

УДК 524.7+524.45

СРАВНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ И РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ В МЛЕЧНОМ ПУТИ

© 2009 г. А. С. Гусев^{1*}, А. Э. Пискунов², Ф. Х. Сахибов^{3,4}, Н. В. Харченко⁵

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва

²Институт астрономии РАН, Москва

³Университет прикладных наук Гиссена-Фридберга, Фридберг, Германия

⁴Институт астрофизики АН Таджикистана, Душанбе

⁵Главная астрономическая обсерватория НАНУ, Киев

Поступила в редакцию 27.11.2008 г.

Проведен сравнительный анализ эволюции интегральных фотометрических параметров молодых комплексов звездообразования в спиральных и неправильных галактиках и рассеянных звездных скоплениях в нашей Галактике. Показано, что при корректном учете поглощения света внегалактические комплексы звездообразования, видимые как гигантские области ионизованного водорода, и звездные скопления в Млечном Пути представляют единую эволюционную последовательность объектов, находящихся в разной стадии своего развития.

Ключевые слова: рассеянные звездные скопления, галактики, области HII, области звездообразования, межзвездное поглощение.

COMPARISON OF INTEGRATED PHOTOMETRIC PARAMETERS OF EXTRAGALACTIC STAR FORMATION COMPLEXES AND OPEN STAR CLUSTERS IN THE MILKY WAY, *by* A. S. Gusev, A. E. Piskunov, F. Kh. Sakhibov, and N. V. Kharchenko. A comparative analysis of the evolution of integrated photometric parameters for young star formation complexes in spiral and irregular galaxies and open star clusters in our Galaxy is performed. The extragalactic star formation complexes seen as giant HII regions and the open clusters in the Milky way are shown to represent a single evolutionary sequence of objects at different stages of their evolution when the extinction is properly taken into account.

PACS numbers : 98.20.Bg; 98.20.Di; 98.58.Hf; 98.62.Ai

Key words: open star clusters, galaxies, HII regions, star-forming regions, interstellar extinction.

ВВЕДЕНИЕ

Комплексы звездообразования (КЗО), известные также как гигантские области ионизованного водорода HII, и рассеянные звездные скопления (РЗС) содержат относительно молодые звезды, находящиеся в разных стадиях своей эволюции, и являются естественными лабораториями для проверки теорий образования и эволюции звезд. Сравнительное исследование звездного населения в КЗО и РЗС служит важным источником информации для изучения процессов звездообразования и лучшего понимания структуры и эволюции галактик в целом.

КЗО представляют собой единый конгломерат вновь образованных звездных скоплений и окружающих их облаков межзвездной пыли и ионизованного водорода. Размеры КЗО находятся в пределах от нескольких десятков до ≈ 300 пк, характерный размер КЗО нашей выборки — 80–100 пк (т.е. согласно иерархической шкале звездообразования Ефремова (1989) они являются звездными ассоциациями). Большая яркость КЗО позволяет достаточно уверенно наблюдать их в галактиках как объекты 16–20^m с эмиссионными спектрами, тогда как в Галактике КЗО или заслонены поглощающими облаками, или трудновыделимы из богатого и нерегулярного фона Млечного Пути. Счет исследованных внегалак-

* Электронный адрес: gusev@sai.msu.ru

тических КЗО идет на сотни, тогда как в Галактике более-менее изучены лишь немногие десятки. Это поясняет, почему исследования внегалактических КЗО дают более систематические сведения, чем данные об их локальных аналогах. Одним из свойств областей НII является ионизирующее излучение, которое свидетельствует о наличии О-звезд с массами $m > 15 m_{\odot}$. Распределение энергии в континууме КЗО определяется содержанием среднemasсивных В-звезд ($10 m_{\odot} < m < 15 m_{\odot}$). Наблюдения в инфракрасном и радиодиапазонах несут информацию о межзвездной среде в комплексе.

РЗС — более компактные объекты с типичным размером порядка 10 пк, наблюдаются в широком диапазоне возрастов (от нескольких миллионов до миллиардов лет), наиболее молодые из них часто являются составляющими КЗО. Галактические скопления, которых в Млечном Пути известно около 2000, разрешены на отдельные звезды, что позволяет детально изучать их структуру, кинематику, диаграммы Герцшпрунга—Рессела (Г—Р) и надежно определять такие параметры, как размер, возраст, светимость и др. В других галактиках можно наблюдать только ограниченные выборки наиболее ярких РЗС, которые, как правило, не разрешаются на отдельные звезды. Это заставляет использовать для определения эволюционных параметров внегалактических РЗС (возраст и/или масса) их интегральное излучение, сравнивая его с теоретическими моделями, основанными на предположениях о параметрах звездного населения внегалактических комплексов, или с данными о локальных скоплениях в Галактике, взятых в качестве эталонов (как говорят, “стандартных свечей”). Несмотря на то, что последний подход более естественен, так как лишен заложенного в основу моделей произвола, до недавнего времени он не имел достаточного распространения.

РЗС Галактики являются типичными объектами диска, в которых ионизованный водород, как правило, не наблюдается, что указывает на относительно больший возраст РЗС по сравнению с КЗО. Так ли это и действительно ли факт, что видимые в других галактиках КЗО и РЗС в Млечном Пути представляют одну эволюционную последовательность объектов, можно проверить, сравнивая интегральные фотометрические характеристики этих объектов. Для реализации такого сравнения необходимо исключить все систематические искажения фотометрической информации, прежде всего — корректно учесть влияние межзвездного поглощения.

Данные об истинных показателях цвета РЗС в Галактике основаны на разрабатываемом с середины прошлого века фотометрическом инструментарии и могут считаться вполне надежными.

С внегалактическими группировками дело обстоит сложнее. Учет систематических искажений наблюдаемых интегральных показателей цвета КЗО подразумевает учет как межзвездного поглощения света, так и вклада эмиссионных линий ионизованного водорода в наблюдаемые потоки в заданных фотометрических полосах. И то, и другое требует спектральных наблюдений внегалактических КЗО. В данной работе оценка межзвездной экстинкции будет сделана с помощью сравнения наблюдаемых бальмеровских декрементов $I_{H\alpha}/I_{H\beta}$ с их теоретическими значениями, вычисленными Остерброком (1989).

Сравнение редуцированных таким образом интегральных показателей цвета и светимостей внегалактических КЗО с независимыми данными для РЗС Млечного Пути позволит сделать вывод об адекватности современных косвенных (не прямых) методик исправления наблюдаемых цветов за межзвездное поглощение, применяемых во внегалактической астрономии.

Анализ и обобщение наблюдательных фактов, накопленных за последние десятилетия, оставил мало места сомнениям в том, что КЗО и рассеянные звездные скопления генетически связаны. Именно в КЗО рождаются как звездные ассоциации, так и рассеянные звездные скопления и одиночные звезды (Ефремов, 1995). Но до сих пор не было проведено прямого сопоставления КЗО и РЗС на единых диаграммах возраст—цвет, цвет—величина. Поэтому основной целью работы является проверка гипотезы о генетической связи КЗО и РЗС путем сравнительного анализа эволюции интегральных фотометрических параметров.

В следующих разделах статьи мы кратко характеризуем использованные выборки КЗО и РЗС. Далее выполнено их сравнение на диаграмме показатель цвета—возраст и проведено обсуждение проблемы учета поглощения света во внегалактических КЗО. В заключение изложены сделанные нами выводы.

КОМПЛЕКСЫ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В ГАЛАКТИКАХ

В настоящей работе мы использовали выборку более 100 КЗО, расположенных в спиральных и неправильных галактиках, для которых известны интегральные фотометрические параметры и возрасты. Выборка составлена на основе компилятивного каталога результатов многоцветной фотометрии в системе $UBVR$, в котором Сахибов и Смирнов (1999) собрали информацию для 836 КЗО в 49 галактиках, и списка КЗО в 48 галактиках с измеренными относительными интенсивностями

эмиссионных линий ионизованного водорода (Сахибов и Смирнов, 2001). Данные спектроскопии из последнего списка были использованы для коррекции наблюдаемых показателей цвета за межзвездное поглощение света и оценки металличности вещества в КЗО.

Методы измерения интегральных яркостных параметров КЗО и их редукции к стандартной фотометрической системе $UBVR$ подробно обсуждаются в работе Сахибова и Смирнова (1999) и в цитируемых там статьях. По оценкам различных авторов, ошибки измерения показателей цвета КЗО составляют $\pm 0.05^m \dots 0.07^m$ и в основном характеризуют точность по внутренней сходимости. Внешние ошибки измерений, которые оказались в 2–3 раза больше, Сахибов и Смирнов (1999, 2000) оценили из попарных сопоставлений фотометрических данных, полученных разными авторами с помощью разных методов. Причиной такого расхождения являются неуверенность в выделении объекта на фоне излучения галактики, учете излучения фона и определении размеров КЗО.

Величина межзвездного поглощения света A_V определялась из сравнения наблюдаемых и непокрашенных величин бальмеровского декремента $I_{H\alpha}/I_{H\beta}$:

$$A_V = \frac{2.5}{k_{H\beta} - k_{H\alpha}} \lg \frac{(I_{H\alpha}/I_{H\beta})_{\text{obs}}}{(I_{H\alpha}/I_{H\beta})_{\text{intr}}}. \quad (1)$$

Здесь $I_{H\alpha}/I_{H\beta}$ — отношение интенсивностей I водородных эмиссионных спектральных линий серии Бальмера в спектрах газовых туманностей, входящих в состав КЗО, а $k_{H\alpha} = A_{H\alpha}/A_V$ и $k_{H\beta} = A_{H\beta}/A_V$ — коэффициенты селективного поглощения света в эмиссионных линиях $H\alpha$ и $H\beta$. В качестве непокрашенного бальмеровского декремента $(I_{H\alpha}/I_{H\beta})_{\text{intr}}$ нами приняты теоретические значения из работы Остерброка (1989). В тех случаях, когда для определения величин электронной концентрации n_e и температуры T_e спектральных данных было недостаточно, мы принимали $n_e = 100 \text{ см}^{-3}$ и $T_e = 10\,000 \text{ К}$. Оценки показывают, что в гигантских областях ионизованного водорода максимально возможные отклонения реальных значений n_e и T_e от принятых величин приводят к ошибке в межзвездном поглощении около $\pm 0^m 15$, т.е. равны по порядку величины ошибке измерений интегральных показателей цвета. Для учета поглощения в Галактике были использованы величины A_V из каталога Вокулера и др. (1976).

Мы использовали закон поглощения света для Млечного Пути (Карделли и др., 1989). Хотя кривые поглощения света в разных галактиках могут заметно различаться (Гордон и др., 2003), но эти

различия существенны в коротковолновой области спектра. В более длинноволновой области, где лежат обе линии, $H\alpha$ и $H\beta$, которые использовались для определения межзвездного поглощения из наблюдаемой величины бальмеровского декремента, различия в кривых поглощения в разных галактиках незначимы. Влияние же обнаруженных небольших различий существенно меньше ошибок измерений интегральных цветов КЗО.

Исследованные в данной работе комплексы звездообразования (КЗО) представляют собой единый конгломерат облаков межзвездной пыли, ионизованного водорода и вновь образованных звездных скоплений. Большая часть света, излученная звездами, входящими в КЗО скоплений, претерпевает поглощение внутри самого комплекса, а не за его пределами. Поэтому, если КЗО содержит значительный объем межзвездной пыли, то свет от звезд КЗО сильно ослабляется, даже если материнская галактика видна “плашмя”.

Ранее Сахибовым и Смирновым (1990) на примере 96 КЗО с измеренными спектрами в галактиках NGC 2403, NGC 2903, NGC 4038/39, NGC 5194 было показано, что вклад 18 основных эмиссионных линий ионизованного газа в полосах UBV не превышал обычно 5% от полной величины наблюдаемого потока. Даже в случае NGC 4038/39 — системы взаимодействующих галактик со вспышкой звездообразования — вклад эмиссионных линий газа в континуум был меньше 7%.

Завышение потоков в отдельных полосах B и V на одинаковую величину (например, на максимальную величину 5%) не отразится на распределении КЗО на рассмотренной нами диаграмме возраст–цвет. Объекты из галактики NGC 4038/39 были исключены из рассмотрения на основании аномальности процессов звездообразования в ней. На второй, рассмотренной в данной работе диаграмме цвет–величина, эффект от отсутствия вычета вклада эмиссионных линий будет скрыт значительно худшей точностью измерений самих потоков и расстояний до галактик. Исходя из этого, мы отказались от исправления наблюдаемых интегральных потоков от вклада эмиссионных линий ионизованного газа. Это позволило нам существенно расширить выборку объектов, так как не для всех КЗО в других галактиках были проведены спектральные наблюдения. Так как в работе сравниваются выборки объектов, а не объекты в отдельности, то такой подход оправдывает цель работы.

Интегральные абсолютные величины КЗО вычислены на основе расстояний до материнских галактик КЗО из каталога Вокулера и др. (1976).

Статистика использованных галактик и КЗО

Галактика	Тип SIMBAD	Морфологический тип	Количество КЗО с известной фотометрией	Количество КЗО с известным возрастом
NGC 628 (M74)	G	Sc	6	4
NGC 1365	S1G	SBbc	11	8
NGC 1566	S1G	Ss...*	6	3
NGC 2403	G	Sc	15	11
NGC 2903	G	Sb/Sc	13	7
NGC 2997	G	Sc	10	0
NGC 3184	G	Sc	6	5
NGC 3351 (M95)	GiG	SBb	5	2
NGC 4038 (VV 245)	IG	Sc	15	6
NGC 4254 (M99)	HIIG	Sc	5	5
NGC 4303 (M61)	S2G	S...*	23	13
NGC 4321 (M100)	AGN	Sc	5	4
NGC 4395	S1G	Sd	4	0
NGC 4449	ELG	I...	19	10
NGC 5055 (M63)	LAG	Sbc	2	1
NGC 5194 (4C 47.36A)	S2G	Sc	16	5
NGC 5253	HIIG	I...	2	1
NGC 5457 (VV 344)	IG	Sc	5	2
NGC 6946	IG	Scd	7	6
БМО	G	Sm...*	11	9

* Спектральный тип.

Возрасты КЗО были определены из сравнения их четырех показателей цвета с сеткой эволюционных треков моделей ИНАСАН (Пискунов, Мякутин, 1996). Для каждого объекта вычислялась своя сетка эволюционных моделей с соответствующим для этого КЗО химическим составом, определенным из спектральных наблюдений КЗО. Подробнее о химическом составе исследованных объектов можно прочитать в работе Сахибова и Смирнова (2001).

Как показали численные эксперименты Гусева и др. (2007, 2008), обычно ошибка определения возраста составляет $\pm(0.2 \dots 0.3)$ dex и отражает случайные ошибки измерений показателей цвета и металличности.

Метод интерпретации наблюдаемого распределения энергии в спектре КЗО в физических терминах начальной функции масс, возраста и режима звездообразования и проверка точности метода с

помощью численных экспериментов описаны в работах Сахибова и Смирнова (2000, 2001), Гусева и др. (2007, 2008). Метод требует знания четырех показателей цвета, химического состава и бальмеровского декремента для данного КЗО.

Из 836 КЗО, для которых проведена многоцветная фотометрия, только 186 имеют все необходимые данные: показатели цвета $U-B$, $B-V$, $V-R$ и лаймановский индекс LCI , отражающий отношение потоков в лаймановском континууме и полосе B . Определение параметра LCI читатель может найти в работах Сахибова и Смирнова (1999, 2000). Однозначное решение задачи определения параметров начальной функции масс (НФМ) и скорости звездообразования (СЗО) получено Сахибовым и Смирновым (2004) для 102 объектов из 18 галактик.

Типы и статистика использованных в настоящей работе объектов приведены в таблице.

РАССЕЯННЫЕ ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ
МЛЕЧНОГО ПУТИ

Наша выборка РЗС содержит 650 рассеянных скоплений и компактных ассоциаций Млечного Пути (Харченко и др., 2005а, б), которые идентифицированы во всенебесном сводном каталоге 2.5 миллионов звезд ASCC-2.5, полном до $V \approx 11^m.5$ (Харченко, 2001). Члены скоплений отобраны на основании комбинированной вероятности принадлежности к скоплению, вычисленной с учетом координат, собственных движений и фотометрии в системе BV . Наиболее вероятные члены скоплений определены как звезды, собственные движения и фотометрические данные которых отличаются от соответствующих средних значений не более, чем на единицу ошибки этих данных (1σ -члены). Такие члены скоплений использованы для определения однородных динамических, эволюционных и астрофизических параметров РЗС, включая их возрасты, избытки цвета $E(B-V)$ и модули расстояния.

Недавно мы определили методом суммирования индивидуальных светимостей интегральные величины этих скоплений:

$$I(V) = -2.5 \lg \left(\sum_i^N 10^{-0.4V_i} + 10^{-0.4\delta I(V)} \right).$$

Здесь N и V_i — количество и видимые величины наиболее вероятных членов, $\delta I(V)$ — поправка за “невидимые звезды”, введенная для создания однородной шкалы интегральных параметров. Так как интегральные величины в основном определяются ярчайшими членами, то поправки $\delta I(V)$ малы, для 90% скоплений $\delta I(V) < 0^m.3$. Детали метода построения однородной шкалы интегральных фотометрических параметров РЗС в полосах $BVJHK_s$ можно найти в работе Харченко и др. (2009).

Интегральные абсолютные величины и истинные показатели цвета РЗС мы вычислили как

$$\begin{aligned} I(M_B) &= I(B) - (B-M_B), \\ I(M_V) &= I(V) - (V-M_V), \\ I(B-V)_0 &= I(M_B) - I(M_V), \end{aligned}$$

где $I(B)$ — видимая интегральная величина скопления в полосе B , определяемая аналогично $I(V)$, $(B-M_B)$ и $(V-M_V)$ — модули расстояния в полосах B и V . Межзвездное поглощение света принято как $A_B = 1.323A_V$, $A_V = 3.1E(B-V)$.

Для оценки точности определения интегральных фотометрических параметров мы сравнили их с литературными данными для общих с нашими РЗС, 96 из которых нашли в работе Баттинелли и др. (1994) и 73 в работе Лата и др. (2002). При

сравнении обнаружилось, что величины, взятые из литературы, на $\approx 0^m.5$ ярче наших. Это связано с тем, что и Баттинелли и др. (1994), и Лата и др. (2002) определяли интегральные параметры с отбором членов скоплений, в основном, по данным фотометрии. Лишь там, где это было возможно, к отбору привлекались кинематические данные, но этот критерий не охватывал все звезды во всех скоплениях. Поэтому яркие звезды переднего фона не были полностью исключены этими авторами, что привело к фиктивному поярчанию интегральных величин, взятых из литературы. После исключения систематических различий, на основании разброса разностей наших и параметров, взятых из литературы, мы оценили ошибки определения $I(M_V)$ и $I(B-V)_0$ как $\pm 0^m.6$ и $\pm 0^m.2$ соответственно. Эти цифры практически совпадают с теми ($\pm 0^m.5$ и $\pm 0^m.2$), которые Сагар и др. (1983) получили на основании анализа бюджета ошибок, вносимых неточностями участвующих в определении интегральных параметров данных: ошибки наблюдений, учет межзвездной экстинкции, ошибки расстояния и т.д. Такое совпадение указывает на то, что наши оценки ошибок, по-видимому, соответствуют действительности.

В дальнейшем мы рассматривали два скопления NGC 869 и NGC 884 (h Per и χ Per) как одну систему. В проекции на небо эти скопления существенно перекрываются коронами и имеют больше 50% общих наиболее вероятных членов. Поэтому наша окончательная выборка содержит 649 объектов. Эта выборка была разделена на три группы в соответствии с эволюционным статусом наиболее вероятных членов скоплений: группа 1 — 141 скопление, в которых не наблюдаются звезды краснее правой границы главной последовательности (ГП); в группе 2 из 217 скоплений есть звезды, пересекающие эту границу, но не достигшие области красных гигантов; 291 скопление с красными гигантами отнесены к группе 3. Необходимые для этого разделительные линии на диаграмме цвет—звездная величина построены на основании системы изохрон солнечного химического состава, рассчитанных падуанской группой (Мариго и др., 2008).

СРАВНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ
ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ КЗО И РЗС
МЛЕЧНОГО ПУТИ

Интегральные показатели цвета КЗО и РЗС исправлены за межзвездное поглощение, как описано выше. На рис. 1 представлена диаграмма $\lg t - I(B-V)_0$ для 649 РЗС нашей Галактики и 102 КЗО из 18 спиральных и неправильных галактик. На рисунке показаны также эволюционные последовательности моделей КЗО ИНАСАН

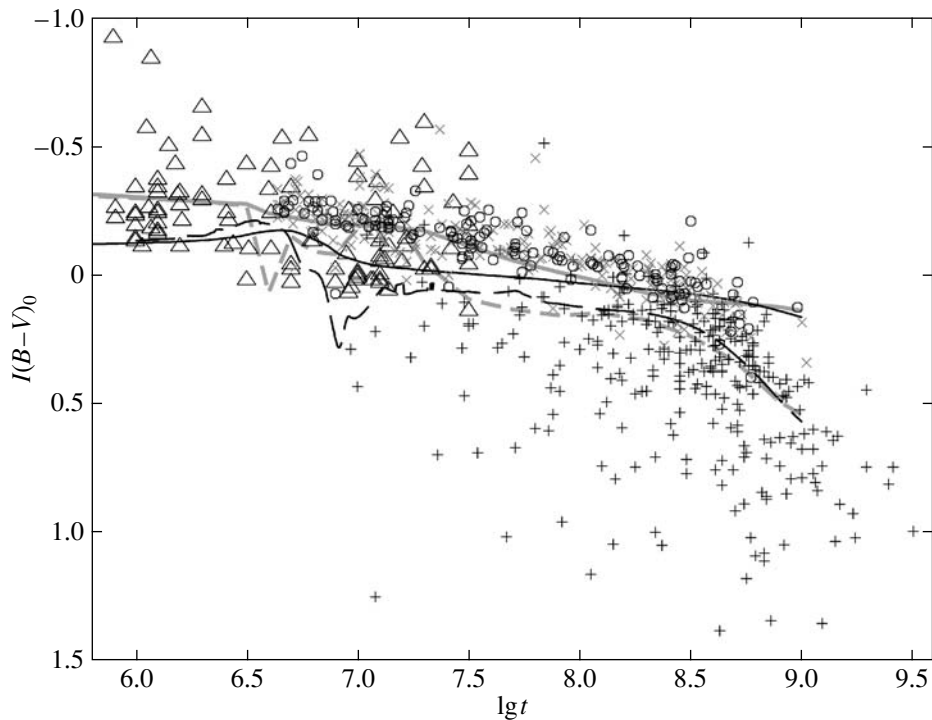


Рис. 1. Изменение с возрастом интегральных показателей цвета для КЗО в галактиках и РЗС Галактики. Показатели цвета КЗО исправлены за межзвездное поглощение по наблюдаемому бальмеровскому декременту A_V (Balmer). Треугольники — КЗО; кружки — РЗС, в которых ни одна звезда еще не покинула полосу главной последовательности, кресты — РЗС, в которых ни одна звезда еще не достигла области красных гигантов; плюсы — РЗС, в которых хотя бы одна звезда находится в области красных гигантов. Толстые линии изображают поведение модели ИНАСАН, тонкие линии — модели SB99. Сплошными и штриховыми линиями показаны модели с непрерывным и мгновенным звездообразованием соответственно. Для целей сравнения параметры моделей одинаковы: $m_{\max} = 60m_{\odot}$, $\alpha = 2.35$, $Z = 0.02$. В моделях с непрерывным звездообразованием темп звездообразования не зависит от времени.

(Пискунов, Мякутин, 1996), являющиеся базовыми в наших исследованиях КЗО, и моделей галактик с активным звездообразованием SB99 версии 5.1 (Васкез, Лайтерер, 2005), адаптированных на случай КЗО. Обе последовательности рассчитаны для одинаковых параметров звездообразования, что обеспечивает прямое сравнение. Видно, что эволюционная последовательность моделей ИНАСАН с солпитеровской начальной функцией масс и солнечным химическим составом проходит посередине облака рассеяния молодых КЗО на рис. 1, тогда как последовательность SB99 систематически смещается относительно них на $\approx 0^m2$.

Причина этого смещения кроется, по-видимому, в различной населенности РЗС и КЗО, с одной стороны, и галактик в целом, с другой стороны, для которых и рассчитывались эволюционные модели SB99. Более подробно мы затронем эту тему в следующем разделе.

Из рис. 1 видно, что при коррекции покраснения с помощью бальмеровского декремента (прямой метод, основанный на спектральных наблюдениях КЗО) показатели цвета более молодых (КЗО) и более старых (РЗС) объектов плавно переходят

друг в друга. Такой плавный переход, по-видимому, указывает на то, что по мере исчезновения ионизирующих межзвездный газ массивных ОВ-звезд, и по мере истощения самого газа комплекс звездообразования можно рассматривать как одно или несколько отдельных молодых РЗС. То есть РЗС являются следующей стадией эволюции КЗО и обе группы объектов представляют единую эволюционную последовательность.

Этот качественный вывод подтверждается статистической оценкой. Для объектов из перекрывающегося диапазона возрастов (57 КЗО и 180 РЗС с $\lg t = 6.6 \dots 7.5$) средний показатель цвета $I(B-V)_0$ составляет -0.15 ± 0.02 для КЗО и -0.17 ± 0.01 для РЗС. Если учесть, что типичная ошибка интегрального показателя цвета КЗО составляет $\pm 0^m2$, то можно рассматривать полученные средние значения как заведомо совпадающие.

На рис. 2 показана диаграмма цвет–величина для КЗО в галактиках и РЗС Галактики. Специально помечены объекты с $\lg t < 7.5$ ($t < 32$ млн. лет) — максимальный возраст, определенный для КЗО; и с $\lg t < 6.81$ ($t < 6.5$ млн. лет) — возраст, старше которого начинают наблюдаться

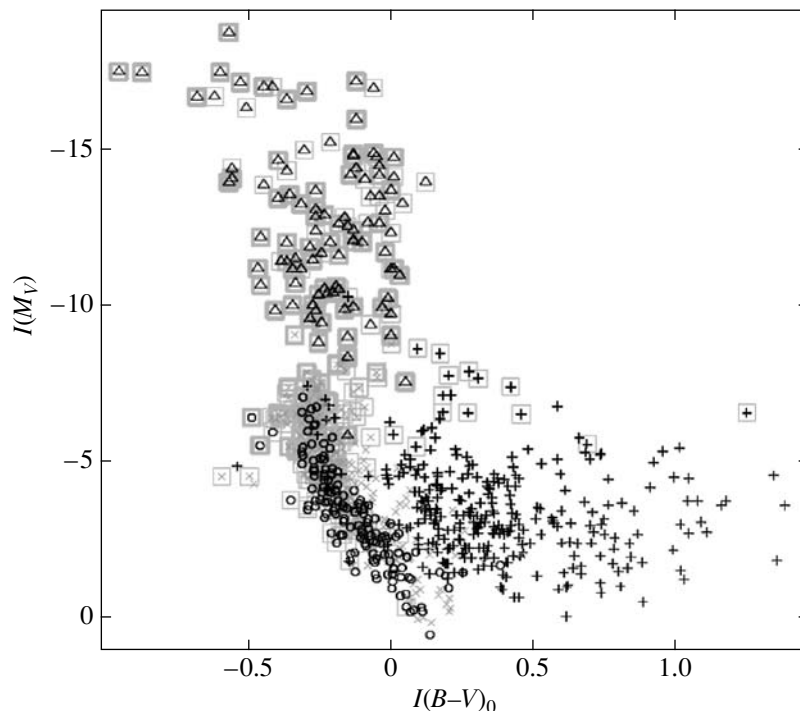


Рис. 2. Диаграмма цвет—звездная величина для интегральных параметров КЗО в галактиках и РЗС в Млечном Пути. Показатели цвета КЗО исправлены за межзвездное поглощение по наблюдаемому бальмеровскому декременту A_V (Balmer). Обозначения символов как на рис. 1; дополнительно: объекты с $\lg t < 7.5$ ($t < 32$ млн. лет) помещены в тонкие квадраты, а объекты с $\lg t < 6.81$ ($t < 6.5$ млн. лет) — в жирные квадраты.

скопления с красными гигантами. Как и на рис. 1, видно, что КЗО в галактиках и РЗС Млечного Пути образуют непрерывную последовательность. Некоторый недостаток КЗО в интервале величин $8 \dots 10^m$ обусловлен селекцией наблюдений. Эта диаграмма показывает гипотетический вид диаграммы цвет—величина, который будет наблюдаться в удаленных галактиках, когда глубина современных внегалактических обзоров возрастет примерно на 10^m .

Большая дисперсия интегральных цветов КЗО обусловлена как ошибками измерений цветов, так и естественной дисперсией физических характеристик КЗО. Основным источником ошибок измерений интегральных цветов КЗО является точность учета вклада подложки родительской галактики в излучение КЗО. Ошибка измерения величины межзвездного покраснения $\pm 0^m.3$ увеличивает ошибку измерения интегрального цвета КЗО еще примерно на 20%.

ПРОБЛЕМА УЧЕТА ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА ДЛЯ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Среди исследователей внегалактических КЗО распространено мнение, что излучение населяющих их звезд поглощается в межзвездной среде комплекса слабее, чем эмиссионное излучение

в линиях ионизированного водорода, окружающего звездные скопления в КЗО. Это мнение основано на двух фактах.

Во-первых, при сравнении наблюдаемого распределения энергии в спектрах КЗО и в спектрах галактик в целом с синтетическими спектрами эволюционных моделей (Майц-Апельяниц и др., 1998; Мас-Хессе, Кунт, 1999; Кид Фернандес и др., 2005; Гусев и др., 2007) величина межзвездного поглощения света рассматривается как искомая, которая определяется путем мультивариационного анализа. Эта величина получается подгонкой наблюдаемых показателей цвета (спектрального распределения энергии) к синтетическим показателям (синтетическим спектрам) нескольких эволюционных последовательностей моделей, вычисленных для соответствующих принятых значений металличности и охватывающих широкий диапазон изменения возрастов. При таком подходе вариации наблюдаемых фотометрических величин звездных скоплений или галактик относят в основном к вариациям возраста, поглощения и химического состава. При этом остаются нерешенными проблемы вырождения “возраст—поглощение” и “возраст—химический состав”, обсуждаемые в обзоре Скало (1986). Кроме того, косвенные оценки величины межзвездного поглощения света зависят от

калибровок светимости звезд в разных фотометрических полосах, использованных при вычислениях синтетических спектров звездных скоплений. Заметим, что все три перечисленных фактора, вносящие неопределенность в косвенные оценки величин межзвездного поглощения, имеют систематический характер. При сравнении полученных таким образом косвенных оценок (назовем их “модельными” величинами межзвездного поглощения света звезд $A_V(\text{stars})$) с величинами межзвездного поглощения, вычисленными из наблюдаемой величины бальмеровского декремента $A_V(\text{Balmer})$ (см. формулу (1)) оказывалось, что последние систематически на $\approx 30\%$ больше. Так как модельные значения межзвездной экстинкции определяются из сравнения интегральных показателей цвета звездных скоплений с синтетическими показателями цвета моделей скоплений в континууме, то делается вывод, что излучение звезд в КЗО, возможно, претерпевает меньшую экстинкцию по сравнению с излучением ионизованного газа.

Во-вторых, косвенным аргументом в пользу этого предположения служил наблюдательный факт, что для большего числа внегалактических областей НII значение поглощения, определенное из отношения излучения газа в радиоконтинууме к излучению газа в линии H_α , систематически превышает поглощение, вычисленное из наблюдаемого бальмеровского декремента $A_V(\text{radio}) > A_V(\text{Balmer})$ (Исраэл, Кенникат, 1980; Виаллефонд и др., 1982).

Однако всестороннее сравнение наблюдаемых потоков от КЗО в Большом Магеллановом облаке в линиях H_α и H_β с потоком в радиоконтинууме в линии 21 см и с фотометрическими измерениями звезд КЗО в полосах UBV показало, что определенные из радионаблюдений избытки цвета систематически больше избытков, вычисленных по бальмеровскому декременту: $E(B-V)(\text{radio}) > E(B-V)(\text{Balmer})$, тогда как $E(B-V)(\text{stars}) \approx E(B-V)(\text{Balmer})$ (Каплан, Дехарвенг, 1986).

Представим альтернативную картину, когда действительно существует систематическое различие между “газовой” и “звездной” экстинкциями и $E(B-V)(\text{Balmer}) > E(B-V)(\text{stars})$. В случае такого альтернативного способа учета межзвездного поглощения КЗО смещаются в красную область относительно галактических скоплений, и гипотеза об их генетической связи с РЗС теряет свою очевидность. В противоположность РЗС, КЗО в этом случае лучше согласуются с модельным треком SB99 (да и с другими современными моделями). Надо отметить, что не все модели и не для всех возрастов предсказывают слишком красные показатели цвета звездных скоплений. В

качестве примера здесь приведены эволюционные кривые ИНАСАН.

Возникающие при этом систематические отличия между КЗО и РЗС вряд ли можно рассматривать как результат несовпадения физических характеристик (например, металличности, содержания гелия, наклона НФМ и др.) КЗО в других галактиках и РЗС в Млечном Пути. Выборка КЗО представляет 18 разных галактик и их параметры скорее случайным образом отличаются как друг от друга, так и от параметров звездных группировок в Млечном Пути. Поэтому получившийся гипотетический скачок не может быть связан со скачком физических характеристик в диске Галактики. Так как мы считаем население Галактического диска типичным, мы предполагаем более вероятным существование единой последовательности областей звездообразования и РЗС, а возникающие разрывы при использовании “модельных” $A_V(\text{stars})$ — следствием неадекватности методики исправления цветов за межзвездное поглощение. Подтверждением нашего вывода может служить наблюдательный результат Каплана и Дехарвенга (1986) для внегалактических КЗО.

Как видим, правильный учет межзвездной экстинкции играет ключевую роль не только при выборе адекватной фотометрической модели, позволяющей определить параметры звездообразования в КЗО, но и для правильного понимания места КЗО в эволюционной цепочке звездных населений в галактиках.

Систематическое смещение эволюционных моделей от положения КЗО и РЗС можно, по видимому, объяснить следующим образом. Модели SB99, как и все другие модели эволюционного синтеза, представляют диаграммы Г—Р звездного населения в непрерывном приближении, которое трактует изохрону как сплошную последовательность. Для многочисленного звездного населения галактик, где звезды плотно населяют даже верхнюю часть диаграммы Г—Р, такое предположение оправданно. В случае КЗО и РЗС, население которых меньше на много порядков, распределение их членов по массам в верхней части диаграммы существенно дискретно. Это приводит к тому, что уже проэволюционировавший красный сверхгигант после окончания своей эволюции не замещается сразу следующей по массе звездой, которая еще не скоро уйдет с главной последовательности. Отсутствие же красных сверхгигантов в КЗО или РЗС делает их интегральные цвета голубее по сравнению с цветами галактик и/или моделей эволюционного синтеза аналогичного возраста. Для правильного воспроизведения интегральных цветов модели звездных скоплений должны быть построены с учетом дискретности верхних частей их диаграмм Г—Р.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулируем основные выводы работы.

Внегалактические КЗО, видимые как гигантские области ионизованного водорода, и РЗС Галактики представляют единую эволюционную последовательность объектов, находящихся в разной стадии своего развития.

Разрыв между фотометрическими параметрами КЗО и РЗС, возникающий на диаграмме возраст—показатель цвета при исправлении покраснения с помощью косвенных, модельных оценок, предполагающих систематическое различие между “газовой” и “звездной” экстинкциями, связан с неадекватностью метода, а не с пекулярностью РЗС Млечного Пути по отношению к населению других галактик.

Из этого следует, что модельные оценки поглощения света во внегалактических КЗО, полученные подгонкой наблюдаемого спектрального распределения энергии к синтетическим спектрам, по-видимому, являются заниженными на 30–40% по сравнению с истинными величинами. Источниками такого систематического занижения могут служить систематические эффекты вырождения “возраст—поглощение” и “возраст—металличность”, а также использованные при построении теоретических моделей калибровки.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 06–02–16379, 07–02–00792, 07–02–91566 ННАО, 08–02–01323), Немецкого исследовательского общества DFG (грант 436 RUS 113/757/0–2) и гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК–4818.2007.2. Мы признательны рецензентам А.В. Локтину (УрГУ) и А.С. Расторгуеву (ГАИШ) за замечания, способствовавшие улучшению статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баттинелли и др. (P. Battinelli, A. Brandimarti, and R. Capuzzo-Dolcetta), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **104**, 379 (1994).
2. Васкез, Лайтерер (G.A. Vázquez and C. Leitherer), *Astrophys. J.* **621**, 695 (2005).
3. Виаллефонд и др. (F. Viallefond, W.M. Goss, and R.J. Allen), *Astron. Astrophys.* **115**, 373 (1982).
4. Вокулер и др. (G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, and H.G. Corwin), *The Second Reference Catalogue of Bright Galaxies (RC2)* (Austin: Univ. Texas Press, 1976).
5. Гордон и др. (K.D. Gordon, G.C. Clayton, K.A. Missett, et al.), *Astrophys. J.* **594**, 279 (2003).
6. Гусев А.С., Мякутин В.И., Пискунов А.Э. и др., *Астрон. журн.* **85**, 794 (2008).
7. Гусев А.С., Мякутин В.И., Сахибов Ф.Х. и др., *Астрон. журн.* **84**, 266 (2007).
8. Ефремов Ю.Н., *Очаги звездообразования в галактиках* (М.: Наука, 1989).
9. Ефремов (Yu. Efremov), *Astron. J.* **110**, 2757 (1995).
10. Исраэл, Кенникат (F.P. Israel and R.C. Kennicutt), *Astrophys. Lett.* **21**, 81 (1980).
11. Каплан, Дехарвенг (J. Caplan and L. Deharveng), *Astron. Astrophys.* **155**, 297 (1986).
12. Карделли и др. (J.A. Cardelli, G.C. Clayton, and J.S. Mathis), *Astrophys. J.* **345**, 245 (1989).
13. Кид Фернандес и др. (R. Cid Fernandes, A. Mateus, L.Jr. Sodre, et al.), *MNRAS* **358**, 363 (2005).
14. Лата и др. (S. Lata, A.K. Pandey, R. Sagar, et al.), *Astron. Astrophys.* **388**, 158 (2002).
15. Майц-Апельяниц и др. (J. Maiz-Apellaniz, J. M. Mas-Hesse, C. Munoz-Tunon, et al.), *Astron. Astrophys.* **329**, 409 (1998).
16. Мариго и др. (P. Marigo, L. Girardi, A. Bressan, et al.), *Astron. Astrophys.* **482**, 883 (2008).
17. Мас-Хесце, Кунт (J.M. Mas-Hesse and D. Kunth), *Astron. Astrophys.* **349**, 765 (1999).
18. Остерброк (D.E. Osterbrock), *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei* (Mill Valley, CA: Univ. Sci. Books, 1989), 422 p.
19. Пискунов А.Э., Мякутин В. И., *Астрон. журн.* **73**, 520 (1996).
20. Сагар и др. (R. Sagar, U.C. Joshi, and S.D. Sinhal), *Bull. Astr. Soc. India* **11**, 44 (1983).
21. Сахибов Ф.Х., Смирнов М.А., *Астрон. журн.* **67**, 472 (1990).
22. Сахибов Ф.Х., Смирнов М.А., *Астрон. журн.* **76**, 419 (1999).
23. Сахибов, Смирнов (F. Sakhibov and M.A. Smirnov), *Astron. Astrophys.* **354**, 802 (2000).
24. Сахибов Ф.Х., Смирнов М.А., *Астрон. журн.* **78**, 3 (2001).
25. Сахибов Ф.Х., Смирнов М.А., *Астрон. журн.* **81**, 998 (2004).
26. Скало (J.M. Scalo), *Fundamen. Cosmic Phys.* **11**, 1 (1986).
27. Харченко Н.В., *Кинемат. и физ. небесных тел* **17**, 409 (2001).
28. Харченко и др. (N.V. Kharchenko, A.E. Piskunov, S. Röser, et al.), *Astron. Astrophys.* **438**, 1163 (2005a).
29. Харченко и др. (N.V. Kharchenko, A.E. Piskunov, S. Röser, et al.), *Astron. Astrophys.* **440**, 403 (2005b).
30. Харченко и др. (N.V. Kharchenko, A.E. Piskunov, E. Schilbach, et al.), *Astron. Astrophys.*, in press (2009).