

УДК: 524.35:520.82

ФОТОМЕТРИЯ СВЕРХНОВОЙ ЗВЕЗДЫ SN 2002ар В М 74 В 2002г.

В.Т.ДОРОШЕНКО¹, С.Г.СЕРГЕЕВ², Н.И.МЕРКУЛОВА²,
Е.А.СЕРГЕЕВА²

Поступила 3 марта 2003

Принята к печати 1 апреля 2003

Приводятся результаты $UBVR_cI_c$ наблюдений SN 2002ар в феврале, октябре и ноябре 2002г., выполненные в Крымской астрофизической обсерватории. Рассмотрение наших фотометрических данных и взятых из литературы показало, что на интервале около года со дня вспышки сверхновой SN 2002ар кривая блеска прошла три этапа в своем развитии: резкий подъем, после этого стадию быстрого экспоненциального спада и затем стадию более медленного затухания. По виду кривой блеска эта сверхновая относится к SN I, а по изменению показателей цвета, скорее всего, к сверхновым SN Ic. На предмаксимальной стадии распределение энергии в области от $\lambda 3000 \text{ \AA}$ до $\lambda 6000 \text{ \AA}$ похоже на излучение звезды спектрального класса F5V. На втором этапе эволюции блеска, на стадии быстрого спада яркости, изменения показателей цвета связаны с изменением температуры излучения, указывая на быстрое охлаждение выброшенного вещества. Приняв эффективную температуру излучения в предмаксимальной стадии равной $T_{\text{eff}} = 6500 \text{ K}$, мы оценили скорость расширения квазифотосферы. По нашим расчетам она составляет около 9700 км/с.

1. *Введение.* 29 января 2002г. (29.4 UT) во внешней части спиральной галактики М74, на расстоянии $4'38''$ от ее центра, любитель астрономии Yoji Hirose обнаружил звезду 14.5 зв. величины [1]. По сообщению Ли из Калифорнийского университета [1] еще 25 января на этом месте не было звезды ярче 18^m . Обнаруженная звезда была названа SN 2002ар. На следующий день ее визуальная яркость оценивалась как $13^m.7$. Таким образом, сверхновая была открыта почти сразу же после взрыва на стадии подъема блеска. Из-за своей яркости и возможной связи с GRB-источниками эта сверхновая привлекла внимание многих наблюдателей. При принятом расстоянии до галактики $D = 7.3 \text{ Мпк}$ [2,3] сверхновая находится на расстоянии 9.8 кпк от ее центра. Согласно аргументам, приводимым в статье [4], полное поглощение до сверхновой, т.е. в нашей Галактике и в галактике М 74, невелико, $E(B - V) = 0^m.08$, и, следовательно, экстинкция в U , B , V , R_c и I_c полосах, соответствующая этому избытку цвета, равна $A_U = 0^m.43$, $A_B = 0^m.37$, $A_V = 0^m.28$, $A_{R_c} = 0^m.21$ и $A_{I_c} = 0^m.14$ [4]. Изучение глубоких $UBVR_{IH} \alpha K$ изображений М74 [5], полученных за несколько лет до вспышки сверхновой, не позволило обнаружить на этом месте следов предшественницы вспыхнувшей звезды, ярче чем $U = 21^m.5$; $B = 23^m$; $V = 22^m.6$; $R_c = 22^m.2$; $I_c = 21^m.5$. Спектральные свойства

сверхновой сразу же после открытия привели исследователей к заключению о возможной принадлежности звезды к классу гиперновых звезд с кинетической энергией взрыва $E > 10^{52}$ эрг. Как оказалось впоследствии, кинетическая энергия была несколько меньше указанной величины, а именно, $E = 4 - 10 \times 10^{51}$ эрг [6]. В Крымской астрофизической обсерватории проводились как фотометрические BVR_cI_c , так и поляризационные $UBVRI$ наблюдения SN 2002ар. Далее мы будем рассматривать только фотометрические наблюдения.

2. Наблюдения. Фотометрические наблюдения SN 2002ар выполнялись в прямом фокусе телескопа АЗТ-8 ($f = 282$ см) с диаметром зеркала 70 см, оснащенный ПЗС-фотометром с матрицей AP7p 512 x 512 пикселей. Наблюдения с фильтрами B, V, R, I приводились к стандартной системе Джонсона-Казинса. Коэффициенты перевода инструментальной системы в систему Джонсона-Казинса были получены в результате специального фотометрического анализа 32-х звезд в скоплении NGC 7790, а их стандартные B, V, R_c, I_c звездные величины были взяты из работы Стэтсона [8]. При фотометрии сверхновой в качестве звезды сравнения в феврале использовалась звезда №1, расположенная от SN в $65''$ к западу и в $8''$ к северу с координатами $\alpha = 01^{\text{h}}36^{\text{m}}19^{\text{s}}$ и $\delta = +15^{\circ}45'22''$ (2000) и звездными величинами $V = 13^{\text{m}}.061$, $B = 13^{\text{m}}.844$, $R_c = 12^{\text{m}}.618$ и $I_c = 12^{\text{m}}.148$, согласно [7]. В октябре-ноябре, когда яркость сверхновой сильно уменьшилась, мы использовали звезду №2 с координатами $\alpha = 01^{\text{h}}36^{\text{m}}23^{\text{s}}.04$ и $\delta = 15^{\circ}47'45''.4$ (2000) и звездными величинами $V = 14^{\text{m}}.611$, $B = 15^{\text{m}}.190$, $R_c = 14^{\text{m}}.273$ и $I_c = 13^{\text{m}}.913$ [7]. Фотометрическая обработка, включающая поправки за байес, темновой ток и плоское поле, которое получалось на рассветном небе, а также апертурные измерения вместе с учетом ошибок, связанных как со статистикой накопленных зарядов, так и с особенностями матричных наблюдений, проводилась по программе, разработанной С.Г.Сергеевым. При фотометрии использовалась апертура диаметром $A = 15''$. Результаты наших наблюдений представлены в табл.1, где в первом столбце приводятся год, месяц и день, во втором - юлианская дата, в третьем - звездная величина, в четвертом - вероятная погрешность и в пятом - номер используемой звезды сравнения.

На 125-см телескопе КраАО (АЗТ-11) Ю.С.Ефимовым проводились поляризационные наблюдения, и как побочный продукт этих наблюдений были получены оценки блеска в U, B, V, R_c, I_c полосах в течение 4-х ночей в начале февраля. Они тоже добавлены в табл.1 с любезного согласия Ю.С.Ефимова.

3. $UBVR_cI_c$ кривые блеска. Чтобы лучше представить изменения блеска сверхновой, мы объединили наши данные с опубликованными в литературе [4,9,10-13]. Самое последнее наблюдение в полосе V от 31 декабря

Таблица 1

UBVR_c ВЕЛИЧИНЫ SN 2002ap

YYmmdd.UT	JD2450000+	<i>U</i>	err <i>U</i>	Cs	YYmmdd.UT	JD2450000+	<i>R</i>	err <i>R</i>	Cs
020203.735 ^a	2309.2293	13.29	0.04	1	020201.742 ^a	2307.2422	13.00	0.03	1
YYmmdd.UT	JD2450000+	<i>B</i>	err <i>B</i>	Cs	020201.800	2307.3003	13.037	0.007	1
020201.739 ^a	2307.2391	13.43	0.03	1	020202.721	2308.2209	12.862	0.004	1
020201.800	2307.2996	13.440	0.009	1	020203.678	2309.1777	12.711	0.011	1
020202.718	2308.2175	13.289	0.005	1	020204.729 ^a	2310.2351	12.57	0.03	1
020203.676	2309.1763	13.192	0.013	1	020204.742	2310.2415	12.610	0.004	1
020203.719 ^a	2309.2194	13.18	0.03	1	020205.800	2311.3000	12.526	0.005	1
020204.734 ^a	2310.2345	13.11	0.03	1	020207.715 ^a	2313.2148	12.30	0.03	1
020204.737	2310.2373	13.125	0.004	1	020207.723	2313.2231	12.404	0.004	1
020205.794	2311.2942	13.106	0.008	1	020208.696	2314.1958	12.375	0.004	1
020207.714 ^a	2313.2142	13.13	0.04	1	020210.694	2316.1938	12.361	0.004	1
020207.723	2313.2234	13.162	0.004	1	020212.704	2318.2039	12.401	0.004	1
020208.693	2314.1929	13.222	0.005	1	020216.706	2322.2056	12.568	0.004	1
020210.694	2316.1936	13.397	0.004	1	020217.717	2323.2166	12.619	0.004	1
020212.700	2318.1997	13.596	0.006	1	021009.007	2557.5066	17.554	0.045	2
020216.704	2322.2041	13.984	0.004	1	021017.035	2565.5354	17.714	0.090	2
020217.715	2323.2151	14.069	0.004	1	021102.896	2581.3955	17.930	0.184	2
YYmmdd.UT	JD2450000+	<i>V</i>	err <i>V</i>	Cs	021114.916	2593.4155	17.998	0.159	2
020201.742 ^a	2307.2415	12.92	0.03	1	021128.881	2607.3809	18.191	0.236	2
020201.800	2307.2998	12.901	0.007	1	YYmmdd.UT	JD2450000+	<i>I</i>	err <i>I</i>	Cs
020202.720	2308.2200	12.724	0.004	1	020201.801	2307.3013	13.013	0.010	1
020203.677	2309.1772	12.602	0.011	1	020202.731	2308.2307	12.847	0.005	1
020203.730 ^a	2309.2300	12.60	0.03	1	020203.680	2309.1797	12.688	0.016	1
020204.738 ^a	2310.2382	12.47	0.03	1	020204.735 ^a	2310.2356	12.66	0.03	1
020204.740	2310.2402	12.497	0.004	1	020204.743	2310.2427	12.569	0.004	1
020205.798	2311.2976	12.425	0.006	1	020205.799	2311.2993	12.449	0.006	1
020207.714 ^a	2313.2136	12.39	0.03	1	020207.722	2313.2222	12.302	0.004	1
020207.724	2313.2236	12.368	0.004	1	020208.696	2314.1956	12.253	0.005	1
020208.695	2314.1946	12.368	0.004	1	020210.695	2316.1946	12.207	0.004	1
020210.694	2316.1936	12.421	0.004	1	020212.705	2318.2046	12.206	0.006	1
020212.701	2318.2012	12.525	0.005	1	020216.706	2322.2063	12.294	0.004	1
020216.705	2322.2048	12.786	0.004	1	020217.718	2323.2175	12.315	0.004	1
020217.716	2323.2158	12.856	0.004	1	021009.001	2557.5010	17.461	0.063	2
021009.995	2557.4951	18.435	0.057	2	021017.037	2565.5366	17.611	0.082	2
021017.034	2565.5339	18.680	0.091	2	021102.892	2581.3923	18.081	0.225	2
021102.886	2581.3862	18.952	0.259	2	021114.918	2593.4177	18.000	0.133	2
021114.913	2593.4133	18.809	0.180	2	021128.883	2607.3831	19.229	0.291	2
021128.879	2607.3787	18.925	0.204	2					

^a Наблюдения Ю.С.Ефимова на 125-см телескопе.

2002г. ($V = 19^m.5$) принадлежит Хендену [14]. Сводные кривые блеска приводятся на рис.1, причем наши данные отмечены заполненными кружками, а все остальные - открытыми. Размер кружков для февральских наблюдений гораздо больше ошибок измерений и взят таким только для иллюстрации локализации наших данных в общей картине падения блеска

сверхновой. Для большей наглядности кривые блеска в разных фильтрах помещены на рисунке со сдвигом относительно кривой блеска в фильтре V . Сдвиг в звездных величинах указан внутри рисунка. Из рисунка следует, что изменения блеска проходили три стадии: подъем (до первой декады или середины февраля), затем крутое ослабление (до первой декады марта), а далее - более медленное падение блеска вплоть до конца 2002 года. В течение первых 30-36 суток наибольшая скорость ослабления блеска была в полосе U - 0.122 зв.вел./сутки, а в полосах B , V , R_c и I_c скорость падения блеска составляла 0.066, 0.064, 0.055 и 0.036 зв.вел./сутки соответственно.

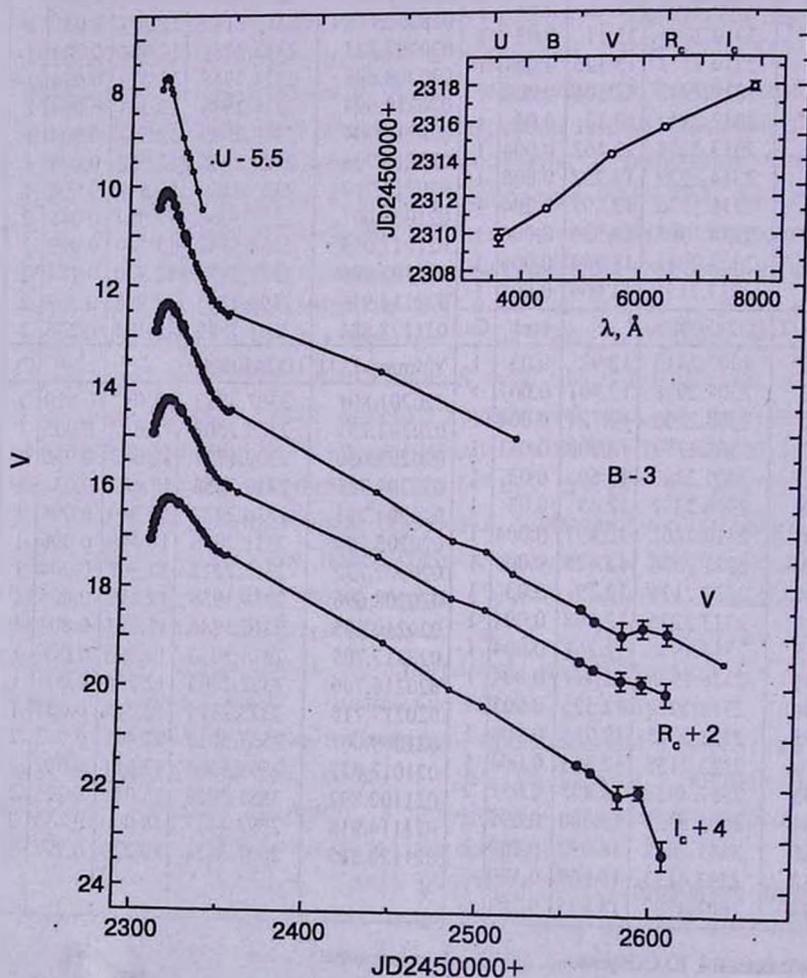


Рис.1. Сводная кривая блеска SN 2002ар в U , B , V , R_c , I_c полосах. Заполненными кружками показана локализация наших наблюдений. Ошибки на ранней стадии наблюдений гораздо меньше размеров кружков. Открытыми кружками показаны данные, взятые из литературы. Кривые блеска в полосах U , B , R_c , I_c смещены относительно кривой блеска в полосе V . Цифры около названий фильтров обозначают сдвиг кривой в звездных величинах. На врезке показано время наступления максимального блеска в зависимости от эффективной длины волны фильтра.

В дальнейшем, в течение 240-290 суток, скорость падения блеска в полосах B , V , R_c , I_c была примерно одинаковая - 0.015-0.020 зв.вел./сутки. Кривая блеска SN 2002ар очень похожа на кривые блеска сверхновых I-го типа. Точки перехода от быстрого падения блеска к медленному в разных спектральных полосах соответствуют слегка разным моментам времени. Максимальный блеск в разных спектральных полосах тоже приходится на разные моменты. Это отмечалось всеми наблюдателями. Подобное явление наблюдалось у всех сверхновых звезд, которые удалось обнаружить на стадии подъема блеска и пронаблюдать в разных фильтрах. Обычно наблюдатели отмечают сам факт без объяснения. На врезке к рис.1 показаны моменты максимального блеска в U , B , V , R_c , I_c фильтрах, определенные нами по сводной кривой блеска путем аппроксимации кривой блеска полиномами высокой степени. Полученные нами моменты максимума блеска хорошо совпадают с оценками, приведенными в [4]. Некоторые характеристики кривой блеска, такие, как моменты наступления максимального блеска и звездная величина в максимуме, даны в табл.2.

Таблица 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИВОЙ БЛЕСКА В МАКСИМУМЕ

	U	B	V	R_c	I_c
$\lambda_{эф}, \text{Å}$	3600	4400	5500	6400	7900
Максимум блеска					
Дата	04.02.2002	05.02.2002	08.02.2002	10.02.2002	12.02.2002
УТ	06:05	19:12	17:14	03:36	09:22
JD2450000+	2309.753	2311.300	2314.218	2315.650	2317.890
Зв. величина	13.262	13.103	12.377	12.255	12.262

4. *Эволюция показателей цвета.* Показатели цвета у сверхновой менялись причудливым образом. Исходя из их изменений и для удобства дальнейшего анализа, мы разделили кривые блеска на 4 участка, так, как показано на рис.2 пунктирными линиями. На первом этапе, обозначенном цифрой 1, показатели цвета практически не менялись. На втором этапе (цифра 2) все показатели цвета увеличивались, сверхновая становилась "более красной". На третьем этапе (цифра 3) показатели цвета вели себя по-разному: $B-V$ уменьшался, $V-R_c$ стабилизировался, а $V-I_c$ продолжал расти. И, наконец, в качестве четвертого этапа (цифра 4) был рассмотрен участок медленного затухания сверхновой. На этом участке наблюдений было мало, так как почти все лето сверхновую нельзя было наблюдать. Но это время показатель цвета $B-V$ продолжал уменьшаться, показатель цвета $V-R_c$ после некоторой остановки на третьем этапе снова несколько

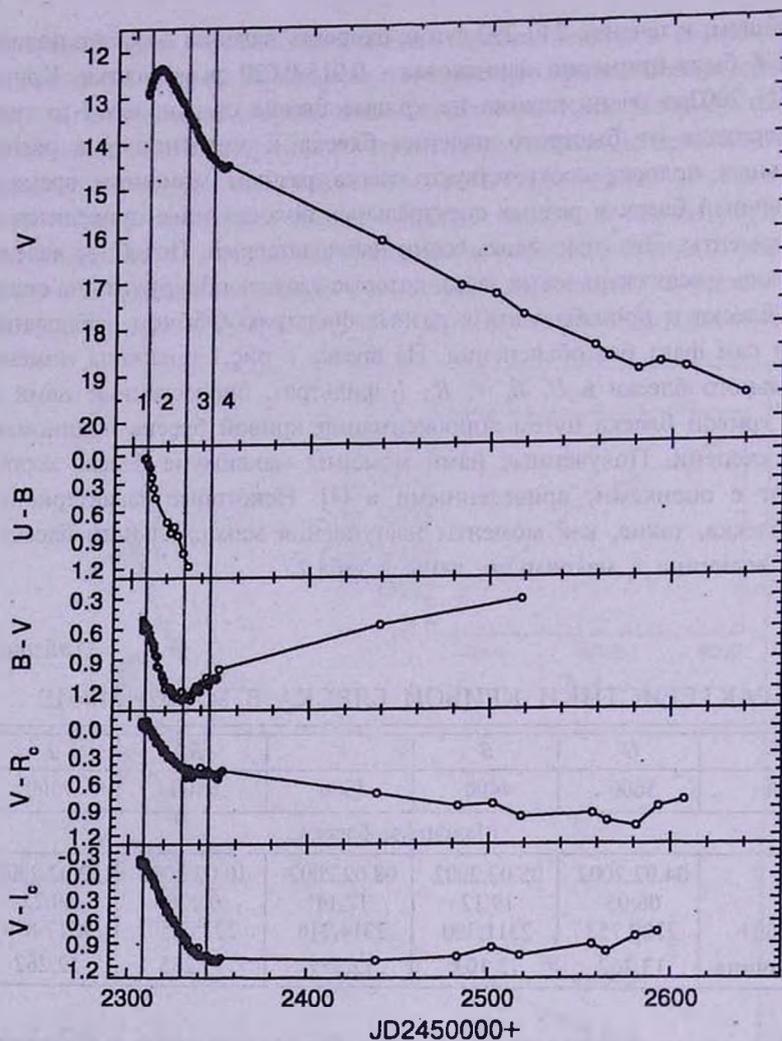


Рис.2. Изменения показателей цвета во времени. Пунктирные линии разделяют разные участки кривой блеска, которые обозначены цифрами от 1 до 4.

увеличился, а $V-I_c$ стабилизировался или даже начал немного уменьшаться. Очень интересными и сложными по поведению оказались кривые изменения показателей цвета, построенные в зависимости от изменения блеска в полосе V , что представлено на рис.3. Здесь хорошо видны все этапы изменения показателей цвета.

5. *Двухцветные диаграммы.* Известно, что многие физические механизмы излучения характеризуются только им присущими показателями цвета. Поэтому анализ положения показателей цвета сверхновой на двухцветных диаграммах, часто используемый в методах звездной астрономии, может быть весьма полезным. На рис.4 представлены

двухцветные диаграммы $(U-B)$, $(B-V)$; $(B-V)$, $(V-R_c)$ и $(B-V)$, $(V-I_c)$, которые для краткости в дальнейшем будем называть $UB-BV$, $BV-VR_c$ и $BV-VI_c$. Цифрами обозначены показатели цвета сверхновой звезды на соответствующем участке кривой блеска, которые обсуждались выше.

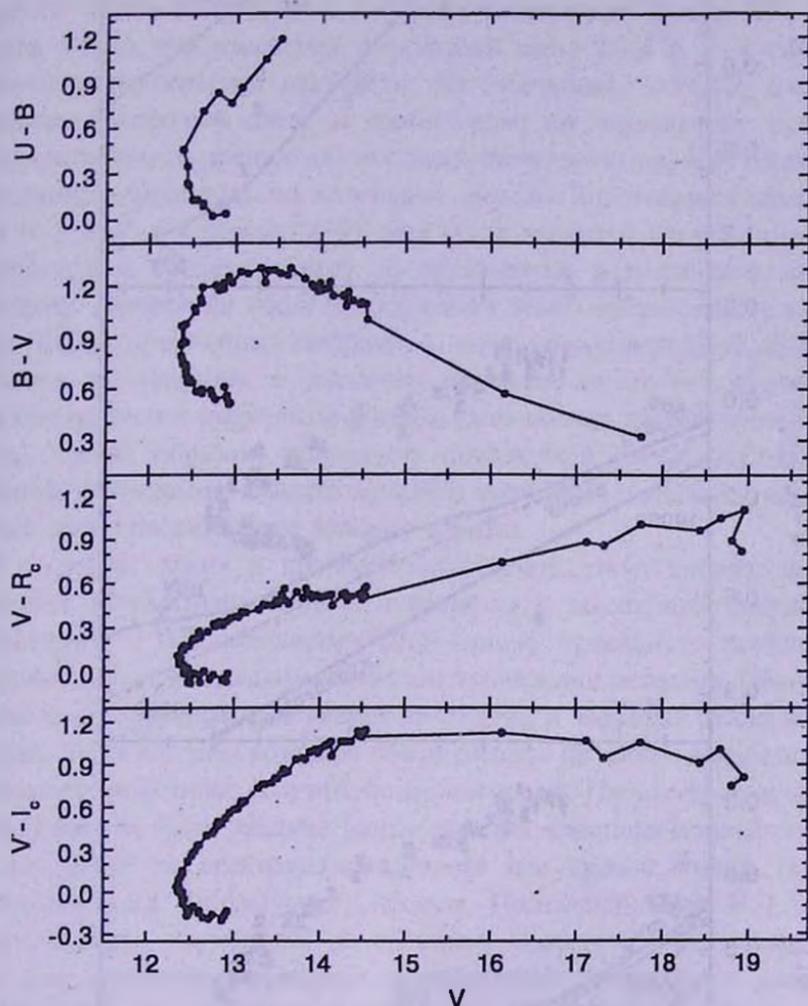


Рис.3. Эволюция показателей цвета в зависимости от изменения блеска сверхновой в полосе V .

Следует отметить, что показатели цвета были исправлены за межзвездное и межгалактическое покраснение, значение которого, взятое из работы [4], приведено нами во введении. Сплошной жирной линией отмечено положение колор-индексов для степенного спектра $F_V \sim \nu^\alpha$; более тонкой сплошной линией показана главная последовательность, т.е. показатели цвета нормальных звезд. Линией с короткими штрихами обозначены показатели цвета для чернотельного излучения разных температур.

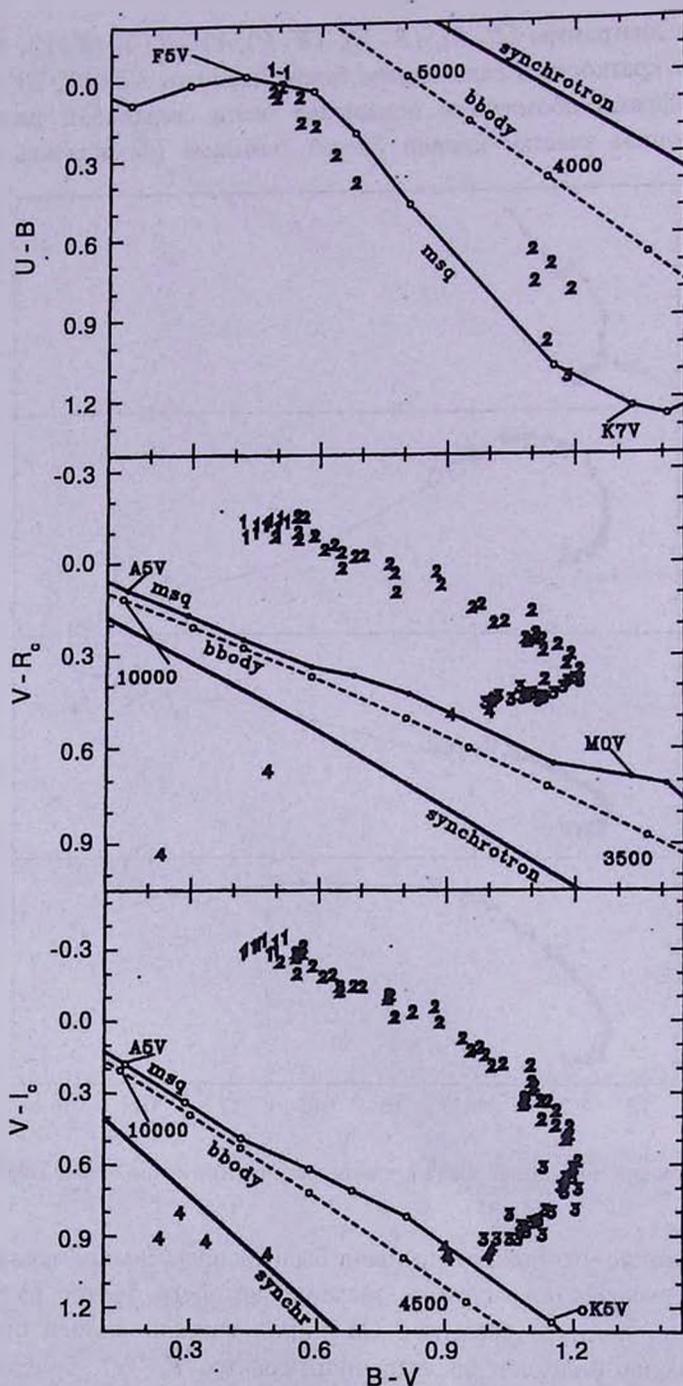


Рис.4. Двухцветные диаграммы, где цифрами даны показатели цвета сверхновой на разных участках ее эволюции, как это показано на рис.2. Кроме того, разными линиями обозначены показатели цвета черного тела при разных температурах, показатели цвета звезд главной последовательности в зависимости от спектрального класса и показатели цвета степенного спектра в зависимости от показателя степени.

Из рассмотрения этого рисунка можно сделать несколько выводов. На диаграмме $UB-BV$ видно, что показатели цвета сверхновой меняются вдоль главной последовательности. В самые первые моменты наблюдений (первые числа февраля) $U-B$ и $B-V$ соответствуют звездам F5V. В конце февраля эти показатели цвета соответствуют звездам спектрального класса K7V. Таким образом, видно, что изменения показателей цвета $U-B$ и $B-V$ связаны с изменением температуры излучения. На диаграммах $BV-VR_c$ и $BV-VI_c$ положение показателей цвета не соответствует ни нормальному звездному, ни чернотельному излучению, но их изменение со временем идет параллельно и звездному, и чернотельному излучению. Похоже, что эволюция показателей цвета $V-R_c$ и $V-I_c$ в первые 30-40 дней после вспышки следует изменениям температуры и свидетельствует об охлаждении излучающего вещества сверхновой. Показатели цвета на последнем этапе наблюдений (в октябре-ноябре 2002г.), отмеченные цифрами 4, ведут себя совершенно по-другому и связаны, по-видимому, с переходом на другие механизмы излучения. В это время излучение сверхновой больше всего похоже на излучение горячей плазмы. Таким образом, положение показателей цвета сверхновой на двухцветных диаграммах свидетельствует о чрезвычайно сложных процессах, которые сопровождают такие мощные взрывы.

В последнее время в процессе наблюдений стали широко внедрять полностью автоматизированные телескопы с высокочувствительными приемниками - ПЗС-матрицами. Это сильно продвинуло исследование сверхновых звезд спектральными и фотометрическими методами. Обнаружено большое число сверхновых, получены их спектры и эволюция блеска в разных фильтрах. В связи с этим возникла необходимость по наблюдаемым спектрам сверхновых разных типов получить показатели цвета. Побудительным мотивом для этой работы было желание найти способы классификации сверхновых звезд не только по спектральным данным или кривой блеска, но и по показателям цвета. Авторы такого проекта, Познанский и др. [15], назвали показатели цвета, полученные по спектрам, синтетическими показателями цвета. Для типичных сверхновых всевозможных типов были построены разнообразные двухцветные диаграммы, где переменной величиной являлся возраст сверхновой или время, прошедшее от максимума блеска в полосе B . В принципе, такие двухцветные диаграммы для сверхновых аналогичны двухцветным диаграммам для звезд разных спектральных типов. Эти синтетические показатели цвета оказались доступными из Интернета. На сайте <http://wise-obs.tau.ac.il/~dovip/typing> в свободном доступе находятся таблицы эволюции показателей цвета сверхновых разных типов. На рис.5, согласно этим данным, приводятся двухцветные диаграммы $UB-BV$, $BV-VR_c$ и $BV-VI_c$, на которых штриховой, штрихпунктирной и сплошной жирной линией иллюстрируется эволюция показателей цвета сверхновых типа Ia, Ib и Ic. Цифры в скобках означают количество дней, прошедших от максимума

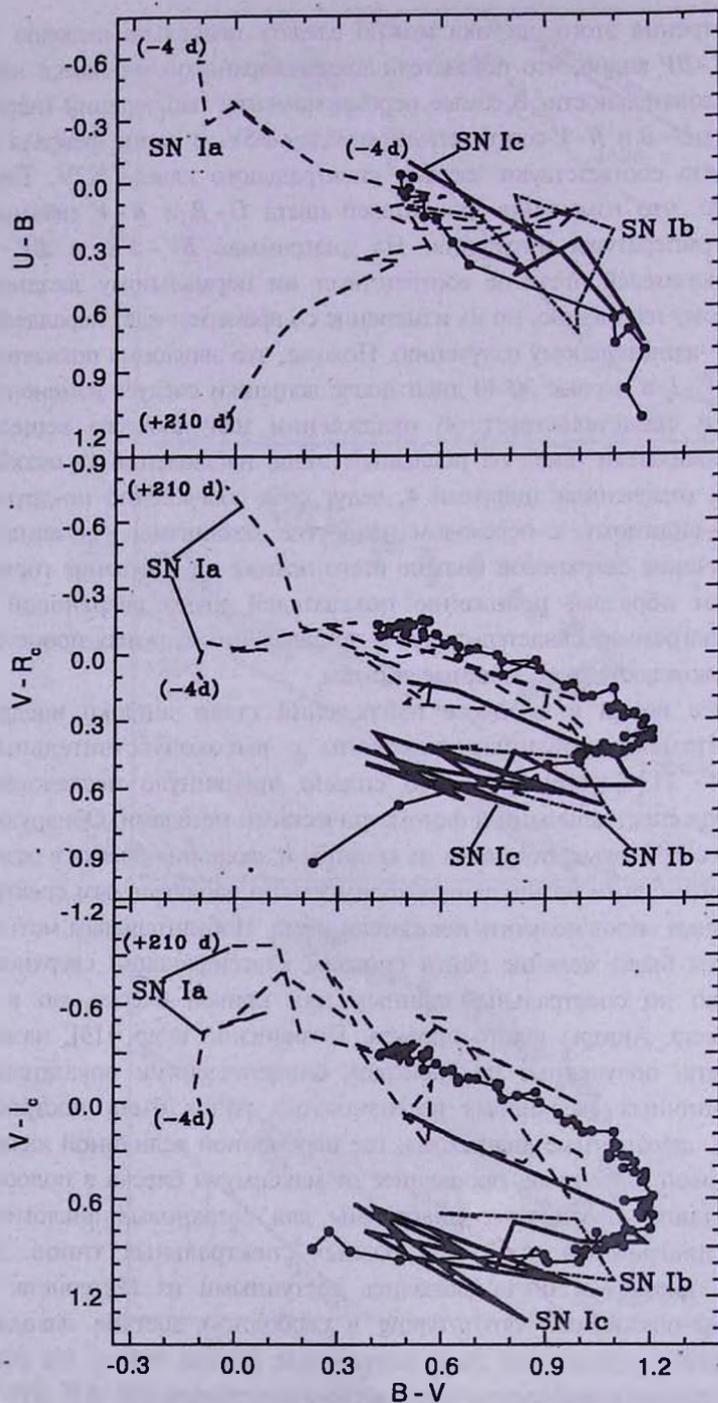


Рис.5. Двухцветные диаграммы для сверхновых SN Ia, SN Ib и SN Ic в зависимости от времени, прошедшего с момента максимального блеска в полосе B . Соответствующие данные взяты нами на сайте <http://wise-obs.tau.ac.il/~dovip/typing>. Заполненными точками иллюстрируется эволюция показателей цвета SN 2002ар.

блеска в фильтре B , т.е. каждая кривая из синтетических показателей цвета показывает развитие цветовых характеристик сверхновых разных типов по мере удаления от даты наступления максимума в полосе B . Заполненными кружками даны наблюдаемые показатели цвета SN 2002ар, тоже по мере удаления от момента ее обнаружения. Из сравнения показателей цвета исследуемой нами сверхновой и типичных кривых для сверхновых типов SN Ia, Ib и Ic видно, что, во-первых, наблюдаемое развитие показателей цвета SN 2002ар не является чем-то необычным среди других сверхновых. Во-вторых, цветовые характеристики SN 2002ар более всего похожи на цветовые характеристики сверхновых типа Ic, а в некоторые моменты, возможно, и на SN Ia. Однако, если сравнивать положение показателей цвета на диаграмме $UB - BV$, то сходство с SN Ia утрачивается. Таким образом, необычная локализация показателей цвета при сравнении с нормальными звездами, чернотельным излучением или синхротронным излучением, видимая на рис.4, становится вполне обычной, если сравнивать SN 2002ар с другими сверхновыми звездами. Из сравнения показателей цвета следует, что исследуемая нами сверхновая относится к типу SN Ic. Такого же мнения придерживаются другие исследователи [4-6] на основе изучения спектральных характеристик этой сверхновой.

6. *Распределение энергии в спектре по фотометрическим данным.* Как было уже отмечено выше, показатели цвета сверхновой звезды SN 2002ар даже в первые даты наблюдений, когда блеск звезды еще возрстал, не соответствуют ни чернотельному излучению, ни излучению

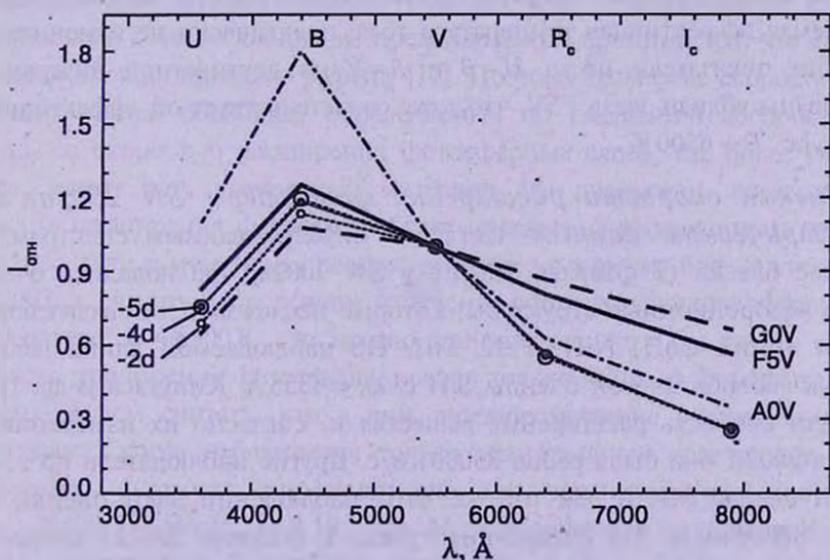


Рис.6. Распределение энергии в спектре SN 2002ар за 5, 4 и 2 дня до максимума блеска в полосе B . Для сравнения более жирными линиями (сплошной, штриховой и штрих-пунктирной) даны распределения энергии в звездах A0V, F5V и G0V. Все распределения энергии нормированы на $\lambda 5500 \text{ \AA}$.

каких-либо нормальных звезд. Каким он был реально, показано на рис.6. Все потоки, представленные на рис.6, нормированы к потокам в полосе V , т.е. к значениям потоков на длине волны $\lambda 5500 \text{ \AA}$. Сплошной жирной линией показано распределение энергии в спектре типичной звезды $F5 V$, штриховой жирной линией - распределение энергии для звезды $G0 V$ и штрих-пунктирной линией - распределение энергии для звезды $A0 V$. Распределения энергии в сверхновой SN 2002ар показано для самого первого дня фотометрических $UBVR_I$ наблюдений (1 февраля 2002г., $JD=2452307.3$), т.е. за пять дней до наступления максимума в полосе B . Эти данные обозначены большими открытыми кружками. Кроме того, заполненные кружки соответствуют наблюдениям за 4 дня до максимального блеска (2 февраля 2002г., $JD=245308.3$), а открытые маленькие кружки соответствуют наблюдениям сверхновой за два дня до максимума в фильтре B , т.е. 4 февраля 2002г. ($JD=2452309.8$). Межзвездная экстинкция учтена. На рисунке рядом с каждым реальным распределением энергии сверхновой указан "возраст" сверхновой, т.е. количество дней от максимума блеска в B полосе. Из этого рисунка следует, насколько трудно реальное распределение энергии описать в рамках распределения энергии обычных звезд.

Следует отметить, что в спектре сверхновой от 1 февраля ($t=-5d$) еще практически не заметны абсорбционные полосы [16]. Максимум непрерывного излучения наблюдается в полосе B , что соответствует эффективной температуре $T = 6600 \text{ K}$, если бы это излучение соответствовало излучению черного тела. Кроме того, на рис.6 видно, что в указанные даты распределение энергии изменилось мало, а, следовательно, принимаемая эффективная температура тоже практически не изменилась. В эти дни показатели цвета $U-V$ и $B-V$ на двухцветной диаграмме локализованы вблизи звезд $F5V$, что тоже свидетельствует об эффективной температуре $T = 6500 \text{ K}$.

7. *Оценка скорости расширения фотосферы SN 2002ар по фотометрическим данным.* Согласно опубликованным спектрам, в максимуме блеска (7 февраля 2002г.) у SN 2002ар наблюдались очень широкие абсорбционные структуры, которые исследователи связывают с блендами линий $CoII$, $NiII$, $FeII$, $SiII$. По наблюдаемой длине волны минимума абсорбционной бленды $SiII$ с $\lambda_0 = 6355 \text{ \AA}$ Кинугаса и др. [16] определили скорость расширения вещества и, согласно их измерениям, 31 января 2002г. она была равна 35000 км/с . Другие наблюдатели по этой же самой бленде $SiII$ и для той же даты наблюдений дают оценки от 30000 до 38000 км/с . На следующие сутки, 1 февраля 2002г., скорость расширения составляла 30000 км/с , согласно [16]. Она уменьшилась до 16000 км/с к 6 февраля 2002г. и далее она уменьшалась экспоненциально со временем [16].

Однако, как следует из приведенных в статье Кинугаса и др. [16] спектров сверхновой SN 2002ар, основная часть излучаемой энергии 31 января и 1 февраля 2002г. была заключена в непрерывном спектре. Приводимый спектр от 31 января практически бесструктурный, в нем трудно увидеть какие-либо абсорбционные или эмиссионные детали. В спектре от 1 февраля уже начинает появляться какая-то структура, возможно, широкие абсорбции. Но они еще очень неопределенны. С другой стороны, уже 6 февраля спектр явно структурирован, в нем хорошо заметны абсорбционные детали. Однако сильное блендирование линий при малой глубине и чрезвычайно большой ширине абсорбционных полос делают оценку скорости довольно неопределенной, хотя авторы и указывают, что типичная ошибка в определении скоростей смещения линий сверхновой составляет ± 1000 км/с.

Поскольку спектр SN 2002ар в моменты, предшествующие максимуму блеска, т.е. 31 января - 2 февраля, практически был непрерывным и в нем отсутствовали заметные абсорбционные структуры, то можно полагать, что в это время мы наблюдали те слои раздувшейся оболочки, непрозрачность которых очень высока, т.е. фотосферу звезды. Наружные слои оболочки, которые можно рассматривать как обращаящий слой, начинают проявлять себя несколько позже, в моменты, близкие к максимальному блеску. Скорости наружных слоев, определяемые по абсорбционным линиям, могут существенно отличаться от скорости более глубоких слоев, составляющих фотосферу. Именно наличие большого градиента скорости делает абсорбционные детали мелкими. Обычно при моделировании спектров сверхновых в качестве одного из предположений принимается, что скорость меняется пропорционально радиусу [17]. Поэтому сравнение скоростей более внешних частей оболочки, определяемых по смещению абсорбционных линий, со скоростью расширения фотосферных слоев, т.е. более глубоких слоев, может дать интересный материал для дискуссии, конечно, если скорость расширения фотосферы будет определена независимым путем.

Итак, если в моменты, предшествующие максимуму блеска сверхновой SN 2002ар, считать непрерывное излучение соответствующим эффективной температуре $T = 6500$ К, то можно попытаться, хотя бы грубо, оценить скорость расширения фотосферы, исходя только лишь из фотометрических данных. Будем считать, что в дни, предшествующие максимуму блеска сверхновых, когда наблюдается только непрерывный спектр, мы можем применить формулу, справедливую для чернотельного излучения: $M_V = 28400/T - 5 \log(r_{ph}) - 0.19$, где M_V - абсолютная величина в полосе V, T - температура фотосферы в градусах и r_{ph} - радиус фотосферы, выраженный в радиусах Солнца. Зная абсолютную величину сверхновой, а также температуру фотосферы из распределения энергии в спектре

сверхновой до максимума блеска, можно оценить радиус. Исходя из размеров фотосферы для двух моментов (t_1 и t_2), мы определяем скорость ее расширения. Конечно, эта оценка довольно грубая, поскольку, как мы видели выше, распределение энергии в оптической области спектра невозможно описать одной температурой.

Расстояние до сверхновой (7.3 Мпк) и поглощение до нее известны ($A_V = 0^m.28$). Тогда для двух моментов предмаксимального блеска, а именно, для моментов $t_1 = \text{JD}2452307.3$ и $t_2 = \text{JD}2452308.3$ (1 и 2 февраля 2002г.) получаем абсолютные звездные величины, равные $M_{V1} = -16^m.70$ и $M_{V2} = -16^m.87$, которые соответствуют наблюдаемым зв. величинам $V_1 = 12^m.89$ и $V_2 = 12^m.73$. Принимая $T \approx 6500 \text{ K}$, находим $r_{ph1} = 15010 r_{\odot}$ и $r_{ph2} = 16210 r_{\odot}$, а скорость расширения фотосферы будет равна $v_{ph} = 9700 \text{ км/с}$. Мы видим, что эта скорость примерно в 3 раза меньше скорости, определяемой по линии поглощения SiII, т.е. меньше скорости слоя, более внешнего по отношению к границе фотосферы.

8. *Заключение.* Рассмотрение фотометрических данных в фильтрах $UBVR_Ic$ системы Джонсона-Казинса, согласно нашим наблюдениям и данным, взятым из литературы, показало, что на интервале около года со дня вспышки сверхновой SN 2002ар кривая блеска прошла три этапа в своем развитии: резкий подъем, после этого стадию быстрого экспоненциального спада и затем стадию более медленного затухания. По виду кривой блеска эта сверхновая является типичным представителем класса SN I. Запаздывание момента наступления максимального блеска в полосе I относительно полосы U для этой сверхновой составило 8.1 суток. По-видимому, зависимость оптической толщины оболочки от частоты и времени, прошедшего после взрыва, вместе с уменьшением температуры выброшенного вещества создают эффект запаздывания максимума блеска с ростом длины волны. По изменению показателей цвета ее можно, скорее всего, отнести к сверхновым SN Ic. На втором этапе эволюции блеска, на стадии быстрого спада яркости изменения показателей цвета обусловлены изменениями температуры, указывая на быстрое охлаждение выброшенного вещества. Если считать, что на предмаксимальной стадии распределение энергии в области от $\lambda 3000 \text{ \AA}$ до $\lambda 6000 \text{ \AA}$ похоже на излучение звезды спектрального класса F5V с эффективной температурой, равной $T_{eff} \approx 6500 \text{ K}$, то при этих условиях скорость расширения слоя, ответственного за излучение континуума, составляет около 9700 км/с.

Авторы благодарны Ю.С.Ефимову, предоставившему нам свои фотометрические оценки блеска сверхновой, сделанные на телескопе АЗТ-11. Мы признательны группе астрономов из Wise обсерватории за предоставленную возможность взять на сайте <http://wise-obs.tau.ac.il/~dovi/p/typing> таблицу с показателями цвета для сверхновых разных типов, вычисленными на

основе спектральных данных. Наблюдения были выполнены с CCD матрицей и сопутствующей аппаратурой, приобретенной по гранту CRDF UP1-2116.

¹ Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга, Россия и Крымское отделение Чилийского ин-та Исаака Ньютона, e-mail: doroshcn@sai.crimea.ua

² Крымская астрофизическая обсерватория, Украина и Крымское отделение Чилийского ин-та Исаака Ньютона, e-mail: sergeev@crao.crimea.ua

PHOTOMETRY OF SUPERNOVA SN 2002ap IN M 74 DURING 2002

V.T.DOROSHENKO¹, S.G.SERGEEV², N.I.MERKULOVA²,
E.A.SERGEEVA²

Results of the $UBVR_c$ observations of the Supernova star SN 2002ap obtained at the Crimean Astrophysical Observatory in February, October and November 2002 are reported. Consideration of our photometrical data together with those taken from literature has shown that the light curve of the Supernova SN 2002ap passed three stages in its development during an interval about one year since the day of its explosion: a stage of sharp rise, then a stage of the rapid exponential decline and a stage of slow fading. From the shape of its light curve, this Supernova is classified as a star of SN I type, but, taking into account colour indices variations, it is possible to make its classification more precise as a star of SN Ic type. During a stage of pre-maximum brightness, the energy distribution in the range from $\lambda 3000 \text{ \AA}$ to $\lambda 6000 \text{ \AA}$ looks like a radiation of spectral class F5V star. On the second stage of the light curve evolution, during a sharp decline, colour indices variations are connected with temperature variations, indicating the fast cooling of the ejected matter. Assuming the efficient temperature of the radiation at the stage of pre-maximum brightness equals to $T = 6500 \text{ K}$, we have estimated the velocity of expansion of a quasi-photosphere about 9700 km/s.

Key words: *stars:Supernovae - stars:photometry - stars:individual: SN 2002ap*

ЛИТЕРАТУРА

1. *S.Nakano, R.Kushida, Y.Kushida, W.Li*, IAU Circ., №7810, 2002.
2. *M.E.Sharina, I.D.Karachentsev, N.A.Tikhonov*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 119, 499, 1996.
3. *Y.-J.Sohn, T.J.Davidge*, Astron. J., 111, 2280, 1996.
4. *S.B.Pandey, G.C.Anupama, R.Sagar et al.*, astro-ph/0209507, 2002.
5. *S.J.Smartt, P.M.Vreeswijk, E.Ramirez-Ruiz et al.*, Astrophys. J., 572, L147, 2002.
6. *P.A.Mazzali, J.Deng, K.Maeda et al.*, Astrophys. J., 572, L61, 2002.
7. *A.Henden*, GCN GRB Circ., №1242, 2002.
8. *P.B.Stetson*, Publ. Astron. Soc. Pacif., 112, 925, 2002.
9. *G.Borisov, D.Dimitrov, E.Semkov et al.*, Inf. Bull. Var. Star, №5264, 2002.
10. *L.M.Cook, E.V.Katkova, N.A.Sokolov, I.S.Guseva*, Inf. Bull. Var. Star, №5283, 2002.
11. *A.Gal-Yam, E.O.Ofek, O.Shemmer*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 332, 73, 2002.
12. *Y.Yosii, T.Minezaki, T.Aoki et al.*, IAU Circ., №7930, 2002.
13. *K.Sarneczky, B.Sipocz, J.Vinko*, IAU Circ., №7940, 2002.
14. *A.Henden*, vsnet-campaign-SN 2002ap, №207, 208, 2002.
15. *D.Poznancki, A.Gal-Yam, D.Maoz et al.*, Publ. Astron. Soc. Pacif., 114, 833, 2002.
16. *K.Kinugasa, H.Kawakita, K.Ayani et al.*, Astrophys. J., 577, L97, 2002.
17. *D.Branch, S.Benetti, D.Kasen et al.*, Astrophys. J., 566, 1005, 2002.