

УДК 524.74:520.82; 524.35

## ЦВЕТА РОДИТЕЛЬСКИХ ГАЛАКТИК СВЕРХНОВЫХ С ГРАВИТАЦИОННЫМ КОЛЛАПСОМ

© 2015 Г. Д. Полякова\*

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 8 сентября 2014 года; принята в печать 18 декабря 2014 года

С использованием данных разных каталогов были определены показатели цвета родительских галактик типов E, L и S0/a сверхновых с гравитационным коллапсом. Они сравнивались с цветами галактик тех же морфологических типов, но в которых вспышки таких сверхновых не наблюдались. Показано, что в области голубой последовательности диаграммы «цвет–величина» сравниваемые выборки галактик с вероятностью  $P = 95\%$  различаются по относительным частотам показателей цвета  $(U - B)_{Tc}^0$  и  $(U - B)_T^0$  в интервалах от  $-0^m.1$  до  $-0^m.01$  и от  $0^m.1$  до  $0^m.19$ . Различие относительных частот с вероятностью  $P = 99\%$  было получено также для цветов  $(B - V)_{Tc}^0$  и  $(B - V)_T^0$  интервала  $0^m.5 - 0^m.59$ . Вычисленные средние цвета этих интервалов для галактик обеих выборок позволяют предположить наличие в них значительной доли молодого населения. Применение критерия Колмогорова–Смирнова показало, что цвета родительских галактик сверхновых с гравитационным коллапсом и галактик ранних типов без вспышек таких сверхновых с вероятностью  $95\%$  являются в среднем одинаковыми, и галактики не различаются по составу звездного населения.

Ключевые слова: галактики: фотометрия — галактики: звездный состав — сверхновые

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Сверхновые (SNe) типов Ibc и II и предсверхновые, которых имеют массу  $M > 8M_{\odot}$ , обычно наблюдаются в спиральных и неправильных галактиках и редко — в галактиках ранних типов. Согласно [1–3], в однородной выборке из 604 SNe, открытых при выполнении программ LOSS и LOTOSS, только семь сверхновых этих типов наблюдались в эллиптических и линзовидных галактиках. Морфологические типы родительских галактик этих семи объектов в системе DDO определялись в [1–3] по снимкам низкого разрешения с автоматического телескопа КАИТ ( $D = 0.76$  м) и по негативам, полученным при проведении обзоров POSS I и POSS II. Поэтому авторы считали классификацию галактик неопределенной во всех семи случаях. Они также считали важным получение изображений родительских галактик сверхновых SN 2004V и SN 2004X большими телескопами или HST для уточнения их классификации и исследования подтипов населений молодых массивных звезд в этих галактиках очень ранних типов: E0 и E3. Другой метод проверки их заключений может состоять в измерении интегральных цветов всех галактик ранних типов из выборки [1–3] и определении возможного отличия родительских галактик

SNe Ibc и II от всех других, в которых вспышки таких сверхновых не наблюдались.

Позднее Хакобьяном и др. [4] из каталога ASC [5] были отобраны еще шестнадцать сверхновых типов Ibc и II, открытых в галактиках E и S0 [6]. После проверки классификации двадцати двух родительских галактик ранних типов сверхновых с гравитационным коллапсом (CCSNe) авторы переопределили морфологические типы девятнадцати из них. Прежняя классификация была сохранена только у трех галактик, две из которых — NGC 4579 и NGC 2768 — оказались эллиптической и линзовидной галактиками с активными ядрами типа LINER. Третья галактика — эллиптическая галактика NGC 2274, взаимодействующая с NGC 2275 и образующая с ней изолированную пару [7]. Авторы подтвердили открытие ограниченного числа сверхновых Ibc и II типов в E и S0 галактиках, в которых наблюдались следы недавнего звездообразования, вызванного процессами слияния или гравитационного взаимодействия.

Другой важной физической характеристикой галактик является цвет, определяемый доминирующей частью их звездного населения [8]. Поэтому для большого числа галактик существует корреляция между их морфологическими типами и показателями цвета  $(B - V)_0$  и  $(U - B)_0$ , которые

\*E-mail: gapola@yandex.ru

Таблица 1. Сравнение показателей цвета  $(U - B)_T^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0$ 

SNe	RC3					Other sources		References
	Hosts	m. t.	$B_T$	$(B - V)_T$	$(U - B)_T$	$(B - V)_{Tc}$	$(U - B)_{Tc}$	
1986M Ib	NGC 7499	LAS0	13.94	1.11	0.43	$1.03 \pm 0.07$	$0.57 \pm 0.12$	[15]
1990I Ib	NGC 4650A	S..0P	13.90					
1997X Ic	NGC 4691	RSBS0P	11.66	0.58	-0.07	$0.54 \pm 0.06$	$-0.06 \pm 0.06$	[15, 16]
2000ds Ib	NGC 2768	E6	10.84	0.97	0.46	$1.01 \pm 0.07$	$0.50 \pm 0.09$	[15, 16]
2002jj Ic	IC 340	DL..0	14.36*			$0.83 \pm 0.06$	$0.19 \pm 0.09$	[15]
2003ih Ibc	UGC 2836	L	13.40			$1.04 \pm 0.07$	$0.33 \pm 0.13$	[15]
2004gv Ib	NGC 856	PSAT0	14.13			$0.89 \pm 0.07$	$0.47 \pm 0.14$	[15]
2005E Ibc	NGC 1032	S..0	12.64	1.00	0.47	$1.01 \pm 0.08$	$0.49 \pm 0.14$	[15]
2005cz Ib	NGC 4589	E2	11.69	0.96		$0.90 \pm 0.03$	$0.55 \pm 0.02$	[17]
2006lc Ic:	NGC 7364	S..0P	13.56			$0.98 \pm 0.08$	$0.36 \pm 0.13$	[15]
2007aw Ic	NGC 3072	S..0?	13.73					
2007ke Ib	NGC 1129	E	13.50			$1.02 \pm 0.07$	$0.55 \pm 0.10$	[17]
2007kj Ibc	NGC 7803	S..0	14.60			$0.90 \pm 0.07$	$0.21 \pm 0.13$	[15]
2009dt Ic	IC 5169	PLXR	13.74					
2009gf Ic	NGC 5525	L	13.80	0.96	0.51	$0.99 \pm 0.06$	$0.49 \pm 0.11$	[15]
2010ig Ib	UGC 1306	RLX0	14.56			$1.00 \pm 0.07$	$0.56 \pm 0.12$	[15]
2012cw Ic	NGC 3166	SXT0	11.32	0.93	0.40	$0.93 \pm 0.04$	$0.38 \pm 0.02$	[17]
2012hn Ic	NGC 2272	LXS	12.74			$0.97 \pm 0.02$	$0.46 \pm 0.01$	[17]
1989R II <sub>n</sub>	UGC 2912	S..0	16.18*					
1999eg II	IC 1861	LA.0	14.33					
1999ew II	NGC 3677	PSAR0	13.30			$0.88 \pm 0.07$	$0.21 \pm 0.13$	[15]
2000fm II:	NGC 1612	SBR0	14.85*					
2001I II <sub>n</sub>	UGC 2836	L	13.40			$1.04 \pm 0.07$	$0.33 \pm 0.13$	[15]
2001hh II	MCG-2-57-22	PLB0?	14.49*					
2002aq II	MCG-1-7-35	LBR+P	15.71*			$0.91 \pm 0.06$	$0.42 \pm 0.11$	[15]
2003hr II	NGC 2551	SAS0	13.10	0.93			$0.15 \pm 0.06$	[16]
2004gh II	ESO 500-34	RSBS0	14.44*					
2005H II	NGC 838	LAT0P	13.57	0.62	-0.08	$0.75 \pm 0.06$	$-0.11 \pm 0.06$	[15]
2005md II:	NGC 2274	E	13.10					
2006du II	IC 1529	PLAR0P	14.49*					
2006ee II <sub>n</sub>	NGC 774	L	13.97			$1.02 \pm 0.07$	$0.48 \pm 0.11$	[15, 16]
2006gy II <sub>n</sub>	NGC 1260	S..0	14.32			$1.03 \pm 0.08$	$0.54 \pm 0.15$	[15]
2008et II	ESO 283-4	SAR0	14.69					
2009C II <sub>b</sub>	UGC 12433	SB.0	15.69*					
2009ah II <sub>b</sub>	ESO 171-4	LXR0?	13.58					
2009ju IIP	UGC 3285	E?	15.43*					
2010ck II	MCG+6-31-61	L?	15.12			$0.94 \pm 0.06$	$0.39 \pm 0.11$	[15]
2010jr II <sub>b</sub>	ESO 362-18	SBS0P	13.81					
2011hs II <sub>b</sub>	IC 5267	SAS0	11.43	0.89	0.37	$0.89 \pm 0.03$	$0.35 \pm 0.02$	[17]
2012D IIP	PGC 44486	L	15.58			$0.57 \pm 0.05$	$-0.08 \pm 0.08$	[15]
2012Y II <sub>n</sub>	PGC 16138	LBT0	14.4*					
2012cl IIP	ESO 263-23	SA.0	13.84					
2012hs II	ESO 213-2	LAR	14.5*					

могут характеризовать текущий темп звездообразования [9–11].

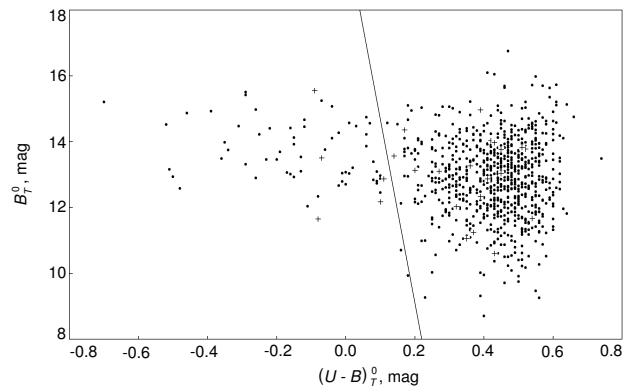
К концу 2012 года было открыто более сорока SNe Ibc и II типов в галактиках E, L и S0/a. Не для всех из них были известны цвета. Их определение является целью данной работы. Знание цветов позволит изучить возможное различие между родительскими галактиками ранних типов, в которых наблюдались CCSNe, и галактиками ранних типов, в которых не наблюдались вспышки таких сверхновых. Новые каталоги, появившиеся благодаря проведению многочисленных обзоров неба и содержащие большие массивы результатов однородных высокоточных фотометрических наблюдений звезд и галактик, позволяют это сделать.

Статья имеет следующую структуру. После введения (раздел 1) описана база данных (раздел 2), включающая выборки родительских галактик сверхновых с гравитационным коллапсом и галактик ранних типов с известными показателями цвета без вспышек таких сверхновых. Данные о цветах и полных звездных величинах галактик этих выборок использовались при построении диаграмм «цвет–величина» и двухцветной. Полученные результаты анализа относительных частот распределений показателей цвета в сравниваемых выборках и сформулированные выводы приведены в разделах 3 и 4.

## 2. БАЗА ДАННЫХ

По данным каталога RC3 [6] была составлена выборка из 849 эллиптических, линзовидных и S0/a галактик с известными показателями цвета  $(B - V)_T$ ,  $(U - B)_T$  и числовыми индексами типов  $T$  от  $-6$  до  $0$ . В эту выборку включены галактики, в которых не наблюдались вспышки сверхновых Ibc и II типов (далее выборка ETG). Галактики типа S0/a включены в нее, поскольку они являются промежуточными между линзами S0 и спиральными Sa. В них наблюдаются слабо развитые спиральные рукава, большое отношение размеров балджа к диску и нет очевидных признаков наличия пыли [12]. Данные о цветах и полных звездных величинах галактик этой выборки использовались при построении диаграмм «цвет–величина»  $B_T^0 - (U - B)_T^0$  и двухцветной  $(U - B)_T^0 - (B - V)_T^0$ .

Из списков сверхновых Ibc и II типов, описанных нами в [13], мы отобрали соответственно 18 и 25 SNe обоих типов, открытых к концу 2012 г. в галактиках ранних типов (по классификации RC3). Они были открыты в 42 родительских галактиках. SN 2001H (тип IIp) и SN 2003ih (тип Ib/c) вспышки в одной галактике — UGC 2836. Для проверки аналогичные выборки таких CCSNe были составлены нами по данным каталогов ГАИШ и



**Рис. 1.** Диаграмма «цвет–величина» галактик ранних морфологических типов. Положения родительских галактик показаны крестиками. Наклонная линия разделяет красную и голубую последовательности галактик.

ASC [5, 14]. Проведенное сравнение полученных трех выборок не выявило существенного различия между ними.

Данные о цветах родительских галактик (помимо RC3) мы получили из следующих источников: каталога SDSS [15], атласа GALEX [16] и работы [17].

Собранные по этим источникам показатели цвета редуцировались в систему каталога RC3. Уравнения линейной регрессии, необходимые для этой процедуры, предварительно вычислялись отдельно для указанных морфологических типов каждого каталога, сравниваемого с RC3. Полученные уравнения регрессии приведены в [18]. Редуцированные в систему каталога RC3 показатели цвета  $(B - V)_{Tc}$  и  $(U - B)_{Tc}$  были определены для 24 родительских галактик.

Данные о сверхновых и их родительских галактиках приведены в таблице 1. В первой колонке указаны имя и спектральный тип SNe. В следующих пяти колонках последовательно указаны: имя родительской галактики, ее морфологический тип по каталогам [6] и [19] (последние помечены значком \*), величины  $B_T$  или  $m_B$ , показатели цвета  $(B - V)_T$  и  $(U - B)_T$ . Показатели цвета  $(B - V)_{Tc}$  и  $(U - B)_{Tc}$  для 24 галактик и соответствующие ссылки приведены в последних трех колонках. Наибольшее число (19) показателей цвета родительских галактик нами было получено из [15] и значительно меньше (4 и 5) — из каталогов [16, 17].

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 3.1. Диаграмма «цвет–величина» галактик ранних типов

Диаграмма «цвет–звездная величина»  $B_T^0 - (U - B)_T^0$  для галактик ранних типов приведена на рис. 1. На нем точками изображены 849

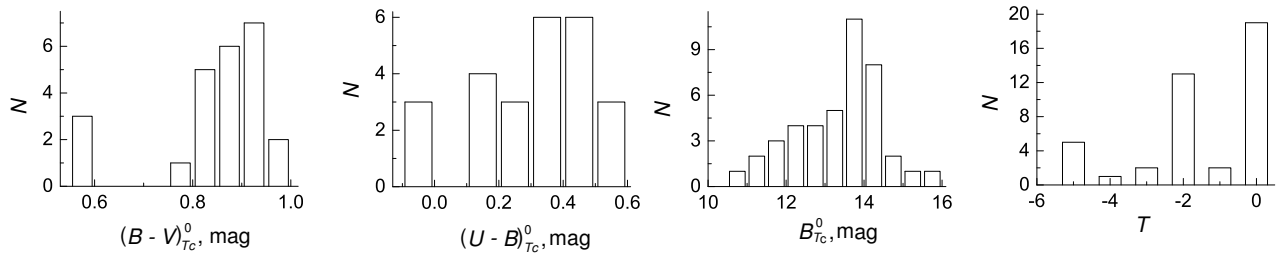


Рис. 2. Гистограммы распределения показателей цвета  $(B - V)_{Tc}^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0$ , величин  $B_{Tc}^0$  и морфологических типов  $T$  родительских галактик.

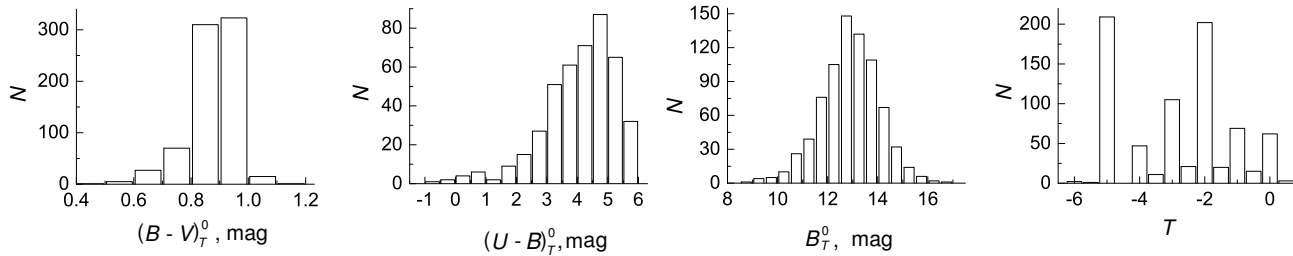


Рис. 3. То же, что на рис. 2 для галактик ранних типов, в которых не наблюдались вспышки сверхновых типов Ibс и II.

галактик, в которых не наблюдались вспышки сверхновых Ibс и II типов. Данные о них взяты из [6]. При построении диаграммы мы использовали полные (асимптотические)  $B_T^0$  величины, исправленные за покраснение, для исключения неопределенностей при определении расстояний до галактик. Крестиками на рис. 1 изображены родительские галактики рассматриваемых сверхновых. Их звездные величины и показатели цвета были исправлены за покраснение по методикам RC3. На рисунке галактики красной и голубой последовательностей [8] разделены линией, определяемой уравнением линейной регрессии:

$$B_T^0 = (12.92 \pm 0.03) - (0.35 \pm 0.09) \times (U - B)_T^0. \quad (1)$$

Оно вычислено по данным для 2230 галактик всех морфологических типов каталога RC3. На рис. 1 видно, что 19 родительских галактик попадают в область красной последовательности и пять — в область голубой последовательности. Это галактики NGC 4691 (AGN), NGC 838 (Mk 1022), PGC 44486 (Mk 57), UGC 2836 (Mk 1405) и NGC 2551 (Arak 162) морфологических типов L и S0/a. Отметим, что NGC 2551 — галактика высокой поверхностной яркости [20]. В RC3 и других часто цитируемых каталогах она классифицирована как SAS0, однако в каталоге UGC [21] и базе данных SIMBAD она отнесена к спиральям Sa и S соответственно. NGC 4691 и NGC 838 являются галактиками поля, а PGC 44486, UGC 2836 и NGC 2551 — членами групп галактик. Они

составляют около пятой части (0.22) родительских галактик с известными показателями цвета (24).

Так как показатели цвета родительских галактик  $(U - B)_{Tc}^0$  изменяются от  $-0^m1$  до  $+0^m6$ , то для дальнейшего анализа данных мы ограничились таким же диапазоном изменения показателей цвета  $(U - B)_T^0$  и в выборке ETG. В результате исключения самых «голубых» и самых «красных» объектов ее объем сократился до 779 галактик. Из них 752 галактики попадают в область красной последовательности и лишь небольшая часть — 27 галактик (около 4% выборки ETG) — в область голубой. Из них 10 — объекты с активными ядрами (AGN, Sy1, Sy2, IG, SBG, EmG, Mk).

На рис. 2 и 3 показаны гистограммы распределения показателей цвета, звездных величин, исправленных за покраснение, и морфологических типов  $T$  галактик. На рис. 2 видно, что распределения показателей цвета и величин  $B_T^0$  родительских галактик являются асимметричными. Поскольку объем выборки родительских галактик мал, то показатели асимметрии  $A$  и эксцесса  $E$  распределений этих величин не вычислялись.

Для галактик, в которых вспышки сверхновых не наблюдались, распределения показателей цвета так же асимметричны, а для величин  $B_T^0$  распределение нормальное. Вычисленные значения показателей асимметрии и эксцессов для цветов получились  $A = -1.06$  и  $E = 1.80$ ; для  $(B - V)_T^0$  и  $(U - B)_T^0$   $A = -1.26$  и  $E = 1.86$  соответственно. Для величин  $B_T^0$   $A = -0.24$  и  $E = +0.35$ .

**Таблица 2.** Сравнение показателей цвета  $(U - B)_T^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0$

Interval	$n_i$	$n_i/N_1$	$\phi_1$	$n_k$	$n_k/N_2$	$\phi_2$	$(\phi_1 - \phi_2)^2$	$\frac{(N_1 N_2)}{(N_1 + N_2)}$	$F$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
-0.1...-0.01	9	0.011	0.210	3	0.125	0.723	0.263	23.283	6.127
0.0-0.09	15	0.019	0.277	0	0	0	0.077		1.786
0.1-0.19	20	0.026	0.324	4	0.167	0.842	0.268		6.247
0.2-0.29	74	0.095	0.627	2	0.083	0.584	0.002		0.043
0.3-0.39	153	0.196	0.917	6	0.250	1.047	0.017		0.393
0.4-0.49	297	0.381	1.330	6	0.250	1.047	0.080		1.865
0.5-0.59	211	0.271	1.095	3	0.125	0.723	0.138		3.222

*3.2. Сравнение долей показателей цвета методом Фишера*

Анализ показателей цвета  $(U - B)_T^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0$  выборок ETG и родительских галактик мы начали с проверки их принадлежности одной генеральной совокупности. Проверка проводилась методом сравнения дисперсий средних цветов, которые получились равными  $\langle(U - B)_T^0\rangle = 0^m412 \pm 0^m124$  и  $\langle(U - B)_{Tc}^0\rangle = 0^m296 \pm 0^m192$ . Поскольку объемы выборок существенно различаются (779 и 24), значимость различия дисперсий определялась по критерию Фишера. Вычисленная величина  $F = 0.192/0.124 = 1.55$  получилась меньше табличного значения  $F_{05}(23/778) = 2$ . Отсюда следует, что дисперсии средних показателей цвета выборок ETG и родительских галактик не различаются на 5% уровне значимости. Сами выборки цветов  $(U - B)_T^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0$  с вероятностью 95% могут принадлежать одной и той же генеральной совокупности. Далее мы провели сравнение долей (относительных частот) показателей цвета методом Фишера. Этот метод позволяет сравнивать относительные частоты ( $p_1 = n_i/N_1$ ) и ( $p_2 = n_k/N_2$ ) в выборках разного объема, что обеспечивается их преобразованием в радианы по формуле  $\phi = 2 \arcsin \sqrt{p}$ . Сравнение полученных значений  $\phi_1$  и  $\phi_2$  проводилось посредством критерия Фишера ( $F$ ) по формуле

$$F = (\phi_1 - \phi_2)^2 \frac{N_1 N_2}{N_1 + N_2}, \quad (2)$$

где  $\phi_1, \phi_2$  — числа, полученные в результате преобразования долей в радианы, а  $N_1$  и  $N_2$  — объемы сравниваемых выборок. Полученные частоты  $n_i$  (выборка ETG) и  $n_k$  (выборка родительских галактик) распределений цветов  $(U - B)_T^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0$  по интервалам (колонка 1) приведены в колонках 2

и 5 таблицы 2. Величины  $n_i$  и  $n_k$  характеризуют частоту встречаемости показателей цвета в разных интервалах сравниваемых выборок галактик. Из таблицы 2 видно, что наибольшее число галактик имеют величины  $(U - B)_T^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0$  от  $0^m3$  до  $0^m5$ , и значительно меньшее — в других интервалах, что приводит к асимметрии в распределениях цветов. В таблице 2 вычисленные величины  $F$  (колонка 10) для интервалов от  $-0^m1$  до  $-0^m01$  и от  $0^m1$  до  $0^m19$  показателей цвета, относящихся в основном к голубой последовательности, получились равными 6.127 и 6.247. Они значительно больше табличного значения  $F_{05}$ , равного 3.86, и несколько меньше  $F_{01} = 6.69$  (уровни вероятности 95% и 99% соответственно) при числе степеней свободы  $\nu(1) = 1$  и  $\nu(2) = 779 + 24 - 2 = 801$ . Отсюда следует, что доли показателей цвета этих интервалов родительских галактик (0.125 и 0.167) с вероятностью 95% выше долей показателей цвета галактик ранних типов (0.011 и 0.026) (колонки 6 и 3). Последнее означает, что в области голубой последовательности диаграммы «цвет-величина» сравниваемые выборки галактик с вероятностью  $P = 95\%$  различаются по доле показателей цвета.

Для остальных интервалов цветов от  $0^m2$  до  $0^m59$  вычисленные величины  $F$  получились меньше табличного значения  $F_{05} = 3.86$ , поэтому можно считать, что для этих интервалов значимого и достоверного различия долей  $(U - B)_T^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0$  в сравниваемых выборках галактик не выявлено. Это означает, что в области красной последовательности сравниваемые выборки не различаются по доле показателей цвета.

Поскольку объемы сравниваемых выборок существенно различаются (779 и 24), мы провели дополнительное сравнение долей показателей цвета в выборках равного объема тем же методом Фишера. Для этого из 779 значений  $(U - B)_T^0$  были

**Таблица 3.** Сравнение показателей цвета  $(U - B)_T^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0$  выборок равного объема

Interval	$n_i$	$n_i/N_1$	$\phi_1$	$n_k$	$n_k/N_2$	$\phi_2$	$(\phi_1 - \phi_2)^2$	$\frac{(N_1 N_2)}{(N_1 + N_2)}$	$F$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
-0.1...-0.01	0	0	0	3	0.125	0.723	0.523	12	6.270
0.0-0.09	1	0.042	0.413	0	0	0	0.170		2.047
0.1-0.19	1	0.042	0.413	4	0.167	0.842	0.184		2.208
0.2-0.29	1	0.042	0.413	2	0.083	0.584	0.029		0.351
0.3-0.39	1	0.042	0.413	6	0.250	1.047	0.402		4.823
0.4-0.49	10	0.417	1.404	6	0.250	1.047	0.127		1.529
0.5-0.59	10	0.417	1.404	3	0.125	0.723	0.464		5.565

составлены 20 выборок, каждая объемом 24 случайным образом выбранных цветов. Полученные результаты приведены в таблице 3 для одной из выборок.

Как видно из таблицы 2, для интервалов показателей цвета  $-0^m1-0^m19$  частоты галактик ETG  $n_i$  невелики (9 и 20), поэтому в выборках, составленных случайным образом (таблица 3), они оказывались 0 или 1. Значимая величина  $F$  была получена для интервала показателей цвета  $0^m3-0^m39$ . В этом интервале доля  $n_k/N_2 = 0.25$  для родительских галактик получилась больше аналогичной доли  $n_i/N_1 = 0.042$  случайным образом выбранных галактик ETG. Действительно, вычисленное значение  $F = 4.82$  получилось больше табличного значения  $F_{05} = 4.05$  (уровень  $P = 95\%$  при числе степеней свободы  $\nu(1) = 1$  и  $\nu(2) = 46$ ). Этот случай оказался единственным из 20. Он показывает, что при сравнении выборок равного объема доля родительских галактик получилась выше доли «случайных» галактик ETG и в области красной последовательности.

Другая значимая величина  $F$  была получена для интервала показателей цвета от  $0^m5$  до  $0^m59$ . В этом случае вычисленное значение  $F = 5.56 > 4.05 = F_{05}$  (уровень  $P = 95\%$  при числе степеней свободы  $\nu(1) = 1$  и  $\nu(2) = 46$ ). Аналогичных случаев оказалось пять из двадцати. Кроме того, значимое различие долей показателей цвета было получено в трех случаях для интервала от  $0^m4$  до  $0^m49$ . Действительно, для этих интервалов показателей цвета частоты галактик ETG являются наибольшими (297 и 211 соответственно, таблица 2), поэтому в выборках, составленных случайным образом, они также оказываются наибольшими и больше частот родительских галактик.

Таким образом, в девяти из двадцати сравниваемых выборок равного объема (24 и 24) получено

значимое и достоверное различие долей родительских галактик CCSNe и галактик ETG с показателями цвета  $(U - B)_T^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0$  от  $0^m3$  до  $0^m59$  в области красной последовательности диаграммы цвет-величина.

В заключение можно сделать вывод о том, что различие долей показателей цвета  $(U - B)_T^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0$  родительских галактик CCSNe и галактик ранних типов ETG в голубой последовательности проявляется при анализе выборок разного объема, и в красной — при анализе выборок равного объема. Численный эксперимент со случайными выборками по крайней мере не противоречит заключению о различии долей родительских галактик в голубой области.

### 3.3. Средние значения показателей цвета

Далее мы сравнили средние значения показателей цвета  $(U - B)_T^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0$ , а также  $(B - V)_T^0$  и  $(B - V)_{Tc}^0$  в разных интервалах. Интервалы цветов  $(U - B)_T^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0$  и соответствующие частоты  $n_i$  и  $n_k$  приведены в таблице 4 (колонки 1, 2, 5); вычисленные средние значения  $\langle(U - B)_T^0\rangle$  и  $\langle(U - B)_{Tc}^0\rangle$  — в колонках 3 и 6. Средние значения  $\langle(B - V)_T^0\rangle$  и  $\langle(B - V)_{Tc}^0\rangle$  вычислялись для тех же галактик, что и  $\langle(U - B)_T^0\rangle$  и  $\langle(U - B)_{Tc}^0\rangle$ , они приведены в колонках 4 и 7. Из таблицы 4 видно, что средние значения цветов  $\langle(B - V)_{Tc}^0\rangle$  и  $\langle(U - B)_{Tc}^0\rangle$  родительских галактик NGC 4691, NGC 838 и PGC 44486 (интервал  $-0.1...-0.01$ ) являются голубыми и равны соответственно  $0^m56 \pm 0^m01$  и  $-0^m08 \pm 0^m01$ . Эти галактики являются пекулярными; две из них классифицированы как линзовидные, а NGC 4691 — как галактика S0/a со сложной морфологической структурой. Средние значения показателей цвета

**Таблица 4.** Средние значения показателей цвета галактик ранних типов

Interval	$n_i$	$\langle(U - B)_T^0\rangle$	$\langle(B - V)_T^0\rangle$	$n_k$	$\langle(U - B)_{Tc}^0\rangle$	$\langle(B - V)_{Tc}^0\rangle$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
-0.1...-0.01	9	$-0.038 \pm 0.003$	$0.610 \pm 0.040$	3	$-0.08 \pm 0.01$	$0.56 \pm 0.01$
0.0-0.09	15	$0.050 \pm 0.010$	$0.690 \pm 0.030$	0	—	—
0.1-0.19	20	$0.156 \pm 0.007$	$0.740 \pm 0.020$	4	$0.13 \pm 0.02$	$0.83 \pm 0.03$
0.2-0.29	74	$0.251 \pm 0.004$	$0.771 \pm 0.010$	2	0.245	0.875
0.3-0.39	153	$0.344 \pm 0.002$	$0.841 \pm 0.004$	6	$0.36 \pm 0.01$	$0.86 \pm 0.02$
0.4-0.49	297	$0.447 \pm 0.002$	$0.891 \pm 0.003$	6	$0.43 \pm 0.01$	$0.92 \pm 0.02$
0.5-0.59	211	$0.536 \pm 0.002$	$0.927 \pm 0.004$	3	$0.52 \pm 0.01$	$0.90 \pm 0.02$

$\langle(U - B)_T^0\rangle$  и  $\langle(B - V)_T^0\rangle$  выборки ETG этого же интервала также являются голубыми и равны соответственно  $0^m61 \pm 0^m04$  и  $-0^m038 \pm 0^m003$ . Здесь шесть из девяти галактик являются пекулярными (Sy2, Sy, KUG, Mk, IG, rG). Необычной является эллиптическая раннего типа (E0) радиогалактика ESO 528-36, показатели цвета которой равны  $0^m32 \pm 0^m02$  и  $-0^m02 \pm 0^m06$  соответственно. Вычисленные средние цвета позволяют предположить, что в галактиках обеих выборок этого интервала действительно присутствует значительная доля молодого населения.

Средние значения цветов родительских галактик NGC 4589, NGC 5525 и UGC 1306 морфологических типов E и L в интервале 0.5-0.59 (интервал 7) получились равными

$$\begin{aligned} \langle(U - B)_{Tc}^0\rangle &= 0^m52 \pm 0^m01, \\ \langle(B - V)_{Tc}^0\rangle &= 0^m90 \pm 0^m02 \end{aligned}$$

и являются красными. Также красным получилось среднее значение цветов  $(B - V)_T^0$  211 галактик типов E и L (выборка ETG, тот же интервал), равное  $0^m927 \pm 0^m004$ . Для тех же галактик средний показатель цвета  $\langle(U - B)_T^0\rangle = 0^m536 \pm 0^m002$ . Полученные средние цвета позволяют предположить, что в галактиках обеих выборок этого интервала преобладает население II типа.

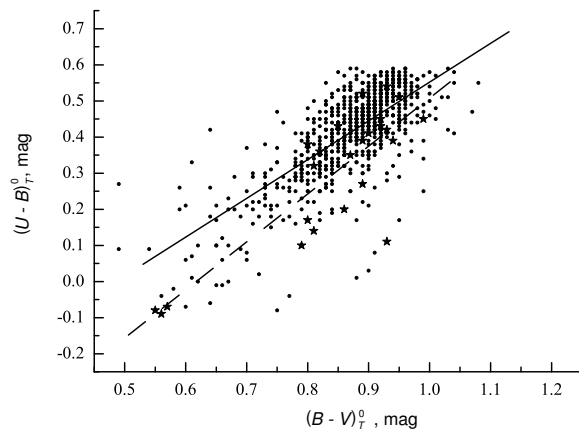
Полученные средние значения цветов для разных интервалов этих двух выборок сравнивались по критерию Колмогорова-Смирнова. Мы не получили значимого (уровень  $P = 95\%$ ) различия величин  $\langle(U - B)_{Tc}^0\rangle$  и  $\langle(U - B)_T^0\rangle$ , а также  $\langle(B - V)_{Tc}^0\rangle$  и  $\langle(B - V)_T^0\rangle$ . Вычисленные значения  $\lambda^2$ , равные 0.07 и 0.28 соответственно, получились меньше граничного значения  $\lambda^2_{05} = 1.84$ . Они показывают, что цвета родительских галактик

сверхновых с гравитационным коллапсом и галактик ранних типов в выборке ETG с вероятностью 95% являются в среднем одинаковыми, и галактики не различаются по составу звездного населения.

### 3.4. Двухцветная диаграмма галактик ранних типов

По данным выборок ETG и родительских галактик нами были построены двухцветные диаграммы  $(U - B)_T^0 - (B - V)_T^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0 - (B - V)_{Tc}^0$  (рис. 4). Уравнение линейной регрессии для галактик выборки ETG (сплошная линия на рисунке) имеет вид:

$$\begin{aligned} (U - B)_T^0 &= (-0.520 \pm 0.030) \\ &+ (1.072 \pm 0.034) \times (B - V)_T^0. \end{aligned}$$



**Рис. 4.** Двухцветная диаграмма. Звездочки — родительские галактики, точки — галактики выборки ETG. Линии регрессии: сплошная линия — выборка ETG, штриховая — родительские галактики.

Таблица 5. Сравнение показателей цвета  $(B - V)_T^0$  и  $(B - V)_{Tc}^0$ 

Interval	$n_i$	$n_i/N_1$	$\phi_1$	$n_k$	$n_k/N_2$	$\phi_2$	$(\phi_1 - \phi_2)^2$	$\frac{(N_1 N_2)}{(N_1 + N_2)}$	$F$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
0.5–0.59	6	0.008	0.179	3	0.125	0.723	0.296	23.263	6.884
0.6–0.69	27	0.036	0.382	0	0	0	0.146		3.395
0.7–0.79	79	0.104	0.657	1	0.042	0.413	0.060		1.385
0.8–0.89	316	0.417	1.404	11	0.458	1.487	0.007		0.160
0.9–0.99	330	0.435	1.440	9	0.375	1.318	0.015		0.346

Корреляция между показателями цвета является достаточно тесной: коэффициент корреляции  $r = 0.74$ . Наблюдаемый разброс цветов  $(U - B)_T^0$  обычно объясняется пекулярными особенностями ряда галактик и их окружением — принадлежностью к кратным системам (парам, группам и скоплениям галактик) [11]. В качестве примера можно привести семь галактик, которые расположены справа от облака точек на рис. 4. Шесть из них являются галактиками с активными ядрами: NGC 3516 (Sy 1), ESO 538-22 (Sy 2), NGC 1482 (SBG), IC 450 (Sy 1), UGC 3426 (Sy 2), NGC 4767 (rG). Галактика NGC 6020, согласно базе данных SIMBAD, является членом группы галактик. На этом рисунке хорошо видно деление галактик ETG по цвету  $(U - B)_T^0$  на голубую и красную последовательности.

Уравнение линейной регрессии для родительских галактик (штриховая линия на рисунке) имеет вид:

$$(U - B)_{Tc}^0 = (-0.820 \pm 0.156) + (1.328 \pm 0.184) \times (B - V)_{Tc}^0.$$

Выборочный коэффициент корреляции получился равным 0.84, а 99%-ные доверительные границы генерального коэффициента корреляции соответствуют 0.54–0.95. На рис. 4 видно, что при тесной корреляции показателей цвета выделяется звездочка (NGC 2551) с координатами  $(B - V)_{Tc}^0 = 0.93$  и  $(U - B)_{Tc}^0 = 0.11$ . Напомним, что она — член группы галактик, и является галактикой высокой поверхностной яркости [20]. Она хорошо вписывается в конфигурацию семи пекулярных галактик ETG. Ее показатель цвета  $(NUV - B)$  приведен только в атласе близких галактик [16]. Поэтому дальнейшие наблюдения этой галактики являются очень желательными с целью уточнения ее показателя цвета  $(U - B)$ , морфологического типа и пекулярных особенностей.

На рис. 4 видно, что показатели цвета  $(B - V)_{Tc}^0$  родительских галактик изменяются от  $0^m55$  до  $0^m99$ . Для анализа данных мы ограничились таким же диапазоном изменения величин  $(B - V)_T^0$  и в выборке ETG. В результате чего объем последней сократился до 758 галактик и уравнение линейной регрессии (на рис. 4 она не показана) несколько изменилось:

$$(U - B)_T^0 = (-0.626 \pm 0.033) + (1.196 \pm 0.033) \times (B - V)_T^0.$$

Выборочный коэффициент корреляции  $r_i$  получился равным 0.76. Вычисленные 99%-ные доверительные границы генерального коэффициента корреляции получились равными 0.72–0.80. Поскольку вычисленные доверительные границы генерального коэффициента корреляции перекрываются, то различие между выборочными коэффициентами корреляции  $r_k$  и  $r_i$  незначимо.

Проверка принадлежности выборок  $(B - V)_{Tc}^0$  и  $(B - V)_T^0$  одной и той же генеральной совокупности проводилась, как и ранее, методом сравнения дисперсий их средних показателей цвета. Они получились равными

$$\langle (B - V)_T^0 \rangle = 0^m867 \pm 0^m078, \\ \langle (B - V)_{Tc}^0 \rangle = 0^m840 \pm 0^m121.$$

Вычисленная величина  $F = 1.55$  получилась равной граничному значению  $1.54 = F_{05}(23/757)$  для уровня значимости 5% и чисел степеней свободы  $f_1 = 23$  и  $f_2 = 757$ . Отсюда следует, что дисперсии средних цветов выборок ETG и родительских галактик не различаются на 5% уровне значимости, а сами выборки  $(B - V)_T^0$  и  $(B - V)_{Tc}^0$  принадлежат одной и той же генеральной совокупности.

В таблице 5 приводятся результаты сравнения долей показателей цвета  $(B - V)_T^0$  и  $(B - V)_{Tc}^0$



**Таблица 6.** Сравнение показателей цвета  $(B - V)_T^0$  и  $(B - V)_{Tc}^0$  выборок равного объема

Interval	$n_i$	$n_i/N_1$	$\phi_1$	$n_k$	$n_k/N_2$	$\phi_2$	$(\phi_1 - \phi_2)^2$	$\frac{(N_1 N_2)}{(N_1 + N_2)}$	$F$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
0.5–0.59	0	0	0	3	0.125	0.723	0.523	12	6.273
0.6–0.69	1	0.042	0.413	0	0	0	0.170		2.047
0.7–0.79	1	0.042	0.413	1	0.042	0.413	0		0
0.8–0.89	3	0.125	0.723	11	0.458	1.487	0.584		7.004
0.9–0.99	19	0.792	2.194	9	0.375	1.318	0.767		9.208

по методу Фишера. Для интервала  $0^m5-0^m59$  вычисленная величина  $F = 6.884$  получилась больше табличного значения  $6.68 = F_{01}$  уровня вероятности  $P = 99\%$  при числе степеней свободы  $\nu(1) = 1$  и  $\nu(2) = 780$ . Отсюда следует, что с вероятностью  $P = 99\%$  доля родительских галактик сверхновых с гравитационным коллапсом CCSNe (0.125) значительно больше доли галактик ранних типов ETG (0.008). Для интервалов цветов  $0^m6-0^m99$  вычисленные значения  $F$  получились меньше табличного значения  $F_{05} = 3.85$ , поэтому можно считать, что для них значимого и достоверного различия долей галактик в сравниваемых выборках не выявлено.

Поскольку сравниваемые выборки существенно различаются по объему (758 и 24), мы провели дополнительное сравнение их показателей цвета. Для этого из 758 величин  $(B - V)_T^0$  были составлены 20 выборок, каждая объемом в 24 случайным образом выбранных цвета. Полученные результаты сравнения долей по методу Фишера приведены в таблице 6.

Из этой таблицы видно, что для цветов  $(B - V)_{Tc}^0$  интервала от  $0^m8$  до  $0^m89$  доля  $n_k/N_2 = 0.458$  родительских галактик с вероятностью 95% оказалась больше аналогичной доли  $n_i/N_1 = 0.125$  случайным образом выбранных галактик ETG. Действительно, значение  $F = 7.00 > 4.06 = F_{05}$  (уровень  $P = 95\%$  при  $\nu(1) = 1$  и  $\nu(2) = 46$ ). Этот случай оказался единственным из двадцати. Кроме того, значимое и достоверное различие долей получилось и для показателей цвета в интервале от  $0^m9$  до  $0^m99$ , где доля родительских галактик ( $n_k/N_2 = 0.375$ ) является меньше доли случайных галактик ETG ( $n_i/N_1 = 0.792$ ). В этом случае величина  $F = 9.21 > 7.23 = F_{01}$  для уровня  $P = 99\%$  и  $\nu(1) = 1$ ,  $\nu(2) = 46$ . Имеются еще два аналогичных случая, в которых  $F = 4.82 > 4.06 = F_{05}$  (уровень  $P = 95\%$ ,  $\nu(1) = 1$ ,  $\nu(2) = 46$ ).

Отсюда можно заключить, что значимое и достоверное различие долей родительских галактик

сверхновых с гравитационным коллапсом и галактик ETG получено для красных значений показателей цвета  $(B - V)_T^0$  и  $(B - V)_{Tc}^0$  (интервалы от  $0^m7$  до  $0^m99$ ) только в четырех из двадцати выборок, составленных случайным образом. Для показателей цвета  $(B - V)_T^0$  и  $(B - V)_{Tc}^0$  различие долей родительских галактик и галактик ранних типов выборки ETG проявляется слабее, чем у показателей цвета  $(U - B)_T^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены показатели цвета  $(B - V)_{Tc}$  и  $(U - B)_{Tc}$  двадцати четырех родительских галактик сверхновых (выборка CCSNe). Их положение на диаграмме «цвет–звездная величина»  $B_T^0 - (U - B)_{Tc}^0$  сравнивалось с положением 779 галактик ранних типов, в которых вспышки таких сверхновых не наблюдались (выборка ETG). Оказалось, что 19 родительских галактик попадают в область красной последовательности, и пять галактик с активными ядрами морфологических типов L и S0/a — в область голубой. Они составляют около пятой части от числа родительских галактик с известными цветами. Из выборки ETG только 27 галактик попадают в область голубой последовательности. Из них 10 — галактики с активными ядрами, а 22 — члены кратных систем.

Выборки показателей цвета  $(U - B)_T^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0$  с вероятностью 95% могут являться выборками из одной и той же генеральной совокупности. Аналогичный результат был получен для показателей цвета  $(B - V)_T^0$  и  $(B - V)_{Tc}^0$  выборок ETG и родительских галактик сверхновых.

Поскольку объемы выборок существенно различались (779 и 24), то сравнение относительных частот (долей) распределений показателей цвета проводилось методом Фишера. Было получено, что доли показателей цвета интервалов  $-0^m1... - 0^m01$  и  $0^m1-0^m19$  родительских

галактик (0.125 и 0.167) сверхновых CCSNe с вероятностью 95% больше долей галактик ETG (0.011 и 0.026). Для остальных интервалов показателей цвета (от  $0^m2$  до  $0^m59$ ) значимого и достоверного различия долей  $(U - B)_T^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0$  в сравниваемых выборках галактик не выявлено. Кроме того, проведено дополнительное сравнение долей показателей цвета в выборках равного объема. Значимое и достоверное (уровень  $P = 95\%$ ) различие долей родительских галактик сверхновых CCSNe и галактик ETG получено для показателей цвета  $(U - B)_T^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0$  интервалов от  $0^m3$  до  $0^m59$  в девяти из двадцати таких выборок. Для показателей цвета  $(B - V)_T^0$  и  $(B - V)_{Tc}^0$  (от  $0^m7$  до  $0^m99$ ) различие долей получено только в четырех из двадцати выборок, составленных случайным образом.

Вычисленные средние цвета позволяют предположить, что в галактиках обеих выборок в интервале от  $-0^m1$  до  $-0^m01$  действительно присутствует значительная доля молодого населения, а в интервале от  $0^m5$  до  $0^m59$  преобладает население II типа. Применение критерия Колмогорова—Смирнова показало, что цвета родительских галактик сверхновых CCSNe и галактик ETG с вероятностью 95% являются в среднем одинаковыми, и галактики не различаются по составу звездного населения.

Корреляции между показателями цвета  $(U - B)_T^0 - (B - V)_T^0$  и  $(U - B)_{Tc}^0 - (B - V)_{Tc}^0$  являются достаточно тесными: выборочные коэффициенты корреляции равны 0.76 и 0.84 соответственно. Их различие является незначимым, поскольку доверительные границы генеральных коэффициентов корреляции перекрываются. Полученный в работе вывод относительно различия долей показателей цвета  $(U - B)_{Tc}^0$  и  $(U - B)_T^0$  выборок родительских галактик сверхновых CCSNe и галактик ранних типов голубой последовательности будет уточняться по мере накопления новых наблюдательных данных.

### БЛАГОДАРНОСТИ

В заключение считаю своим приятным долгом поблагодарить Ю. К. Ананьевскую, Е. И. Гаген-Торн, А. Н. Герашенко, Т. В. Демидову, Н. О. Миллер, Л. Г. Романенко, М. С. Чубея за помощь при

выполнении и оформлении работы, и Н. Г. Макаренко — за обсуждение полученных результатов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. van den Bergh, W. Li, and A. V. Filippenko, Publ. Astron. Soc. Pacific **114**, 820 (2002).
2. S. van den Bergh, W. Li, and A. V. Filippenko, Publ. Astron. Soc. Pacific **115**, 1280 (2003).
3. S. van den Bergh, W. Li, and A. V. Filippenko, Publ. Astron. Soc. Pacific **117**, 773 (2005).
4. A. A. Hakobyan, A. R. Petrosian, B. McLean, et al., Astron. and Astrophys. **488**, 523 (2008).
5. <http://graspa.oapd.inaf.it/cgi-bin/sncat.php>
6. G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, H. G. Corwin, et al., *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* (Springer, Berlin, 1991).
7. И. Д. Караченцев, *Двойные галактики* (Наука, Москва, 1987), с. 182.
8. I. Strateva, Z. Ivezić, G. R. Knapp, et al., Astron. J. **122**, 1861 (2001).
9. I. K. Baldry, K. Glazebrook, J. Brinkman, et al., Astrophys. J. **600**, 681 (2004).
10. C. J. Conselice, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **373**, 1389 (2006).
11. S. van den Bergh, Astron. J. **134**, 1508 (2007).
12. A. Sandage and J. Bedke, *The Carnegie Atlas of Galaxies* (Washington Carnegie Inst., Washington, 1994).
13. Г. Д. Полякова, Изв. Главной астроном. обс. **219**, 260 (2009).
14. <http://www.sai.msu.su/sn/sncat/sncatlatestview.txt>
15. H. Aihara, C. Allende Prieto, D. An, et al., Astrophys. J. Suppl. **193**, 29 (2011).
16. A. Gil de Paz, S. Boissier, B. F. Madore, et al. Astrophys. J. Suppl. **173**, 185 (2007).
17. P. Prugniel and P. Heraudeau, Astron. and Astrophys. Suppl. **128**, 299 (1998).
18. Г. Д. Полякова, Изв. Главной астроном. обс. **220**, 565 (2013).
19. G. Paturel, Y. Fang, C. Petit, et al., Astron. and Astrophys. Suppl. **146**, 19 (2000).
20. М. А. Аракелян Сообщ. Бюраканской астрофиз. обс., **47**, 3, (1975).
21. P. Nilson, *Uppsala General Catalogue of Galaxies* (1973).

**Color Indices of Core-Collapse Supernova Host Galaxies****G. D. Polyakova**

Using data from different catalogues, we determined color indices of early type (E, L, and S0/a) core-collapse supernova host galaxies. These color indices were compared with the colors of the galaxies of the same morphological types but in which explosions of such supernovae have not been observed. It is shown that in the blue sequence of the color–magnitude diagram, the compared samples of galaxies differ with probability  $P = 95\%$  in the relative frequencies of the  $(U - B)_{Tc}^0$  and  $(U - B)_T^0$  color indices in the intervals from  $-0^m1$  to  $-0^m01$  and  $0^m1$  to  $0^m19$ . A difference in the relative frequencies with probability  $P = 99\%$  was also obtained for the  $(B - V)_{Tc}^0$  and  $(B - V)_T^0$  colors in the interval  $0^m5-0^m59$ . The calculated average colors of these intervals for the galaxies of both samples allow us to assume a significant proportion of the young population in them. The Kolmogorov–Smirnov test showed that the colors of the core-collapse supernova host galaxies and the early-type galaxies without explosions of such supernovae are similar on average with probability  $P = 95\%$ , and the galaxies do not differ in stellar population content.

Keywords: *galaxies: photometry—galaxies: stellar content—supernovae*