ОТНОСИТЕЛЬНОЕ СОДЕРЖАНИЕ Be-ЗВЕЗД В МОЛОДЫХ РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЯХ

С. Л. Мальченко[1,2], **А. Е. Тарасов**[2]

© 2009

[1] *Криворожский государственный педагогический университет*
50000, Украина, Кривой Рог, просп. Гагарина, 54
e-mail: SLMalchenko@gmail.com

[2] *НИИ "Крымская астрофизическая обсерватория"*
98409, Украина, Крым, Научный
e-mail: AETarasov@mail.ru

В данной работе выполнено спектральное изучение B- и Be-звезд в восьми молодых рассеянных скоплений, таких как h/χ Per, NGC 457, NGC 659, NGC 6871, NGC 6913, NGC 7419 и Ber 86. На основе полученных спектральных наблюдений, а также имеющихся в литературе данных о B- и Be-звездах в рассеянных скоплениях, сделан анализ популяции Be-звезд раннего спектрального типа (O9–B3). В результате найдена зависимость относительного содержания Be-звезд в скоплениях от возраста. Максимальное число Be-звезд спектрального типа O9–B3 наблюдается в скоплениях с возрастом 12–25 млн лет. Полученная зависимость указывает на возможный эволюционный характер Be-феномена.

ВВЕДЕНИЕ

23 августа 1866 г. Анджело Секки, директор обсерватории Римской Коллегии, написал записку об обнаружении у γ Кассиопеи эмиссионных линий и открытии первой Be-звезды. Через 120 лет Коллинс дал определение Be-звездам как "B звезды, не сверхгиганты, в чьих спектрах присутствует или когда-либо наблюдалась одна или более бальмеровских линий в эмиссии" [1], обычно это линия H_α. Данное определение продолжает использоваться и в настоящее время. Расплывчивость формулировки приводит к тому, что под данное определение попадает целая группа B-звезд с эмиссионными линиями разного происхождения (например, двойные системы на разной стадии обмена массой, Be-звезды Хербига и др.) [2].

Вопрос о природе и эволюционном статусе Be-звезд является часто обсуждаемым, однако имеющиеся данные дают размытую картину и не дают однозначного объяснения природы Be-феномена. Одной из важнейших проблем является определение, появляется ли Be-феномен на данной стадии эволюционного пути каждой B-звезды с достаточно высокой скоростью вращения или он зарождается при выходе звезды на главную последовательность. У большинства Be-звезд наблюдается значительное вращение со скоростями, близкими к критическим. Известно три основные причины наличия такого высокого углового момента: является изначальным и возникает при формировании звезд; увеличивается в результате перераспределения углового момента в процессе эволюции B-звезд вдоль главной последовательности; возникает в тесных двойных системах в результате обмена массой. Быстрое вращение Be-звезд, возможно, дополняется такими процессами, как нерадиальные пульсации и/или магнитные поля (если они есть).

Ряд авторов отмечает, что Be-звезды занимают всю область главной последовательности, от ZAMS до TAMS [3, 4], т. е. Be-феномен может проявляться на разных этапах эволюции и возникает из-за характеристик звезд на момент своего образования. Тем не менее, в большинстве работ [5, 6] наблюдается уменьшение содержания Be-звезд с возрастом. Это свидетельствует о том, что Be-феномен ассоциируется с определенной эволюционной фазой. При этом популяция Be-звезд больше среди проэволюционировавших звезд, чем среди непроэволюционировавших членов скоплений.

От того, наблюдается ли повышенная потеря массы в течение всей фазы жизни звезд на главной последовательности или только на некоторой ее части, будет значительно зависеть принятая эволюционная модель быстровращающейся звезды. Анализ содержания Be-звезд в скоплениях с известным возрастом и химическим составом дает прекрасную возможность для изучения Be-феномена и может существенно помочь в этом вопросе.

Be-звезды идентифицированы во многих скоплениях нашей Галактики, тем не менее данных спектрального и, что важно, однородного изучения зависимости популяции Be-звезд от возраста недостаточно. Поэтому задачей данной работы было изучение Be-звезд в молодых рассеянных скоплениях по спектрам высокого и умеренного разрешения, а также анализ относительного содержания Ве-звезд как функции возраста скоплений по имеющимся в литературе данным.

В течение 1997–2008 гг. выполнены спектральные наблюдения популяции В- и Ве-звезд в молодых рассеянных звездных скоплениях северного полушария с возрастом 1–40 млн лет, таких как: h/χ Per, NGC 457, NGC 659, NGC 6871, NGC 6913, NGC 7419 и Ber 86. Всего изучено более 140 объектов раннего спектрального В-типа в данных скоплениях, из них 59 – это Ве-звезды. В области линии H_α получено 143 спектров, из них 87 спектров – у 51 Ве-звезды и 56 – для 50 В-звезд. В синей области получено 117 спектров у 49 В-звезд и 54 – у 40 Ве-звезд.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗВЕЗД В МОЛОДЫХ РАССЕЯННЫХ СКОПЛЕНИЯХ

На основе высокодисперсионных ПЗС-спектров изучены профили линии H_α 48 объектов раннего спектрального класса (В0–В3) в молодом рассеянном двойном скоплении h/χ Per. Дополнительно исследованы спектры умеренного разрешения 15 В- и Ве-звезд в области 4400–4960 Å [7]. Эмиссия разной интенсивности наблюдается в профилях линии H_α у 20 объектов. У некоторых членов скопления, таких как Oo146, Oo566, Oo922, Oo1268, в период наших наблюдений был получен абсорбционный профиль линии H_α, хотя ранее они были идентифицированы как Ве-звезды. У Ве-звезд Oo1161 и Oo2242 обнаружена значительная долговременная переменность профиля линии H_α.

В результате наблюдений в скоплении h Персей идентифицирована одна (возможно две) новая Ве-звезда, со слабой эмиссией в линии H_α. Известная Ве-звезда V622 Per (Oo2371), член скопления χ Персей, определена как массивная двойная система с орбитальным периодом около 5.213 дня и находится на стадии после активного обмена массой. Первичная, менее массивная, но более яркая звезда в процессе эволюции потеряла большую часть массы и покинула главную последовательность в сторону красных гигантов [8].

В рассеянном скоплении NGC 6871 по спектрам высокого разрешения исследованы профили линии H_α у 11 звезд [9]. Эмиссионные профили линии H_α получены у трех объектов, один из которых (V1676 Cyg) является известной WR-звездой. Из двух изучаемых Ве-звезд одна (BD +35°3956) демонстрирует переход от В- к Ве-фазе, а другая имеет яркий одиночный эмиссионный профиль линии H_α. Спектры семи В-звезд не показали следов эмиссии в линии H_α. Для семи членов скопления получены спектры умеренного разрешения в области длин волн 4420–4960 Å.

В молодом рассеянном скоплении NGC 6913 в области линии H_α получено три спектра одной Ве-звезды и два спектра В-звезды [9]. В синей области длин волн получено 36 спектров десяти звезд скопления. Ве-звезда V1322 Cyg в период наших наблюдений демонстрировала яркий эмиссионный профиль линии H_α со значительной переменностью интенсивности и эквивалентной ширины. Пять изучаемых членов скопления – это двойные системы, с наблюдаемой переменностью лучевых скоростей более 30 км/с.

Получены спектры 11 членов скопления NGC 457 в области длин волн 3800–5200 Å. Только у двух из пяти Ве-звезд наблюдается эмиссия в линии H_α. Среди исследуемых объектов скопления имеется 4 двойные системы. Две звезды демонстрируют вариацию значений лучевой скорости около 50 км/с, у одного объекта наблюдается больший разброс значений $\Delta V_R = 85$ км/с. В спектрах еще одной двойной системы различимы оба компонента, с соотношением вклада компонентов примерно 5:6.

Исследована популяция В- и Ве-звезд в скоплении NGC 659. Получены спектры умеренного разрешения у 22 звезд в области 4050–5200 Å и семи объектов в области линии H_α. У двух из пяти изучаемых Ве-звезд эмиссия наблюдается как в линии H_α так и в линии H_β, еще у одной звезды слабая эмиссия присутствует только в линии H_α. У других объектов, по полученным в данной работе спектрам, заметных следов эмиссии не выявлено.

В области линии H_α изучено 34 звезды скопления NGC 7419, дополнительно получены спектры в области 3700–6200 Å у 13 объектов. Четыре Ве-звезды в период наших наблюдений демонстрировали абсорбционный профиль линии H_α, хотя ранее они идентифицированы как Ве. Эмиссия в линии H_α наблюдается в спектрах 21 объекта. Для членов скопления NGC 7419 сделаны глазомерные оценки спектрального типа, две изучаемые звезды – спектрального класса В2–В4, а остальные члены скопления имеют спектральный класс В0–В2.

По спектрам в области длин волн 4050–5200 Å исследованы звезды в скоплении Берклей 86. Только у одной, из двух наблюдаемых Ве-звезд, получен эмиссионный профиль линии H_α. Выполнены наблюдения трех двойных систем в скоплении. Одна двойная звезда демонстрирует переменность лучевой скорости около 100 км/с. На некоторых спектрах можно выделить и второй компонент, соотношение интенсивностей компонентов приблизительно 1:2. Другой объект является спектрально двойной звездой с хорошо различимыми двумя компонентами с расстоянием между пиками в максимуме порядка 400 км/с. Период данного объекта – менее трех дней. Оба компонента видны и в некоторых спектрах еще одной короткопериодической двойной системы.

По спектрам умеренного разрешения в области длин волн 4050–5200 Å выполнена оценка основных физических параметров атмосферы B- и Be-звезд. Наблюдаемые в данной работе спектры позволили сделать заключение, что некоторые звезды не являются членами скоплений. По два таких объекта найдено в молодых скоплениях NGC 6913 и Берклей 86; и по одному – в таких скоплениях, как NGC 6871, NGC 457 и NGC 7419.

B- и Be-ЗВЕЗДЫ РАННЕГО СПЕКТРАЛЬНОГО КЛАССА (B0–B3) В МОЛОДЫХ РАССЕЯННЫХ СКОПЛЕНИЯХ

Исследование Be-звезд выполнено для большого количества рассеянных скоплений. Однако, большинство работ основаны на данных фотометрии, в то время как спектральных наблюдений все еще не достаточно для однозначных и уверенных выводов о природе Be-феномена.

Для исследования популяции Be-звезд в данной работе рассмотрено более 300 рассеянных скоплений из каталога базы данных Института астрономии Венского университета WEBDA. Из них более чем 100 скоплений содержат хотя бы одну Be-звезду. По имеющимся данным для выбранных скоплений проанализировано количество B- и Be-звезд раннего спектрального типа (O9–B3) и возраст скоплений. Ранние Be-звезды идентифицированы в более 40 скоплениях Галактики, восемь из них были нами детально изучены. Такое сравнительно малое количество скоплений связано с тем, что многие относительно слабые по светимости рассеянные скопления слабо изучены, и для большинства звезд этих скоплений спектральная классификация не выполнена.

Результаты анализа содержания Be-звезд раннего спектрального типа в скоплениях представлены на рис. 1 и 2 в виде относительного содержания Be-звезд как функции возраста. На рис. 1 показана зависимость доли Be-звезд от возраста скопления по данным, полученным в настоящей работе. Результат, дополненный данными о скоплениях из имеющихся источников, представлен на рис. 2. Как видно из рисунка 2, в обзор попали скопления с возрастом менее 8 млн лет, которые находятся внутри газопылевых туманностей или в областях активного звездообразования. Есть большая вероятность того, что эмиссия у звезд в этих скоплениях вызвана наличием аккреционных дисков, т. е. это Be-звезды Хербига. Данные скопления на рисунке отмечены символом “X”.

Результаты обзора скоплений значительно отягощены эффектами селекции, такими как отсутствие спектральной классификации большинства объектов в бедных по населенности и слабых по светимости звездных скоплениях и различие, иногда значительное, в оценках возраста отдельных скоплений. Поэтому для большинства скоплений на рисунках отмечены границы оценок полученных результатов. Из рисунков видно, что точность определения возраста скоплений, полученного разными методами, часто существенно отличается. Кроме того, присутствуют и большие разногласия в определении возраста при использовании одного и того же метода, но с различной выборкой объектов исследования. В данной работе сделана попытка критически оценить определенные значения возраста скоплений. При определении возраста скоплений основными были избраны три критерия: во-первых, параметрам скопления, полученными по данным *ubvy*-фотометрии, придавался больший вес; во-вторых, близкие значения, полученные в большем числе работ; и, в-третьих, то значение, при определении которого учитывалось большее количество членов скопления.

Доля Be-звезд в скоплениях находилась из отношения числа Be-звезд раннего спектрального типа ко всем объектам B0–B3 (включая Be-звезды). Как видно из рисунков, кроме границ разброса, в определении возраста учтена и возможная неопределенность доли Be-звезд в скоплении. При этом рассматривалось количество известных Be-звезд, для которых не выполнена спектральная классификация, и те объекты, для которых есть информация о том, что они, возможно, являются Be-звездами. Естественно, что нижняя граница оценок отсутствует. Это связано с тем, что к Be-звездам относят и те объекты, у которых когда-либо наблюдалась эмиссия в линии водорода. Т. е. число Be-звезд в скоплениях может только увеличиваться. Поэтому верхняя граница рассчитывалась с учетом уже идентифицированных и возможных кандидатов в Be-звезды раннего спектрального типа. При этом не учитывалось число B-звезд скоплений, для которых не выполнена спектральная классификация. Следовательно данная оценка еще неучтенных объектов может быть и больше. На рисунках приведены также данные по скоплениям без указания границ точности параметров, это связано с тем, что эти скопления мало изучены и неопределенность полученных результатов трудно оценить.

В работе рассмотрены литературные данные для более чем 40 скоплений, содержащих B- и Be-звезды спектрального типа B0–B3. Из рис. 1 и 2 хорошо видна зависимость доли Be-звезд от возраста скоплений. Концентрация Be-звезд достигает максимума в скоплениях с возрастом 13–25 млн лет, и с увеличением возраста количество Be-звезд уменьшается, что вполне понятно и связано с уходом данных объектов с главной последовательности. Важным является тот факт, что значительно меньшее число Be-звезд наблюдается в более молодых скоплениях (1–7 млн лет). Наиболее богатыми Be-звездами оказались

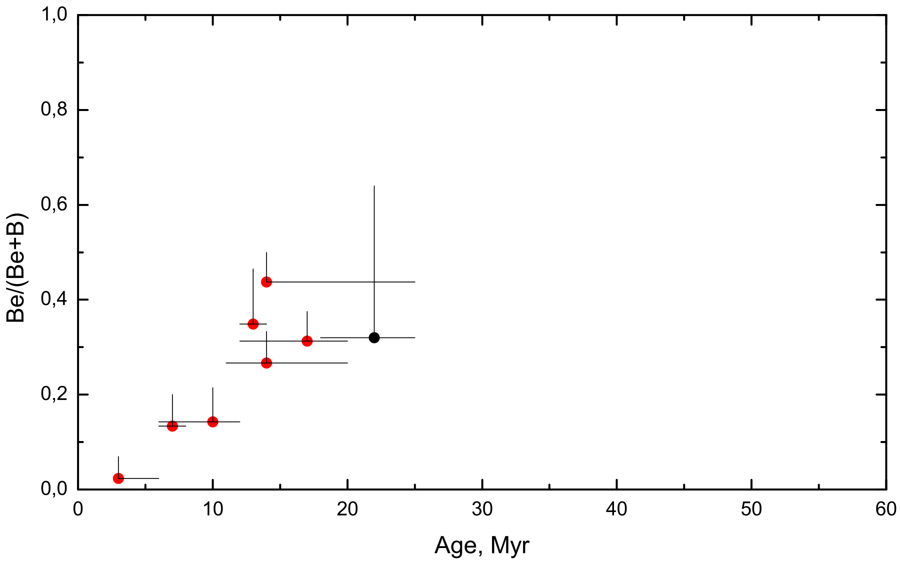

Рис. 1. Зависимость популяции Be-звезд от возраста скопления (по данным наблюдений настоящей работы)

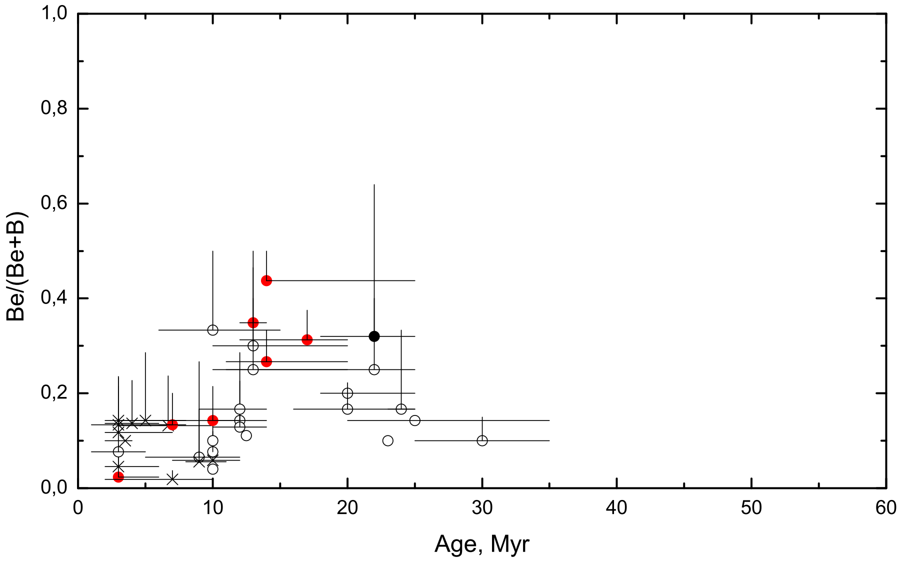

Рис. 2. Зависимость популяции Be-звезд от возраста скопления (по данным около 40 скоплений из литературных источников)

известные скопления NGC 869 и NGC 884 (около 40–50% Be-звезд), NGC 7419 (45%), NGC 663 (32%), NGC 2439 (35%), NGC 3766 (25%). Все эти скопления имеют возраст 12–21 млн лет. Высокое содержание Be-звезд (более 20%) отмечено и в скоплениях NGC 457, NGC 581 и NGC 659. В работе [6] также отмечено, что в этих скоплениях относительное число Be-звезд близко к значению, полученному для богатых Be-звездами скоплений.

Найденное увеличение содержания Be-звезд в скоплениях с возрастом 13–25 млн лет, вероятно, подтверждает тот факт, что Be-феномен более распространен среди звезд во второй половине их жизни на главной последовательности. Так как возраст 13 млн лет соответствует началу второй половины главной последовательности для звезд спектрального типа B3 с массой около $9\,M_\odot$, а возраст 25 млн лет – соответствует их уходу с главной последовательности.

Полученная зависимость, подтверждает предположение о том, что Be-феномен свойственен быстровращающимся звездам не от рождения (выхода на главную последовательность), а может возникать в результате эволюции объекта на главной последовательности [6]. Однако причина увеличения популяции Be-звезд остается неизвестной, это может быть как результат перераспределения углового момента внутри одиночной звезды, так и следствие активного обмена массой и угловым моментом в тесных двойных системах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение популяции Be-звезд раннего спектрального типа (B0–B3) в молодых рассеянных скоплениях позволило получить хорошо выраженную зависимость относительного содержания Be-звезд от возраста скопления. Результаты такого исследования указывают на заметное увеличение доли Be-звезд в скоплениях с возрастом 12–25 млн лет. Это подтверждает гипотезу, что Be-феномен является результатом эволюции некоторых массивных B-звезд во второй половине главной последовательности. При этом Be-феномен объясняется высокой скоростью вращения большинства объектов. С другой стороны, данный феномен может возникнуть и в двойных взаимодействующих системах в момент ухода более массивного компонента с главной последовательности в область гигантов. Одна из таких звезд V622 Per нами идентифицирована. Оба эффекта существуют одновременно как для одиночных, так и для двойных систем. Поэтому для окончательного и однозначного заключения о природе и статусе Be-феномена необходимы продолжительные спектральные наблюдения умеренного и высокого разрешения конкретных Be-звезд на предмет их возможной двойственности.

[1] *Collins G. W.* The use of terms and definitions in the study of Be stars // Physics of Be stars: Proc. Ninety-second IAU Colloquium, Boulder, CO, Aug. 18-22, 1986. – Cambridge and New York: Cambridge Univ. Press, 1987. – P. 3–19.

[2] *Porter J. M., Rivinius T.* Classical Be Stars // Publs Astron. Soc. Pacif. – 2003. – **115**. – P. 1153–1170.

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

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

[5] *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**. – P. 118–146.

[6] *Fabregat J., Torrejon J. M.* On the evolutionary status of Be stars // Astron. and Astrophys. – 2000. – **375**. – P. 451–459.

[7] *Мальченко С. Л., Тарасов А. Е.* Профили линий H_α и H_β в спектрах B и Be звезд в рассеянном звездном скоплении h/χ Персея // Астрофизика. – 2008. – **51**. – С. 451–459.

[8] *Malchenko S. L., Tarasov A. E., Yakyt K.* Evolution status of the early-type Be star V622 Per, the member of the χ Per open star clusters // Odessa Astron. Publ. – 2007. – **20**. – P. 120–123.

[9] *Мальченко С. Л., Тарасов А. Е.* Спектроскопия B и Be звезд в рассеянных звездных скоплениях NGC 6871 и NGC 6913 // Астрофизика. – 2009. – **52**. – С. 257–274.