распространенное явление. Более того, они способны активно участвовать в формировании, наряду с быстрым вращением, Be-феномена, так и формировать структуру околозвездного диска.

Be-ЗВЕЗДЫ В ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ

Альтернативная гипотеза, объясняющая происхождения Be-феномена, была предложена в 70-х годах прошлого века Кржижем и Гарманцем [30]. Согласно ей, все Be-звезды являются двойными системами, а наблюдаемая эмиссия в спектре возникает в аккреционном диске звезды, состоящем из вещества, поставляемого звездой-донором. Данная гипотеза основывалась на том факте, что у большинства массивных взаимодействующих двойных систем светимость звезды-донора значительно уступает светимости принимающего массу Ве-компонента так, что даже на спектрах высокого разрешения его следы, особенно на фоне большого количества эмиссионных линий, сложно обнаружить. Исследования, в основном чешских астрономов, выполненные для большого количества пекулярных Ве-звезд, позволили выявить десятки двойных систем с Ве-компонентом, находящихся в фазе активного обмена массой [24].

Известно, что большинство классических взаимодействующих двойных умеренных масс имеют в своем составе Ве-звезду. Последующая эволюция таких систем генерирует несколько типов систем с первичным Ве-компонентом и компактным, проэволюционировавшим компаньоном: маломассивной черной дырой, нейтронной звездой или голубым субкарликом. Поэтому, очевидно, что для понимания последующей эволюции Ве-звезд и двойных систем в целом, необходимо знать детали первого обмена массой.

Вследствие переноса массы и углового момента, в массивной двойной системе появляется Ве-звезда, как только более массивный компонент пары покидает главную последовательность. Возникает существенное различие в эволюционном статусе компонентов, даже если их массы остаются достаточно близкими. Менее массивный компонент становится аккрецирующей Ве-звездой, в то время как первичный компонент системы уходит в область холодных гигантов или сверхгигантов.

Если посмотреть на выборку массивных взаимодействующих систем с Ве-компонентами, взяв за основу величину орбитального периода, то проще всего разделить их на две большие группы. В первую группу входят многочисленные короткопериодические (2–7 дня) "классические алголи". В спектрах большинства из них преобладают линии более яркого позднего B- или раннего A-компонентов, часто имеют следы вторичного компонента – гиганта позднего спектрального класса и слабовыраженную эмиссию в линии H_α. Вторая, существенно менее многочисленная группа, состоит из более массивных двойных систем с широким диапазоном орбитальных периодов от 6–7 дней до нескольких сотен дней. В их спектрах присутствуют яркие водородные эмиссии, эмиссионные или абсорбционные, но образующиеся в оболочке, линии He I и, часто, богатый набор оболочечных линий однажды ионизированных металлов [38]. Если спектральная переменность классических алголей достаточно хорошо изучена (см., например, [4, 43]), то более массивные системы с активным обменом массой, Плавец назвал их по имени прототипа W Serpentis – Серпентидами [39], в силу ряда объективных причин, все еще остаются достаточно слабо изученными объектами.

Большинство систем этого типа имеют близкие светимости для звезды, теряющей массу, звезды, получающей ее, и оболочки, окружающей как одну из звезд, так и всю систему в целом. Ситуация усугубляется еще и тем, что часто невозможно найти следы фотосферных линий ни одного из компонентов. Поэтому, даже определение основных параметров орбиты подобных систем часто является непростой задачей. Так только, сравнительно недавно, были найдены фотосферные линии компонентов у таких известных массивных двойных как β Lyr [2, 23] и KX And [3, 17].

На рис. 2 представлены профили в области линий H_α и He I $\lambda\,6678$ у наиболее изученных звезд типа W Ser. Как видно из рисунка, эмиссионный контур линии H_α у данного типа звезд имеет значительную интенсивность и, как правило, двухкомпонентную или же структуру P Cyg. Форма профиля тесно связана с углом наклона системы к наблюдателю так, что системы с двухкомпонентным эмиссионным профилем обычно видны с ребра и являются затменными [51]. Интерферометрические наблюдения, недавно выполненные для одной из наиболее известных звезд этого типа – β Lyr [56], полностью подтверждают полученные ранее результаты фотометрических, спектральных и поляриметрических наблюдений. Как видно из рис. 3, профили линии He I $\lambda\,6678$ часто имеют значительные отличия от эмиссии в линии H_α. Так что для незатменных звезд этого типа обычно наблюдается абсорбционный профиль, сдвинутый на значительную (100–300 км/с) величину в синюю область от нормального значения, что указывает на его образование в оболочке системы. Возможно, у таких систем мы видим только один из компонентов горячего ветра, истекающего из полюсов Ве-компонента, тогда как эмиссионная составляющая профиля P Cyg экранируется протяженным аккреционным диском [51].

Ве-КОМПОНЕНТЫ В СОСТАВЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ

Рентгеновские двойные системы с Ве-компонентом являются наибольшим по численности подклассом массивных рентгеновских двойных. В настоящее время известно более 100 подобных систем, в состав которых входит нейтронная звезда. Отличительной чертой таких двойных являются относительно долгопериодические орбиты с заметным, часто большим, эксцентриситетом. Вспышки рентгеновского излучения обычно связаны с прохождением нейтронной звезды сквозь диск Ве-компонента. Оптические компоненты таких двойных имеют типичные для B-звезд характеристики, обладают значительной скоростью вращения и, по крайней мере, у некоторые из них наблюдается незначительный избыток гелия в атмосферах [31]. Ве-компоненты в этих системах отличаются значительной активностью как в

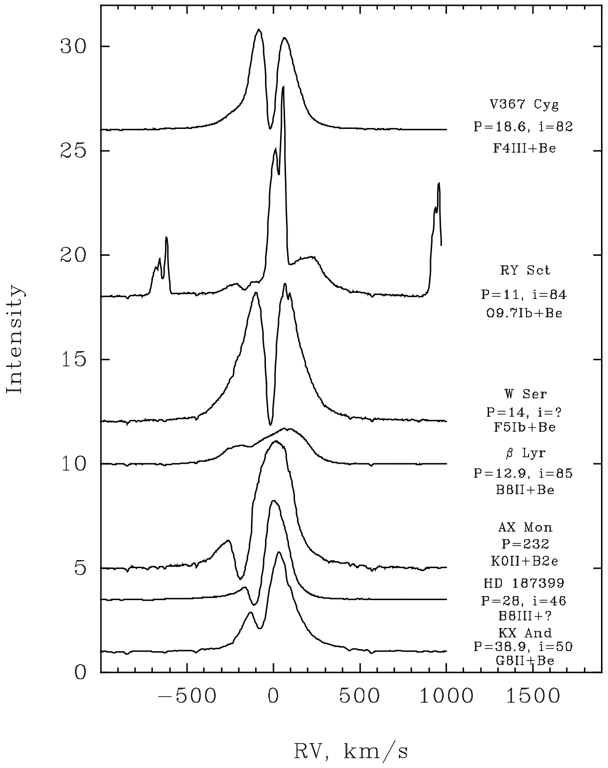


Рис. 2. Профили линии H_α у массивных взаимодействующих двойных типа W Serpentis

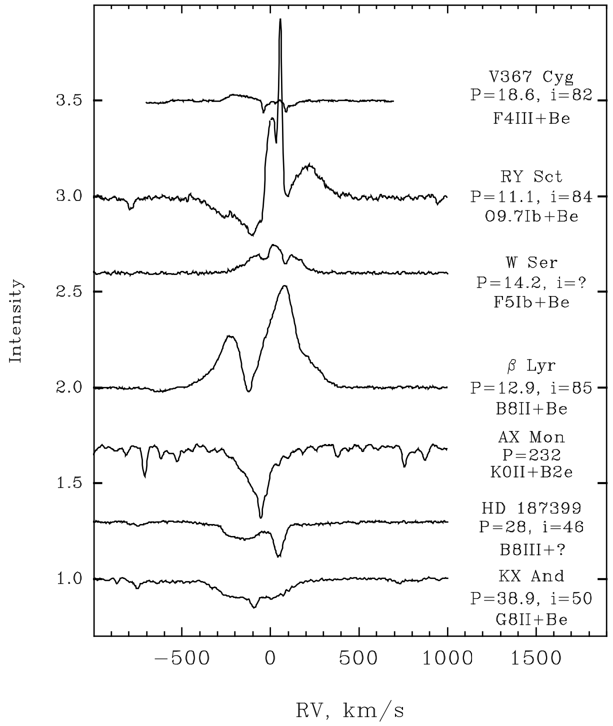


Рис. 3. Профили линии He I λ 6678 у массивных взаимодействующих двойных типа W Serpentis

переменности интенсивности эмиссионного спектра и частыми переходами из B- в Be-фазу и наоборот, так и переменностью профилей эмиссионных линий.

В течение многих лет в КрАО проводился спектральный мониторинг ряда массивных рентгеновских двойных с Be-компонентами, таких как X Per [12], HDE 245770 (A0535+26) [11], LSI $+61°235$ [42] и ряда других. На рис. 4 и 5 представлен такой мониторинг в эмиссионной линии H_α для X Per, состоящей из Be-звезды спектрального класса B1 IVe и нейтронной звезды с периодом осевого вращения 835 с, орбитальным периодом 250.3 дня и эксцентриситетом орбиты 0.11 [13].

Данные рис. 4 и 5 наглядно демонстрируют нестабильность диска, формирующегося вокруг Be-компонента, такую как частые переходы типа B – Be – B и сложную, переменную во времени структуру эмиссионных профилей, вероятно связанную с возмущениями, вызванными движением по эллиптической орбите релятивистского компонента. Результаты трехмерного моделирования вязких дисков вокруг Be-звезд, возмущенных движением релятивистского компонента, находящегося на эллиптической орбите, во многом объясняют столь сложную переменность профилей эмиссионных линий [35].

ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ Be + ГОРЯЧИЙ СУБКАРЛИК

Последняя, наименее изученная группа массивных двойных звезд с Be-компонентами включает в себя системы, у которых вторичным компонентом является проэволюционировавший голубой субкарлик или, возможно, белый карлик. Современные расчеты эволюции массивных двойных систем предсказывают значительное их количество [41]. В настоящее время известно всего несколько таких систем, например ϕ Per [20], 59 Cyg [44, 50] и γ Cas [25]. Не случайно эти звезды являются яркими, изучаемыми в течение десятилетий Be-звездами, у которых только сравнительно недавно обнаружены маломассивные вторичные компоненты. Действительно, разница масс компонентов весьма значительна (10:1), а профили линий у Be-звезд всех этих систем расширены вращением на величину более 300 км/с (59 Cyg, $V\sin(i) = 450$ км/с) и все они демонстрируют переменность профилей, связанную с нерадиальными пульсациями, и частично залиты эмиссией. Так что для обнаружения орбитальных движений с периодами в десятки и сотни дней и полной амплитудой 10–20 км/с необходимы большие временные ряды и мастерство в анализе спектров.

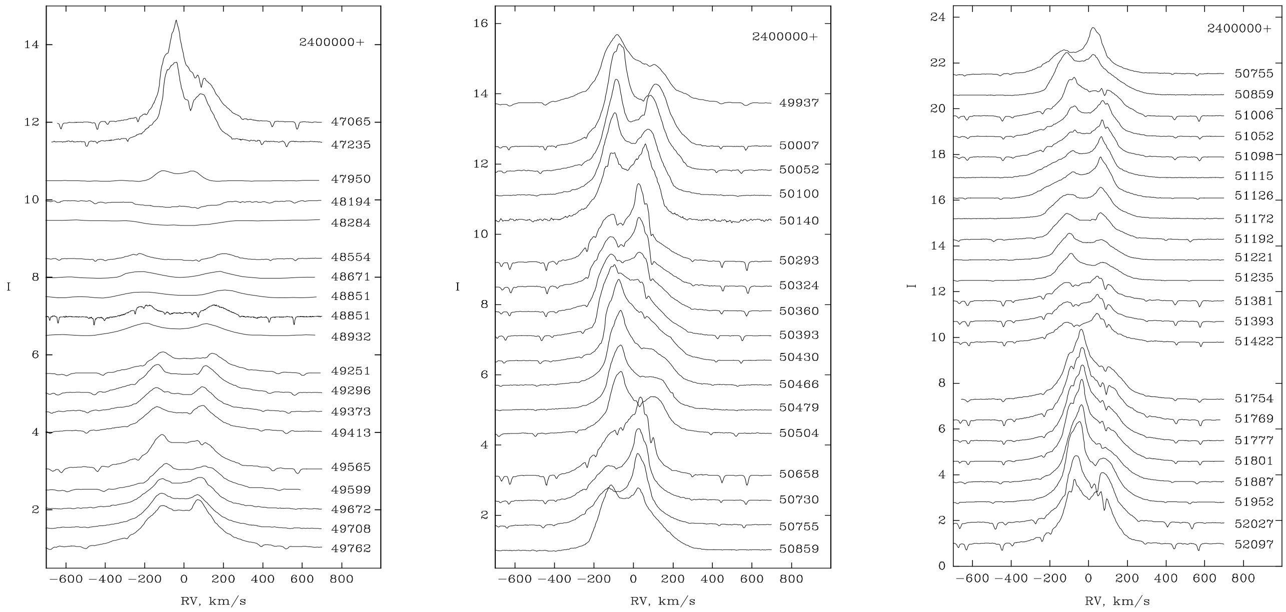


Рис. 4. Долговременная переменность профиля линии H_α у Be-звезды X Per

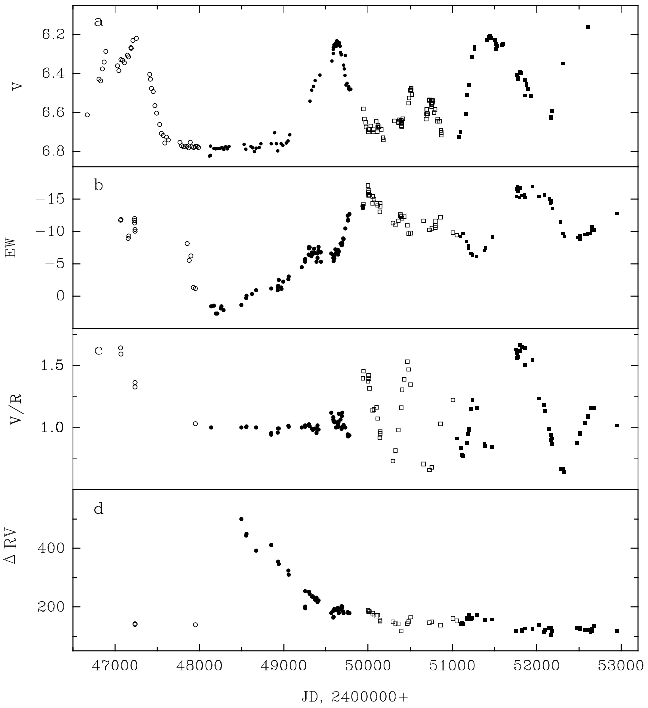
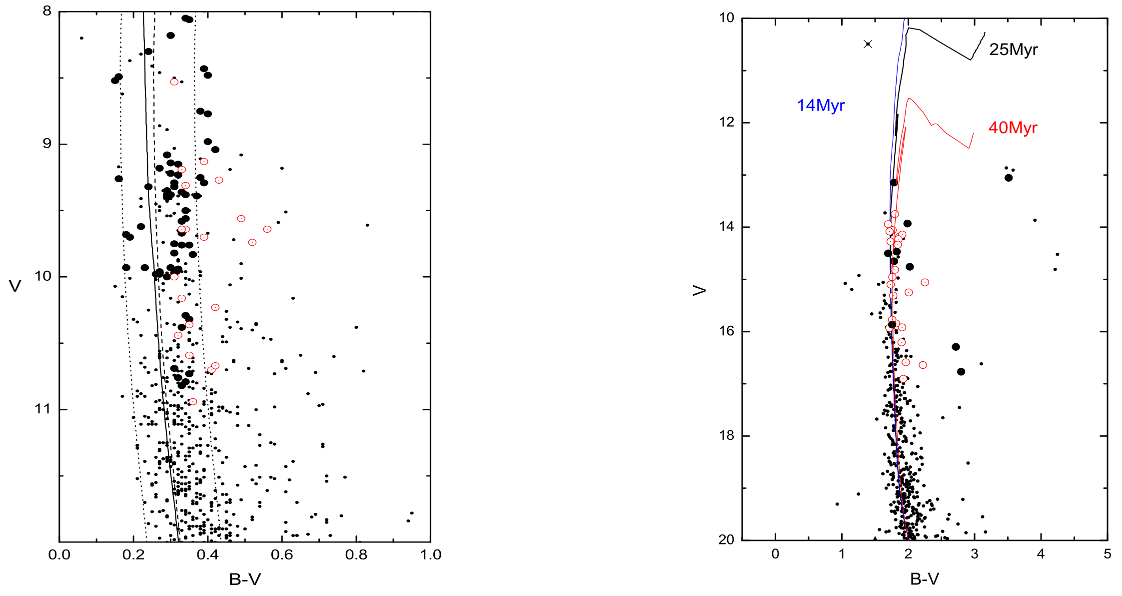


Рис. 5. Долговременная переменность блеска и параметров линии H_α у Be-звезды X Per

ВОЗРАСТ Be-ЗВЕЗД

Одним из наиболее обсуждаемым, по настоящее время, остается вопрос об эволюционном статусе Be-звезд. Так как в процессах, приводящих к образованию дисков, помимо вращения принимают участие дополнительные механизмы, такие как пульсации или магнитные поля. Естественным образом возникает вопрос о времени возникновения Be-феномена – переходят ли Be-звезды Хербига с аккреционными дисками в классические Be-звезды главной последовательности с декреционными дисками, или же Be-феномен развивается в течении жизни на главной последовательности, вплоть до ухода звезды



а б

Рис. 6. Диаграмма цвет – звездная величина для скоплений h/χ Per (*а*) и NGC 7419 (*б*) с возрастом 12 и 20 млн лет соответственно. Be-звезды отмечены открытыми кружками

в область холодных сверхгигантов. Данные исследования лучше всего проводить, изучая популяцию Be-звезд в молодых рассеянных скоплениях различного возраста.

Первые работы по изучению Be-звезд в скоплениях появились в 80-е годы [34, 46, 48]. Спектральная классификация Be-звезд в нескольких молодых звездных скоплениях показала, что большинство из них концентрируется вблизи границы главной последовательности, демонстрируя более значительную эмиссию в водородных линиях. Тем не менее, явной зависимости от возраста или спектрального типа не было выявлено [46, 48]. Мермиллиод [34] отметил, что Be-звезды занимают всю область главной последовательности, но максимальная доля Be-звезд наблюдается в скоплениях с точкой поворота в области спектральных типов B1 – B2 и B7 – B8. Найдено, что в некоторых скоплениях, среди звезд спектрального класса B1, Be-звезды могут составлять 34%, тогда как среднее значение популяции всех Be-звезд Галактики около 17% [57]. Для очень молодых скоплений, с возрастом менее 10 млн лет, в работе [16] классических Be-звезд не обнаружено, наблюдались только звезды Be Хербига – молодые B-звезды до главной последовательности.

С увеличением возраста скоплений наблюдается рост доли Be-звезд, и их максимальное относительное содержание появляется в скоплениях с возрастом 13–25 млн лет. Таким образом, в работе [16] показано, что Be-феномен, скорее всего, является этапом в эволюции некоторой части быстро вращающихся B-звезд второй половины их жизни на главной последовательности.

В работе [33] производился поиск Be-звезд в 48 скоплениях южного полушария. Четкой зависимости от возраста авторами не выявлено, но отмечено повышенное содержание Be-звезд в скоплениях с возрастом до 100 млн лет, причем максимум относительного содержания приходился на скопления с возрастом 25–100 млн лет.

В работе [27] изучались скорости вращения B- и Be-звезд в 19 скоплениях с возрастом 3–73 млн лет. Найдено, что максимальная скорость вращения наблюдается у звезд в скоплениях с возрастом 10–14 млн лет. Таким образом, увеличение доли Be-звезд в скоплениях с возрастом 13–25 млн лет может быть связано с увеличением их скорости вращения в течение их движения к границе главной последовательности.

Ясно, что Be-феномен возникает у B-звезд в широком диапазоне спектральных типов от O9 до B9 и со значительно разным по продолжительности абсолютным временем их жизни на главной последовательности, поэтому желательно при рассмотрении относительного содержания Be-звезд учитывать их спектральный тип, отделив для начала более доступные ранние Be-звезды от более слабых звезд поздних спектральных типов. Однако, уверенное определение положения Be-звезды на диаграмме цвет–светимость (как это видно из рис. 6) связано со значительными трудностями, такими как неопределенность в расстоянии до скопления (молодые скопления принадлежат плоской составляющей

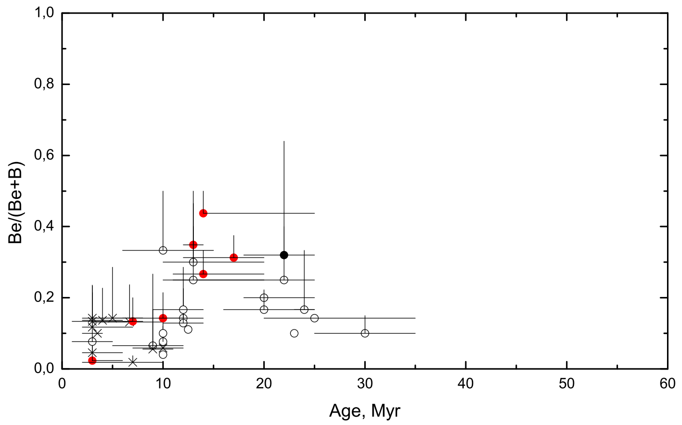


Рис. 7. Популяция Be-звезд в молодых рассеянных звездных скоплениях в зависимости от их возраста. По данным [1]

Галактики и имеют значительные неоднородности межзвездного поглощения на луче зрения), так и вследствие быстрого вращения самих объектов, дополнительного излучения околозвездного диска и угла наклона объекта к наблюдателю. В работе [1] сделана попытка обойти часть возникающих проблем, рассмотрев только популяцию B- и Be-звезд спектральных типов B0 – B3 в скоплениях с возрастом до 30 млн лет. На рис. 6 приведен полученный ими результат. Как видно из рисунка, присутствует явная зависимость относительного содержания Be-звезд от возраста скоплений. Увеличение их содержания во второй половине их жизни на главной последовательности однозначно указывает на эволюционный характер Be-феномена, а быстрый спад содержания Be-звезд в более старых скоплениях легко объясним уходом звезд в область холодных гигантов.

Таким образом, можно с уверенностью говорить, что Be-феномен является результатом эволюции, по крайней мере, части быстровращающихся B-звезд в течение их жизни на главной последовательности. Вопрос об обязательном наступлении Be-фазы у таких объектов остается открытым, так же как и причины, приводящие к появлению нестабильных во времени дисков у Be-звезд. Это может быть, например, перераспределение углового момента вдоль радиуса звезды в конце фазы горения водорода в ядре звезды [16], попадание звезды в область пульсационной неустойчивости, занимаемую звездами типа β Cep, или, в случае тесной двойной системы, обмен массой и угловым моментом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружение первой Be-звезды совпало по времени с исследованиями Кирхгофа, в которых он указал на возможность определения по характеристикам излучения физических характеристик и химического состава космических объектов. С тех пор успехи в понимании физических процессов, участвующих в формировании Be-феномена, всегда были тесно связаны с развитием методов анализа света. Это касалось как разработки методов определения скоростей вращения B- и Be-звезд, так и понимания процессов, приводящих к формированию и свечению оболочек у Be-звезд. В последние десятилетия звездная астрофизика значительно продвинулась в понимании деталей эволюции быстровращающихся массивных звезд, но тем не менее значительное количество вопросов все еще требует внимания.

[1] *Мальченко С. Л., Тарасов А. Е.* Относительное содержание Be-звезд в молодых рассеянных звездных скоплениях // Кинематика и физика небес. тел. Приложение. – 2009. – № 6. – С. 319–323. (настоящий выпуск).

[2] *Скульский М. Ю.* Спектральные ПЗС наблюдения β Лиры – абсорбционные линии, параметры орбиты и структура аккретора // Письма в Астрон. журн. – 1992. – **18**, № 8. – С. 711–726.

[3] *Тарасов А. Е., Бердюгина С. В., Бердюгин А. В.* Массивная взаимодействующая двойная KX And: орбита и физические параметры вторичного компонента // Письма в Астрон. журн. – 1998. – **24**, № 3. – С. 316–320.

[4] *Albright G. E., Richards M. T.* Circumstellar material in TX Ursae Majoris // Astrophys. J. – 1993. – **414**. – P. 830–845.

[5] *Balona L. A.* The Be phenomenon // IAU Coll. N 175. – 2000. – P. 1–12.

[6] *van Belle G. T., Ciardi D. R., Thompson R. R., et al.* Altair's oblateness and rotational velocity from long-baseline interferometry // Astrophys. J. – 2001. – **559**, N 2. – P. 1155–1164.

[7] *Bjorkman J. E., Cassinelly J. P.* Equatorial disk formation around rotating stars due to Ram pressure confinement by the stellar wind // Astrophys. J. – 1993. – **409**. – P. 429–449.

[8] *Borra E. F., Landstreet J. D.* The magnetic field of the helium-strong stars // Astrophys. J. – 1979. – **228**. – P. 809–816.

[9] *Borra E. F., Landstreet J. D., Thompson I.* The magnetic fields of the helium-weak B stars // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 1983. – **53**. – P. 151–167.

[10] *Chauville J., Zorec J., Ballereau D., et al.* High and intermediate-resolution spectroscopy of Be stars 4481 lines // Astron. and Astrophys. – 2001. – **378**, N 2. – P. 861–882.

[11] *Clark J. S., Tarasov A. S., Steele I. A., et al.* Long-term variability of the Be/X-ray binary A0535+26 I. Optical and UV spectroscopy // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1998. – **294**. – P. 165–176.

[12] *Clark J. S., Tarasov A. E., Okazaki A. T., et al.* Phase changes of the Be/X-ray binary X Persei // Astron. and Astrophys. – 2001. – **380**. – P. 615–629.

[13] *Delgado–Marti H., Levine A. M., Pfahl E., Rappoport A.* The orbit of X Per and its neutron star companion // Astrophys. J. – 2001. – **546**, N 1. – P. 455–468.

[14] *Dominiciano de Souza A., Kervella P., Jankov S., et al.* The spinning-top Be star Achernar from VLTI–VINCI // Astron. and Astrophys. – 2003. – **407**. – P. L47–L50.

[15] *Dziembowski W. A., Pamyatnykh A. A.* The opacity mechanism in D-type stars. I. Unstable modes in β Cephei star models // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1993. – **262**, N 1. – P. 204–212.

[16] *Fabregat J., Torrejón J. M.* On the evolutionary status of Be stars // Astron. and Astrophys. – 2000. – **357**. – P. 451–459.

[17] *Floquet M., Hubert A. M., Hubert H., et al.* The binary system of the Be star KX Andromedae // Astron. and Astrophys. – 1995. – **294**. – P. 227–231.

[18] *Floquet M., Hubert A.-M., Hirata R., et al.* Stellar and circumstellar activity in the Be star EW Lacertae from the 1993 multi-site campaign // Astron. and Astrophys. – 2000. – **362**. – P. 1020–1040.

[19] *Fremat Y., Zorec J., Hubert A.-M., Floquet M.* Effect of gravitational darkening on the determination of fundamental parameters in fast-rotating B-type stars // Astron. and Astrophys. – 2005. – **440**, N 1. – P. 305–320.

[20] *Gies D. R., Bagnuolo W. G., William G. Jr., et al.* Hubble Space Telescope Goddard High Resolution Spectrograph observations of the Be + sdO binary ϕ Persei // Astrophys. J. – 1998. – **493**. – P. 440–450.

[21] *Hanuschik R. W.* Kinematic properties and density structure of average Be star envelopes derived from Fe II emission line analysis // Astron. and Astrophys. – 1988. – **190**, N 1–2. – P. 187–199.

[22] *Hanuschik R. W.* On the structure of Be star disks // Astron. and Astrophys. – 1996. – **308**, N 1. – P. 170–179.

[23] *Harmanec P., Morand F., Bonneau D., et al.* Jet-like structures in β Lyrae. Results of optical interferometry, spectroscopy and photometry // Astron. and Astrophys. – 1996. – **312**. – P. 879–896.

[24] *Harmanec P.* Emission-line stars as interacting binaries // Physics of Be stars: IAU Coll. N 92. – Cambrige and NY: Cambrige Univer. Press, 1987. – P. 339–355.

[25] *Harmanec P., Habuda P., Štefl S., et al.* Properties and nature of Be stars. XX. Binary nature and orbital elements of γ Cas // Astron. and Astrophys. – 2000. – **364**. – P. L85–L88.

[26] *Henrichs H.F., de Jong J.A., Donati J.–F., et al.* The magnetic field of β Cep and the Be phenomenon // IAU Coll. N 175, ASP Conf. Ser. – 2004. – **214**. – P. 324–328.

[27] *Huang W., Gies D. R.* Stellar rotation in young clusters. I. Evolution of projected rotation velocity distribution // Astrophys. J. – 2006. – **648**, N 1. – P. 580–590.

[28] *Hubrig S., Yudin R. V., Pogodin M., et al.* Evidence for weak magnetic fields in early-type emission stars // Astron. Nachr. – 2007. – **328**, N 10. – P. 1133–1142.

[29] *Kambe E., Hirata R., Ando H., et al.* Multiperiodicity of ζ Ophiuchi from multisite observations // Astrophys. J. – 1997. – **481**. – P. 406–419.

[30] *Kříž S., Harmanec P.* A hypothesis of the binary origin of Be stars // Bull. Astron. Inst. of Czechosl. – 1975. – **26**, N 2, – P. 65–81.

[31] *Lyubimkov L. S., Rostopchin S. I., Roshe P., Tarasov A. E.* Fundamental parameters, helium abundance and distance of X Persei // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1997. – **286**, N 3. – P. 549–557.

[32] *McAlister H. A., ten Brummelaar T. A., Gies D. R., et al.* First results from the CHARA array. I. An interferometric and spectroscopic study of the fast rotator α Leonis (Regulus) // Astrophys. J. – 2005. – **628**, N 1. – P. 439–452.

[33] *McSwain M. V, Gies D. R.* The evolutionary status of Be stars: results from a photometric study of southern open clusters // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 2005. – **161**, N 1. – P. 118–146.

[34] *Mermilliod J. C.* Stellar content of young open clusters. II. Be stars // Astron. and Astrophys. –1982. – **109**, N 1. – P. 48–65.

[35] *Okazaki A. T., Bate M. R., Ogilvie G. I., Pringle J. E.* Viscous effects on the interaction between the coplanar decretion disk and the neutron star in Be/X-ray binaries // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2002. – **337**, N 3. – P. 967–980.

[36] *Osaki Y.* Connection between nonradial pulsations and stellar winds in massive stars. I. Nonradial pulsation theory of massive stars // Publs Astron Soc. Pacif. – 1986. – **98**, N 1. – P. 30–32.

[37] *Owocki S. P., Granmer S. R.* The link between radiation-driven winds and pulsation in massive stars // IAU Coll. N 185. – San Francisco: Astron. Soc. Pacif., 2002. – P. 512–522.

[38] *Peters G. J.* The H_α emitting regions of the accretion disks in ALGOLS // Space Sci. Rev. – 1989. – **50**. – P. 9–22.

[39] *Plavec M. J., Popper D. M., Ulrich R. K.* Close binary stars: Observations and interpretation // IAU Symp. N 88. – Dordrecht: Reidel Publ, 1980. – P. 251–263.

[40] *Quirrenbach A., Bjorkman K. S., Bjorkman J. E., et al.* Constrains on the geometry of circumstellar envelopes: optical interferometric and spectropolarimetric observations of seven Be stars // Astrophys. J. – 1997. – **479**, N 1. – P. 477–496.

[41] *Raguzova N. V.* The evolutionary evidence for most Be stars being paired with hot write dwarfs // IAU Coll. N 175, ASP Conf. Ser. – 2000. – **214**. – P. 693–696.

[42] *Reig P., Negueruela I., Coe J., et al.* Correlated V/R and infrared photometric variability in the Be/X-ray binary LSI +61°235/RX J0146.9+6121 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2000. – **317**. – P. 205–210.

[43] *Richards M. T., Albright G. E., Bowles L. M.* Doppler tomography of the gas stream in short-period Algol binaries // Astrophys. J. Lett. – 1995. – **438**. – P. L103–L106.

[44] *Rivinius Th., Stefl S.* 59 Cygni: a tilted ϕ Persei like system // IAU Coll. N 175, ASP Conf. Ser. – 2000. – **214**. – P. 581–584.

[45] *Sehhci A.* Schreiben des Herrn prof. Secchi, Directors der Sternwarte des Collegio Romano, an den Herausgeber // Astron. Nachr. – 1866. – **68**. – P. 63.

[46] *Schild R., Romanishin W.* A study of Be stars in clusters // Astrophys. J. – 1976. – **204**. – P. 493–501.

[47] *Silvester J., Neiner C., Henrichs H. F., et al.* On the incidence of magnetic fields in slowly pulsating B, β Cep and B-type emission-line stars // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2009. – **398**. – P. 1505–1511.

[48] *Slettebak A.* Be stars in open clusters // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 1985. – **59**. – P. 769–784.

[49] *Struve O.* On the origin of bright lines in the spectra of stars of class B // Astrophys. J. – 1931. – **73**. – P. 94–103.

[50] *Tarasov A. E., Tuominen I.* Duplicity of the Be-star 59 Cyg // European Regional Astron. Meet. of the IAU. Proceedings. – 1987. – **5**. – P. 127–129.

[51] *Tarasov A. E.* Be stars in roche-lobe interacting binaries // Proc. IAU Coll. N 175, ASP Conf. Ser. – 2000. – **214**. – P. 644–655.

[52] *Thom C., Granes P., Vakili F.* Optical interferometric measurements of Gamma Cassiopeiae's envelope in the H_α line // Astron. and Astrophys. – 1986. – **165**. – P. L13–L15.

[53] *Townsend R. H. D., Owocki S. P., Howarth I. D.* Be-star rotation: how close to critical? // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2004. – **350**, N 1 – P. 189–195.

[54] *Townsend R.* The coupling between pulsation and mass loss in massive stars // AIP Conf. Proc. – 2007. – **948**. – P. 345–356.

[55] *Walker G. A. H.* B- and Be-stars // ESO Conf. and Workshop Proc. N 36. – 1991. – P. 27–37.

[56] *Zhao M., Gies D., Monnier J.D., et al.* First resolved images of the eclipsing and interacting binary β Lyrae // Astrophys. J. – 2008. – **684**, N 2. – P. L95–L98.

[57] *Zorec J., Briot D.* Critical study of the frequency of Be stars taking into account their outstanding characteristics // Astron. and Astrophys. – 1997. – **318**. – P. 443–460.