

УДК 524.352-355/735

## ЗВЕЗДНО-ВЕТРОВАЯ ОБОЛОЧКА ОКОЛО МАССИВНОЙ ЗВЕЗДЫ-ПРАРОДИТЕЛЯ СВЕРХНОВОЙ XRF/GRB 060218/SN 2006aj

© 2008 Э. Сонбас<sup>1,2</sup>, А. С. Москвитин<sup>1</sup>, Т. А. Фатхуллин<sup>1</sup>, В. В. Соколов<sup>1</sup>,  
А. Кастро-Тирадо<sup>3</sup>, А. Де Угарте Постиго<sup>3</sup>, Г. Горосабель<sup>3</sup>,  
С. Гузий<sup>3</sup>, М. Желинек<sup>3</sup>, Т. Н. Соколова<sup>1</sup>,  
В. Н. Черненко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Турция, University of Sukurova, Department of Physics, 01330 Adana, Turkey

<sup>3</sup>Институт Астрофизики Андалусии (IAA-CSIC), P.O. Box 03004, 18080 Гранада, Испания

Поступила в редакцию 29 ноября 2007 г.; принята в печать 25 февраля 2008 г.

В полученных на 6-метровом телескопе САО РАН спектрах сверхновой SN 2006aj, отождествляемой с рентгеновской вспышкой (XRF) и гамма-всплеском XRF/GRB 060218/SN 2006aj, обнаружены детали, которые интерпретируются как линии водорода, что является признаком звездно-ветровой оболочки около массивной звезды-прародителя гамма-всплеска. Представлены результаты моделирования двух ранних спектров, полученных на 6-метровом телескопе через 2.55 и 3.55 суток после взрыва сверхновой SN 2006aj типа Ic ( $z=0.0331$ ). Спектры промоделированы в приближении Соболева с помощью программы SYNOW [1, 2]. В спектрах оптического послесвечения рентгеновской вспышки XRF/GRB 060218 были обнаружены спектральные особенности, которые интерпретируются как: (1) P Cуг-профиль линии H $\alpha$  для скорости 33000 км/с — широкая и незначительная деформация континуума в области длин волн 5600 – 6600 Å для первой эпохи (2.55 сут.) и (2) часть P Cуг-профиля линии H $\alpha$  в поглощении, сдвинутая в синюю сторону для скорости 24000 км/с — широкая спектральная особенность с минимумом на 6100 Å (в системе покоя с  $z=0$ ) для второй эпохи (3.55 сут.). С учетом ранних наблюдений, проведенных на 6-метровом телескопе, и спектров, полученных на других телескопах (ESO Lick, ESO VLT, NOT) до 23 февраля 2006 г., можно говорить о том, что мы наблюдаем эволюцию оптических спектров массивной сверхновой SN 2006aj типа Ic во время перехода от короткой фазы, связанной с выходом ударной волны ("shock breakout") во внешние слои звездно-ветровой оболочки, к спектрам фазы увеличения блеска сверхновой, соответствующей радиоактивному нагреву. Признаки водорода в спектрах послесвечения гамма-всплеска обнаруживаются впервые.

Key words: *рентгеновские и гамма-источники*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

18.149 февраля 2006 г. (здесь и далее даты, указанные в таком (десятичном) формате относятся ко всемирному времени (UT)) космическая обсерватория Swift обнаружила пекулярный гамма-всплеск (ниже используется английская аббревиатура GRB), сопровождавшийся мощной компонентой излучения сверхновой (SN) в спектрах и кривой блеска послесвечения GRB. Поэтому этот всплеск классифицируется одновременно и как GRB 060218, и как SN 2006aj: GRB 060218/SN 2006aj. Но поскольку в этом случае в спектре GRB преобладало рентгенов-

ское излучение, гамма-всплеск классифицируется и как XRF — обозначение рентгеновской вспышки (X-Ray Flash), а все событие обозначают или как XRF/GRB 060218/SN 2006aj, или XRF 060218/SN 2006aj. Последнее обозначение мы будем использовать ниже чаще всего, подчеркивая этим то важное для данной работы обстоятельство, что само явление сверхновой в случае SN 2006aj началось с мощной рентгеновской вспышки.

Для этого XRF/GRB-всплеска впервые были получены прямые наблюдательные признаки ранней фазы расширения ударной волны (УВ), воз-

никающей вследствие взрыва компактного ядра предсверхновой, и выхода этой волны к внешней границе звездно-ветровой оболочки звезды-прародителя СН. УВ сначала (в первые 2 часа) наблюдалась в основном в виде этой рентгеновской вспышки XRF 060218, а затем, когда оболочка стала оптически тонкой, в виде мощной ультрафиолетовой (УФ) вспышки с максимумом блеска через 11 часов после детектирования GRB [3, 4]. Первые 2800 секунд кроме нетепловой эмиссии, характерной для послесвечения гамма-всплесков, в рентгеновском спектре XRF 060218 присутствует мощная тепловая компонента, температура которой падает, и со временем максимум излучения смещается в УФ-оптическую часть спектра (см. Fig. 1 в статье [4] и Fig. 2 в [3]).

XRF/GRB 060218 является одним из самых близких гамма-всплесков с красным смещением  $z=0.0331$ . В этом отношении его можно сравнить с GRB 030329/SN 2003dh, имеющим красное смещение  $z=0.1683$ , который также отождествляется со СН типа Ic. Оба эти события вызвали большой интерес, поскольку такие совпадения (GRB и СН) случаются не часто — раз в два-три года [5]. Можно сказать, что исследование GRB — это новая фаза исследований все тех же массивных СН, но с самого начала этого явления. Поэтому ранние спектральные наблюдения в этих случаях оказываются очень важными для понимания механизма взрыва как самой массивной СН, так и механизма возникновения источника гамма-всплесков. 6-метровый телескоп, благодаря большой собирающей площади и восточному расположению относительно других крупных европейских обсерваторий, может сыграть важную роль в выполнении международной программы спектроскопических наблюдений (мониторинга) быстро слабеющего оптического послесвечения гамма-всплесков.

В нашей статье представлены спектры (см. Рис. 1), полученные на 6-метровом телескопе (Большой Телескоп Азимутальный, БТА) САО РАН [6]. Как и в случае GRB 030329/SN 2003dh [7], спектры XRF 060218/SN 2006aj — одни из самых ранних, полученных с большим отношением сигнал/шум. Сведения о ранних качественных спектрах собраны в Табл. 1. Хорошее качество позволяет применить к ним методы интерпретации, обычно применяемые для спектров СН типа Ic [1, 2].

Как было показано в работе [4], и саму рентгеновскую вспышку, и УФ-вспышку примерно через 10-11 часов после XRF 060218, а затем и УФ-избыток в ранних спектрах послесвечения можно объяснить взаимодействием УВ от СН со звездно-ветровой оболочкой около массивной звезды-прародителя. Это так называемый “shock

breakout” эффект или (русский перевод термина) прорыв УВ сквозь оболочку, окружающую коллапсирующее и взрывающееся ядро звезды.

Такой эффект для массивных СН (core-collapse SN Ib/c и SN II) известен уже давно [12–14] и может наблюдаться в виде относительно короткой фазы взрыва СН, которая, начинаясь с рентгеновской вспышки (XRF), заканчивается яркой УФ-вспышкой, возвещающей о прибытии УВ к поверхности взрывающейся звезды. Можно также говорить и о выходе УВ к верхним слоям или к оптически тонкой “поверхности” протяженной звездно-ветровой оболочки, окружающей коллапсирующее и взрывающееся ядро СН Ib или Ic типов. Ниже, имея в виду это явление, мы будем употреблять слова “эффект прорыва УВ”, или “выход УВ”, как аналоги короткого и общепринятого в англоязычной литературе термина “shock breakout”. Как для двух знаменитых сверхновых SN 1993J и SN 1987A, так и в случае XRF 060218/SN 2006aj этот эффект наблюдался в виде раннего резкого и короткого пика на оптической кривой блеска — см. Fig. 2 из статьи [4] и Рис. 2 в статье. Мы упоминали этот же эффект при объяснении самых первых спектров послесвечения GRB 030329/SN 2003dh, полученных через 10 часов после GRB 030329 [7]. А для XRF 060218/SN 2006aj, благодаря детектированию GRB в начале вспышки СН, то есть еще до выхода УВ на поверхность, ее движение в недрах звездно-ветровой оболочки удалось наблюдать первые 2 часа в виде рентгеновской вспышки (XRF) с тепловым спектром.

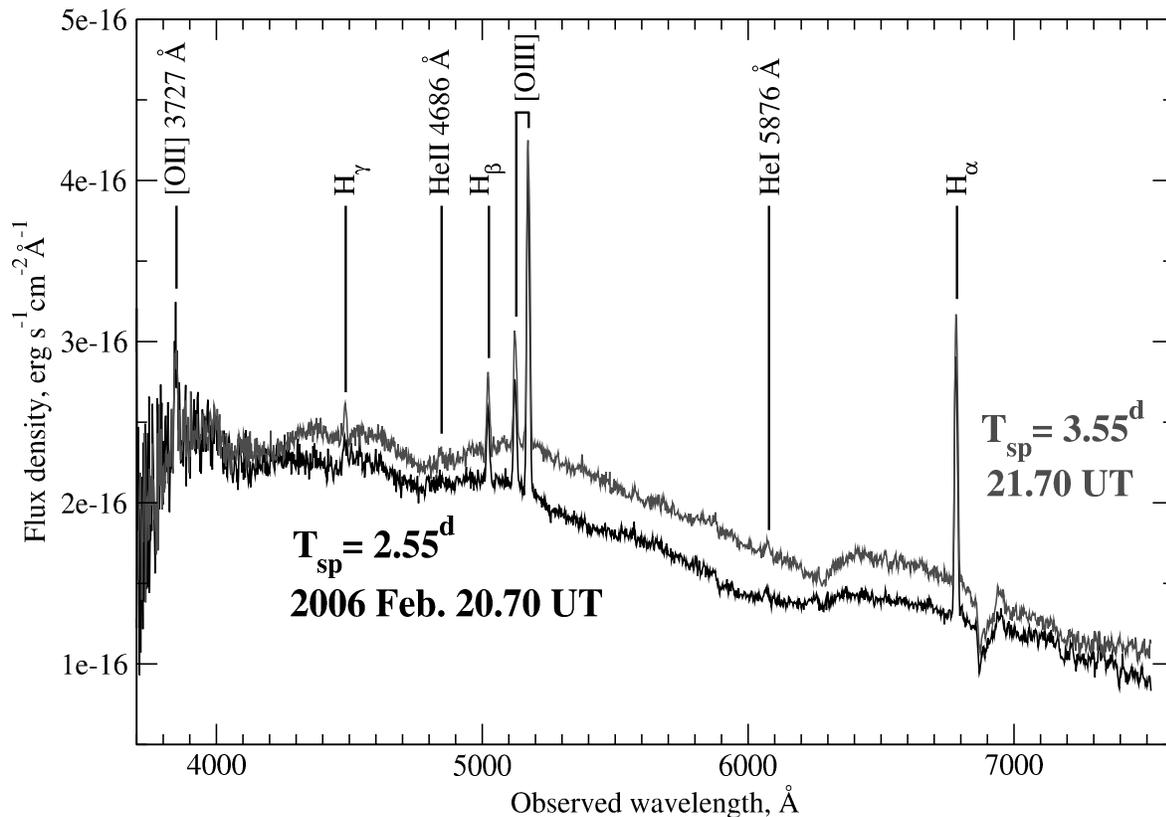
Из Табл. 1 видно, что спектры, полученные на 6-метровом телескопе, относятся к минимуму на кривой блеска, т.е. мы наблюдаем переход:

- от фазы (1) теплового излучения, связанного с выходом УВ к “поверхности” звездно-ветровой оболочки — первый пик на Рис. 2,
- к фазе (2) последующего увеличения блеска СН — с максимумом через 10 дней (Рис. 2), который соответствует (нетепловому) радиоактивному нагреву расширяющейся оболочки СН вследствие распада  $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ .

Таким образом, физические условия во время наших наблюдений быстро менялись, и интерпретации спектров переходной фазы посвящена данная работа. Но перед тем, как сравнивать наблюдаемые и теоретические спектры во втором разделе статьи, в этом разделе мы приведем оценки характерных энергий, температур, размеров и скоростей,

**Таблица 1.** Ранние спектры сверхновой XRF 060218/SN 2006aj, полученные до 23 февраля 2006 г. на разных телескопах. Указано время получения спектра после вспышки XRF/GRB 060218:  $T_{sp}$  — число суток после 18.149 февраля 2006 г. Приведены только спектры с высоким отношением сигнал/шум. Ранние спектры, полученные [8] на 1.5-метровом телескопе FLWO через 3.97 суток после всплеска, сюда не включены из-за низкого отношения сигнал/шум.

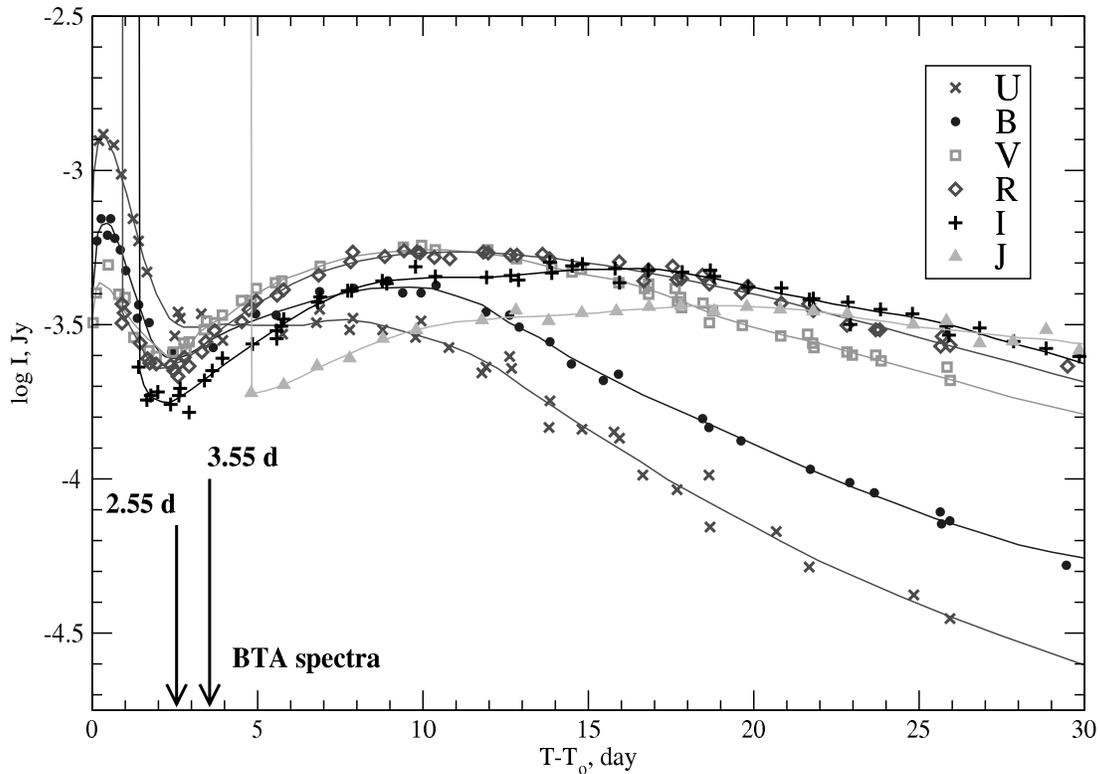
Телескоп	$T_{sp}$ (дата в 2006 г.)	Ссылки
MDM (2.4 м)	1.95 сут. (20.097 февр.)	[9]
БТА (6 м)	2.55 сут. (20.70 февр.)	[6]
ESO VLT (8 м)	2.89 сут. (21.041 февр.)	[10]
БТА (6 м)	3.55 сут. (21.70 февр.)	[6]
NOT (2.56 м)	3.78 сут. (21.93 февр.)	[11]



**Рис. 1.** Наблюдаемые спектры послесвечения XRF 060218/SN 2006aj, полученные на 6-метровом телескопе [6]. Отмечены UT моменты времени и время наблюдений после начала взрыва СН. Показаны также эмиссионные линии родительской галактики ( $z=0.0331$ ).

которые прямо следуют из результатов наблюдений вспышки XRF 060218 в рентгеновском и УФ-диапазонах, полученных до начала спектральных наблюдений на 6-метровом телескопе.

1) *Энергии рентгеновской и УФ-вспышек.* В работе [4] приводятся кривые блеска в диапазонах XRT (0.3–10 кэВ) и UVOT. Там же сделана оценка энергии, излученной в гамма и рент-



**Рис. 2.** Оптические (U, B, V, R, I) и инфракрасная (J) кривые блеска XRF 060218/SN 2006aj [15]. Первый максимум соответствует УФ-вспышке — эффекту выхода UV (см. текст). Спектры из Табл. 1 относятся к переходной области около минимума кривых. Стрелками указано время получения спектров на 6-метровом телескопе после начала взрыва SN.  $T_0$  (сут.) соответствует 18.149 февраля 2006 г.

геновском диапазоне в течение первых двух часов, когда UV еще идет через ветровую оболочку. Выделяющаяся при этом энергия рентгеновской вспышки порядка  $6 \times 10^{49}$  эрг. Затем, примерно через 8–11 часов, УФ-кривая блеска показывает мощный пик — первый максимум на Рис. 2, вызванный выходом UV на поверхность или, точнее, выходом к внешней границе звездно-ветровой оболочки, когда она становится достаточно прозрачной. УФ-вспышка — это и есть колгейтовский “shock breakout” эффект [12]. Сделанная по данным из [4] оценка энергии, выделившейся в этой УФ-вспышке в диапазоне Swift/UVOT примерно за 28 часов, дает число того же порядка  $3 \times 10^{49}$  эрг, что прямо говорит об одной и той же природе рентгеновской и УФ-вспышек.

2) *Эволюция температуры.* Сначала, когда UV прорывается через ветровую оболочку и энергия выделяется в основном в рентгеновском диапазоне, тепловой спектр хорошо соответствует температурам  $kT \approx 0.17$  кэВ, что эквивалентно  $2 \times 10^6$  К. Ко времени УФ-вспышки (11 часов после GRB) — первый максимум на Рис. 2 — температура падает до (0.03 – 0.05) кэВ

(350 – 580 тыс. К) или ниже, учитывая неопределенности измерений  $kT$  на Swift/UVOT в это время (в диапазон UVOT попадает только часть черного потока, см. [3]). А еще через 22.5 часа температура тепловой компоненты уменьшается до 43000 К или до  $kT \approx 3.7_{-0.9}^{+1.9}$  эВ ([4], Fig. 3). Таким образом, можно думать, что, в соответствии с оценками темпа уменьшения температуры, приведенными в статье [4], к моменту наших первых спектральных наблюдений (2.55 сут. после GRB, см. Табл. 1) температура может быть еще ниже — меньше 10000 К.

3) *Размеры звездно-ветровой оболочки.* По данным, приведенным в статье [4], можно также оценить радиус ветровой оболочки, окружающей звезду Вольфа-Райе перед взрывом. Аргументы в пользу окружающей плотной звездно-ветровой оболочки звезды Вольфа-Райе в качестве звезды-прародителя XRF 060218/SN 2006aj приведены и в работе [3]. Размеры этой оболочки естественно связать с яркой УФ-вспышкой, наблюдавшейся через 11 часов после GRB. В этот момент UV, которая до этого наблюдалась только в рентгеновском диапазоне, становится видимой

и в оптическом, поскольку слои ветровой оболочки над УВ становятся оптически тонкими, и УВ выходит на “поверхность” (точнее, в верхние слои) этой протяженной оболочки, связанной со звездой-прародителем/пред-СН. В это время, согласно данным Swift/UVOT об эволюции температуры и радиуса тепловой компоненты послесвечения GRB/XRF 060218, то есть при температуре  $kT \sim (0.03-0.05) \text{ кэВ}$  в момент максимума блеска ( $\sim 10^4 \text{ с}$ ), размеры ветровой оболочки вокруг пред-СН должны были быть  $300R_{\odot}$  при болометрической светимости  $(4.6 - 35.5) \times 10^{45} \text{ эрг/с}$ .

4) *Скорость ударной волны.* Пока УВ движется внутри звездно-ветровой оболочки, радиус, соответствующий тепловой компоненте излучения (связанной с УВ, прорывающейся из центра), все время увеличивается примерно от  $5.7R_{\odot}$  и до  $17R_{\odot}$ , как это следует из тех же данных [4] рентгеновских наблюдений, проведенных на Swift/XRT до максимума УФ-вспышки. Радиус тепловой компоненты продолжает расти до  $4700R_{\odot}$  за 1.4 суток (см. Fig. 3 из статьи [4]), т.е. ко времени наблюдений, проведенных на Swift/UVOT после максимума УФ-вспышки. В это время УВ уже вышла на “поверхность” звездно-ветровой оболочки и светимость тепловой компоненты уменьшилась (см. Рис. 2). Поделив путь, пройденный УВ (или радиус  $3.29^{+0.94}_{-0.93} \times 10^{14} \text{ см}$  тепловой компоненты при  $kT \approx 3.7^{+1.9}_{-0.9} \text{ эВ}$ ) на время (1.4 суток), можно получить оценку скорости расширения фотосферы, связанной с УВ к моменту начала спектральных наблюдений:  $(2.7 \pm 0.8) \times 10^9 \text{ см/с}$  [3]. Такая скорость типична для массивных СН и она сравнима с ширинами линий, наблюдаемыми в спектре SN 2006aj [10].

Далее будет показано, что приведенные выше оценки энергий, температур, размеров и скоростей, сделанные по данным наблюдений выхода УВ обсерваторией Swift/XRT/UVOT, подтверждаются и при анализе наших оптических спектров XRF 060218/SN 2006aj, полученных через 2.55 и 3.55 суток после начала вспышки этой СН. То есть тогда, когда вклад тепловой компоненты излучения УВ в этих спектрах все еще был определяющим, на что указывают и сильные голубые избытки в наших спектрах (Рис. 1). Но, как видно из UVVR-кривых блеска (Рис. 2), через 5 суток послесвечение GRB уже заметно краснеет, что связано с изменением механизма излучения СН к этому времени, когда начинается классическая, т.е. обычно наблюдаемая и много раз описанная в обзорах (см., например, [16]), фаза расширения оболочек СН.

В разделе 2 говорится о ранних спектральных наблюдениях оптического послесвечения XRF 060218/SN 2006aj, проведенных на 6-м телескопе САО РАН. В разделе 3 описывается моделирование спектров с помощью программы SYNOW и обсуждаются спектральные проявления ветровой оболочки в виде широких абсорбций около  $5800\text{Å}$  и  $6100\text{Å}$  (в системе покоя с  $z=0$ ), соответствующих поглощению в  $\text{H}\alpha$  линии водорода. Раздел 4 содержит обсуждение результатов в контексте:

- явной эволюции признаков линии  $\text{H}\alpha$  по данным для XRF 060218/SN 2006aj, полученным на 6-метровом и других телескопах,
- проявлений колгейтовского “shock breakout” эффекта в кривых блеска, спектрах, размерах и светимостях “обычных” СН типов Ib/c,
- асимметрии взрывов массивных СН.

В разделе 5 сформулированы выводы.

## 2. РАННИЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПОСЛЕСВЕЧЕНИЯ XRF 060218/SN 2006aj НА 6-МЕТРОВОМ ТЕЛЕСКОПЕ САО РАН

В рамках программы срочных наблюдений оптического послесвечения на 6-метровом телескопе была проведена спектроскопия обнаруженного телескопом Swift/UVOT переменного объекта, отождествленного с событием XRF 060218. Нами был использован редуктор светосилы SCORPIO, установленный в первичном фокусе 6-метрового телескопа<sup>1)</sup>. Наблюдения были проведены в два блока: 16:31-17:18, 20 Февраля 2006 г. и 16:31-17:16 21 Февраля 2006 г. В качестве диспергирующего элемента использована комбинация прозрачной решетки и призмы VPHG550G с рабочим диапазоном  $3500 - 7500\text{Å}$  и разрешением (FWHM)  $10\text{Å}$ .

Обработка данных была выполнена стандартным способом и включала в себя вычитание электронного нуля, коррекцию за плоское поле, калибровку по длинам волн с помощью спектра сравнения Ne-Ar-лампы, коррекцию за атмосферную экстинкцию и калибровку по абсолютному потоку с использованием наблюдений спектрофотометрического стандарта в каждую из ночей. Для обнаружения возможной короткой временной переменности и контроля калибровки абсолютных потоков

<sup>1)</sup><http://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio/scorpio.html>

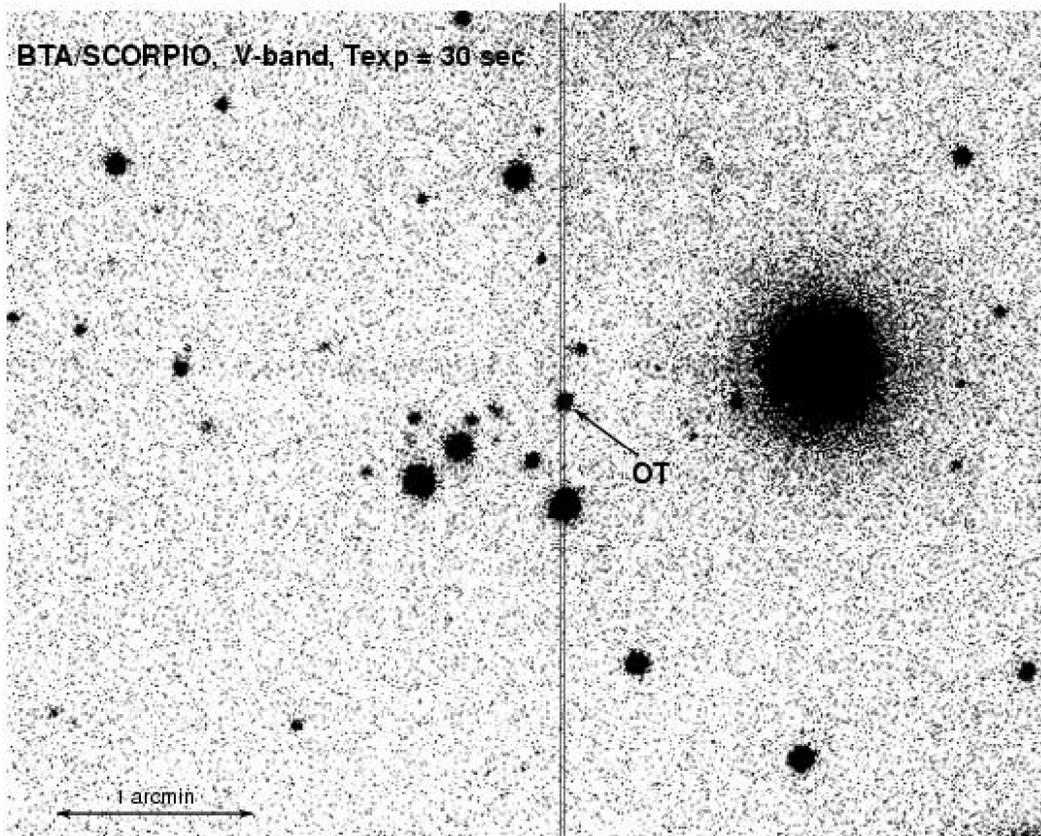


Рис. 3. Поле оптического транзиента. Начало спектральных наблюдений на 6-метровом телескопе: 20.647 февраля 2006 г. (около 60 часов после GRB) П.А. =  $3^\circ$  — позиционный угол щели,  $V_{OT} = 18.16$ ,  $(B - R)_{OT} = 0.3$

от ночи к ночи вместе с оптическим транзиентом на входную щель выставлялся яркий звездообразный объект (см. Рис. 3). Всего было сделано по 4 экспозиции в каждую из ночей. Мы не обнаружили какой-либо короткой временной переменности во время наших наблюдений, поэтому сложили все четыре индивидуальных спектра для улучшения отношения сигнал/шум. На Рис. 1 показаны средние спектры в каждую из ночей, в Табл. 1 указаны средние эпохи для этих спектров.

Полученные спектры (Рис. 1) были затем исправлены (Рис. 5 и 6) за поглощение в Галактике, согласно картам распределения пыли [17].

Избыток цвета  $E(B - V)$  в направлении объекта ( $\alpha_{2000} = 03^h 21^m 39^s.683$ ,  $\delta_{2000} = +16^\circ 52' 01''.82$ ) составил 0.14. При учете поглощения была принята модель экрана для распределения пыли (dust-screen model), при этом выражение для учета экстинкции имеет вид

$$F_{int}(\lambda) = F_{obs}(\lambda)10^{0.4 \cdot k(\lambda)E(B-V)},$$

где  $F_{int}(\lambda)$  и  $F_{obs}(\lambda)$  — испускаемый (без поглощения) и наблюдаемый потоки — соответственно. Кривая экстинкции Млечного пути ( $k(\lambda)$ ) была взята из работы [18].

### 3. СРАВНЕНИЕ НАБЛЮДАЕМЫХ СПЕКТРОВ XRF 060218/SN 2006aj С СИНТЕТИЧЕСКИМИ СПЕКТРАМИ

Для интерпретации спектров мы использовали программу “SYNOW” вычисления синтетических спектров СН [1]. Эта многопараметрическая программа уже много раз применялась для прямого анализа спектров массивных СН, когда водород обнаруживался в фазе радиоактивного нагрева расширяющейся оболочки [2, 19, 20]. Алгоритм расчета модельных спектров основан на таких предположениях, как: сферическая симметрия, гомологичное расширение слоев и резкая граница фотосферы. Эту оптически толстую фотосферу, излучающую чернотельный спектр, мы можем отождествлять с УВ при интерпретации ранних спектров. По крайней мере это справедливо в первые дни ( $T_{sp} = 1.95$  сут. и 2.55 сут. из Табл. 1) после XRF 060218, когда спектры (Рис. 1) и фотометрия (Рис. 2) еще показывают большой голубой избыток, что связано с влиянием тепловой компоненты излучения от первой короткой и мощной УФ-вспышки. Предполагается, что спектральные линии образуются над этой расширяющейся фотосферой в результате резонансного рассеяния, ко-

торое трактуется в кодах SYNOW в приближении Соболева [21–24].

С помощью этой программы можно провести отождествление линий, оценку скорости расширения фотосферы и интервал (или разброс) скоростей для линий каждого обнаруженного в спектре иона. Подробное описание программы SYNOW можно найти в цитируемых выше статьях [1, 2]. Существенным для понимания наших результатов является то, что в программе SYNOW скорость расширения слоев над фотосферой пропорциональна расстоянию от каждой точки расширяющегося слоя до центра ( $V \propto r$ ).

Судя по форме наблюдаемых спектральных особенностей, можно говорить о двух случаях: неотделения (“undetached case”) и отделения (“detached case”) от поверхности расширяющейся фотосферы атмосферных слоев, в которых формируется спектральная линия. Если вещество пришедших в движение слоев газа, расположенных над фотосферой, не отделяется от нее (т. е. излучают и экранируют фотосферу все слои, начиная от ее уровня), то линия наблюдается в абсорбции и в эмиссии так, как в рассматриваемом здесь случае (Рис. 4) линии классического P Cyg-профиля. Эту модель неотделившихся от фотосферы слоев мы выбрали для интерпретации нашего первого спектра ( $T_{sp}=2.55$  сут., см. Рис. 1). Кроме того, в этот момент, по-видимому, еще можно отождествлять расширяющуюся фотосферу с УВ, так как наш первый спектр (с большим избытком в синей его части) был получен ближе к моменту выхода УВ к “поверхности” звездно-ветровой оболочки, окружавшей пред-СН — первый максимум на Рис. 2.

Отделившийся от фотосферы слой проявляет себя в спектре в виде сглаженной эмиссии и сильно сдвинутой в синюю сторону абсорбции — “остатка” (части) P Cyg-профиля — так, как показано на Рис. 4. Отделение атмосферы реализуется тогда, когда скорость слоя, в котором формируется спектральная линия, заметно превышает скорость фотосферы. Если  $V \propto r$ , то абсорбционная часть P Cyg-профиля — результат экранирования фотосферы узким слоем, а эмиссия тем слабее, чем уже излучающий спектральную линию слой. Такая модель соответствует второму нашему спектру ( $T_{sp}=3.55$  сут.) по крайней мере для линий H $\alpha$ , которые могут возникать в ветровой оболочке. Можно предположить, что в результате действия УВ в движение пришли и “оторвались” самые верхние слои этой протяженной ветровой оболочки, окружавшей звезду-прародителя GRB/СН.

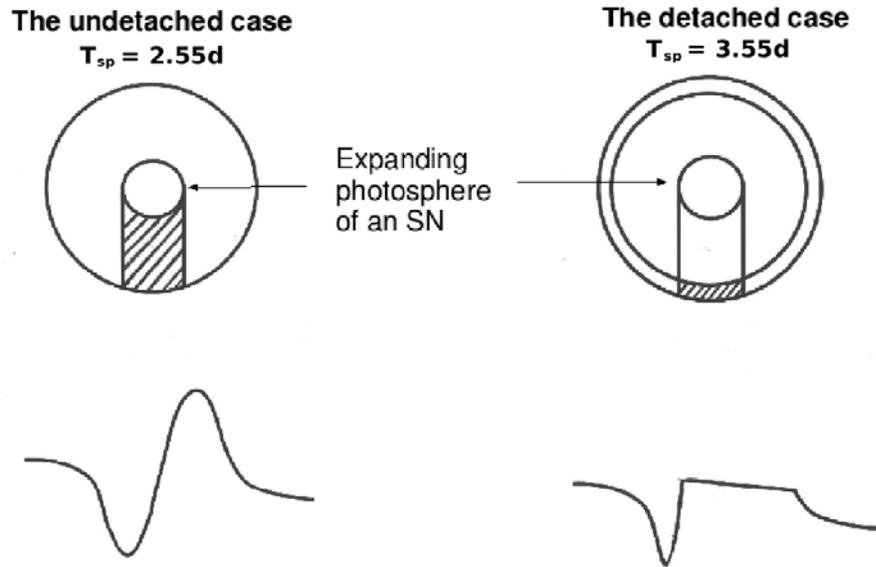
Через 3.55 суток после вспышки СН, когда влияние тепловой компоненты уменьшается (Рис. 2), и расширяющаяся оболочка СН становится все

более и более прозрачной, УВ уже не может полностью отождествляться с фотосферой. Начинается так называемая фотосферная фаза взрыва СН, для интерпретации спектров которой в основном и применялся код SYNOW ([2], см. также ссылки в ней).

На Рис. 5 и 6 спектры XRF 060218/SN 2006aj, полученные на 6-метровом телескопе через 2.55 и 3.55 суток после всплеска, сравниваются с синтетическими спектрами, смоделированными с помощью программы SYNOW. Первый спектр, полученный сразу же после яркой УФ-вспышки (Рис. 2), легко моделируется для довольно простого набора параметров. Температуру фотосферы ( $t_{bb}$ ), с помощью которой подгоняется распределение энергии в спектре на Рис. 5 (с длинами волн в системе покоя), мы выбрали равной 9000 К. Это соответствует и темпу уменьшения температуры по результатам наблюдений Swift/XRT/UVOT [4], согласно которым к началу наших спектральных наблюдений температура должна быть меньше 10000 К. В спектре, полученном через 2.55 суток, SYNOW модель показывает скорость фотосферы 33000 км/с. И этот параметр также лежит в пределах ошибок оценки скорости расширения фотосферы, связанной с УВ, которая получается из тех же Swift/XRT/UVOT данных ( $(2.7 \pm 0.8) \times 10^4$  км/с).

Это означает, что к моменту начала наших спектральных наблюдений, примерно через сутки после последних Swift/UVOT наблюдений слабеющей УФ-вспышки, скорость движения УВ осталась в тех же пределах. Более того, широкая и трудно заметная из-за этого депрессия в непрерывном спектре (см. Рис. 1 с наблюдаемыми длинами волн) на 5900 – 6300 Å, а также почти незаметный избыток потока в интервале длин волн 6300 – 6900 Å лучше всего подгоняются широким P Cyg-профилем линии H $\alpha$  (см. Рис. 5) при той же скорости 33000 км/с. Это соответствует в программе SYNOW случаю неотделения атмосферы (Рис. 4.)

Можно предположить, что какая-то часть звездно-ветровой оболочки, расположенная над фотосферой, или протяженный слой над ней в это время движется вместе с фотосферой, и мы наблюдаем ускорение или отрыв верхних слоев этой оболочки. Это еще один результат, через 2 сут. после яркой УФ-вспышки, выхода УВ на “поверхность” (почти) покоящейся до взрыва СН массивной околосредней оболочки. Согласно оценкам, приведенным во “Введении”, размеры этой оболочки были в районе  $300 R_{\odot}$  по крайней мере на момент выхода УВ через 11 часов после GRB. Для демонстрации того, что почти незаметное колебание потока на Рис. 1 в



**Рис. 4.** Профили линий, соответствующих случаям неотделившихся от расширяющейся фотосферы и отделившихся от нее слоев оболочки (то есть слоев над фотосферой), когда скорость расширения газа растет пропорционально расстоянию от центра ( $V \propto r$ , см. текст). Заштрихованы области, формирующие абсорбционную компоненту P Cyg-профиля.

интервале  $5900 - 6900\text{\AA}$  наблюдаемого спектра действительно может быть очень широким P Cyg-профилем линии  $\text{H}\alpha$  для скоростей около  $0.3 \times 10^{10}$  см/с, на Рис. 5 мы приводим модельный спектр с классическим P Cyg-профилем, но для гораздо меньшей скорости, равной 8000 км/с (лабораторная длина волны линии  $\text{H}\alpha$  отмечена узкой эмиссией родительской галактики).

Нами была произведена подгонка случая неотделения различными синтетическими спектрами, но скорость для фотосферы ( $V_{\text{phot}}$ ), всех элементов и их ионов ( $v_{\text{line}}$ ) одна и та же, и равна 33000 км/с. Основные параметры расчета приведены в Табл. 2 для варианта “undetached case” на Рис. 5. Отличие здесь только в эффективных глубинах формирования линий ионов ( $\tau/\tau_1$ ), которые для всех элементов и для их ионов достаточно выбрать относительно небольшими ( $\tau < 0.5$ ), чтобы удовлетворительно описать наблюдаемый спектр. В диапазоне длин волн примерно равном  $4500 - 7200\text{\AA}$  наибольшую величину  $\tau=0.2$  имеет водород, остальные элементы и их ионы в синтетическом спектре учтены при еще меньших  $\tau$ , что может отражать небольшие изменения в относительном содержании других элементов по сравнению с самым обильным. Это может быть связано с тем, что в этом первом спектре ( $T_{\text{sp}}=2.55$  сут.) вклад звездно-ветровой оболочки все еще является определяющим.

Надо сказать, что мы добивались наилучшего согласия наблюдаемого и синтетического спектров

для той их части, где наблюдения дают наилучшее значение отношения сигнал/шум и теоретический спектр проходит в пределах шумовой дорожки или максимально близко к ней. В частности, слева от эмиссионной линии родительской галактики  $[\text{OII}]3727\text{\AA}$  (на Рис. 5) намечающийся дефицит потока удается описать влиянием  $\text{CaII}$  с  $\tau=0.5$  — это наибольшее значение эффективной глубины формирования, которое мы используем в данной работе, посвященной интерпретации самых ранних спектров послесвечения XRF 060218/SN 2006aj.

На втором нашем спектре для  $T_{\text{sp}}=3.55$  суток (см. Рис. 1 с наблюдаемыми длинами волн) видна какая-то абсорбция на  $6300\text{\AA}$ , которая интерпретируется нами здесь как сильно сдвинутый в синюю сторону “остаток” P Cyg-профиля линии  $\text{H}\alpha$ . Наилучшая подгонка синтетического спектра к наблюдаемому соответствует случаю обозначенному “detached case” на Рис. 4, когда часть ветровой оболочки уже “оторвалась” от фотосферы. То есть вклад тепловой вспышки (Рис. 2) быстро уменьшается и УВ становится все более и более прозрачной — начинается фотосферная фаза расширения оболочки СН ([1]).

Мы моделировали этот второй спектр в интервале скоростей ( $18000 < V < 24000$ ) км/с (см. Рис. 6 с длинами волн в системе покоя с  $z=0$ ). Самый близкий к наблюдаемому синтетический спектр — спектр с параметрами модели из Табл. 3, где скорость фотосферы равна 18000 км/с, а ее

температура  $t_{bb} = 8200$  К. В синтетическом спектре учитывался вклад линий с малыми значениями  $\tau (< 0.3)$  таких ионов, как:  $\text{HI}$ ,  $\text{HeI}$ ,  $\text{FeII}$ ,  $\text{SiII}$ ,  $\text{OI}$ ,  $\text{CaI}$ ,  $\text{CaII}$ ,  $\text{TiII}$ ,  $\text{NI}$ ,  $\text{CI}$ ,  $\text{CII}$ ,  $\text{MgI}$ ,  $\text{MgII}$ ,  $\text{NaI}$ . На Рис. 6 показано положение некоторых из этих линий или тех областей в спектре, где вклад данного иона в спектр существен при заданных параметрах модели из Табл. 3. Список используемых в программе SYNOW линий (“the reference lines”) приведен в [2], более подробная информация дается прямо в программе SYNOW<sup>2)</sup>.

Широкая абсорбция с минимумом в районе  $6100\text{\AA}$  (Рис. 6) может быть описана влиянием  $\text{HI}$  для случая “detached case” (Рис. 4) при  $\tau = 0.16$ . Синтетический спектр в этом месте ( $5700 - 6500\text{\AA}$  на Рис. 6) характеризуется сглаженной эмиссией с красной стороны и сильно сдвинутой в синюю сторону абсорбцией с минимумом в районе  $6100\text{\AA}$  — “остатком”  $\text{P Cug}$ -профиля  $\text{H}\alpha$  линии  $\text{HI}$ .

Итак, для  $T_{sp}=3.55$  суток водород уже отделился от фотосферы и соответствующий слой движется со скоростью  $24000$  км/с (см. Табл. 3). И здесь все ионы были взяты с малыми значениями  $\tau < 0.3$ , но при одинаковых значениях всех других параметров описать весь этот наблюдаемый спектр не удастся так, как было в Табл. 2 (“undetached case”). Слои, где в основном формируются линии других элементов, движутся либо с такими же скоростями, как и фотосфера ( $18000$  км/с для линий  $\text{OI}$ ,  $\text{CaI}$ ,  $\text{CaII}$ ,  $\text{TiII}$ ,  $\text{NI}$ ,  $\text{NaI}$ ), либо с той же скоростью, что и водород ( $24000$  км/с для линий  $\text{HI}$ ,  $\text{HeI}$ ,  $\text{FeII}$ ,  $\text{SiII}$ ,  $\text{CI}$ ,  $\text{CII}$ ,  $\text{MgI}$ ,  $\text{MgII}$ ). Характерные величины скоростей (параметр  $v_e$  в Табл. 3), определяющие характерную толщину слоев, занятых каждым элементом, также приходится выбирать разными для наилучшего описания наблюдаемого спектра. Можно предположить, что на этот спектр уже больше влияет изменившийся в результате эволюции и взрыва далеко проэволюционировавшего массивного ядра звезды-прародителя химический состав разлетающейся оболочки  $\text{CH}$ .

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

##### 4.1. Эволюция спектров XRF 060218/SN 2006aj и других массивных $\text{CH}$

Широкую и малоконтрастную особенность в спектре послесвечения XRF060218/SN 2006aj с минимумом на  $6100\text{\AA}$  (в системе покоя при  $z=0$ ) можно проследить во всех ранних спектрах, полученных на нашем и на других телескопах, начиная с 21.70 февраля 2006 г. (см. Табл. 1). Самый близкий

(21.93 февраля) по времени к нашему второму спектру из Табл. 1 — это спектр, полученный на NOT (см. Fig. 2 в статье [11]), в котором также есть минимум на той же длине волны в районе  $6100\text{\AA}$ . Эту же деталь видно и на ESO Lick спектре, полученном 22.159 февраля, но отношение сигнал/шум тут заметно ниже (это второй спектр на Fig. 1 в статье [25]), чем для двух упомянутых выше спектров. Из данных, которые приведены на Fig. 1 в статье [25], видно, что эта деталь явно эволюционирует, начиная с самого первого VLT спектра, и становится наиболее глубокой в спектре, полученном на VLT 23.026 февраля, то есть примерно через 5 суток после XRF 060218. В более поздних спектрах, полученных уже после минимума на кривой блеска (см. наш Рис. 2), все больше сказывается влияние усиливающейся широкой абсорбции, связанной с  $\text{SiII}$  и находящейся в районе  $6000\text{\AA}$ , как отмечают авторы работы [25]. Но узкий минимум на  $6100\text{\AA}$  все еще виден даже на мартовских VLT спектрах. Это очень похоже на то, что наблюдают и в спектрах некоторых  $\text{CH}$  типа Ib [26], где узкая абсорбция, связанная с  $\text{H}\alpha$ , тоже обнаруживается и эволюционирует в спектрах, полученных в начале такого же, как и на нашем Рис. 2, длительного подъема к типичному (для  $\text{CH}$  типов Ib и Ic) максимуму блеска.

Начало эволюции спектральной особенности на  $6100\text{\AA}$ , которая прослеживается затем для XRF 060218/SN 2006aj по данным с других телескопов, подтверждается и нашими спектрами, о которых речь шла выше. Но мы включаем сюда и первый спектр, полученный на 6-метровом телескопе 20.70 февраля, интерпретируя широкую и почти незаметную депрессию континуума в интервале  $5600 - 6600\text{\AA}$  ( $5800 - 6800\text{\AA}$  — наблюдаемые длины волн на Рис. 1 для  $T_{sp}=2.55$  сут.) как  $\text{P Cug}$ -профиль линии  $\text{H}\alpha$  для скоростей  $33000$  км/с. Это же небольшое колебание континуума можно видеть и на самом первом VLT спектре от 21.041 февраля (см. Fig. 1 в статье [25]), полученном через 8 часов после нашего первого спектра. Что касается спектра, полученного на MDM 14.5 часов раньше нашего (см. Табл. 1), то и там можно видеть слабое изменение континуума на  $5700\text{\AA}$ , заметное даже при низком отношении сигнал/шум [9]. И здесь с отождествлением, предложенным авторами, вполне может конкурировать все тот же очень широкий  $\text{P Cug}$ -профиль линии  $\text{H}\alpha$  для скоростей  $30000$  км/с. Таким образом, имея в виду все ранние наблюдения из Табл. 1, можно говорить о том, что мы действительно наблюдаем эволюцию оптических спектров — переход от фазы колгейтовского “shock breakout” эффекта и связанной с ним мощной (тепловой) УФ-вспышки к спектрам фазы

<sup>2)</sup><http://www.nhn.ou.edu/~parrent/synow.html>

**Таблица 2.** Таблица задаваемых для расчета параметров модели в случае неотделившихся от фотосферы слоев для всех элементов и их ионов ("the undetached case" на Рис. 4). Параметры соответствуют синтетическому спектру, изображенному толстой черной линией на Рис. 5 (см. текст). Более подробную информацию о задании параметров для программы SYNOW см. в <http://www.nhn.ou.edu/~parrent/synow.html>

Параметры	"the undetached case"
$V_{phot}^a$	33000
$V_{max}^b$	70000
$t_{bb}^c$	9000
ai <sup>d</sup>	HI, HeI, FeIII, FeII, SiII, SiI, OI, CaII, TiII, CII, CI, NI, MgII, MgI, MnII, NeI
tau1 <sup>e</sup>	0.2, 0.08, 0.04, 0.04, 0.0002, 0.0002, 0.002, 0.5, 0.02, 0.0005, 0.0005, 0.1, 0.0002, 0.0002, 0.0002, 0.0005
vmine <sup>f</sup>	33.00 для всех ионов
ve <sup>g</sup>	20.00 для всех ионов

<sup>a</sup> $V_{phot}$  - скорость фотосферы в км/с.

<sup>b</sup> $V_{max}$  - верхний предел скоростей в модели.

<sup>c</sup> $t_{bb}$  - температура фотосферы в град. К.

<sup>d</sup>ai - стадии ионизации всех учтенных в модели ионов.

<sup>e</sup>tau1 - соответствующие эффективные оптические глубины формирования линий каждого иона.

<sup>f</sup>vmine - наименьшие скорости над фотосферой для каждого иона (в 1000 км/с)

<sup>g</sup>ve - характерные величины скорости ( $v_e$ ) в используемом нами законе, зависимости оптических глубин линий данного иона  $\tau$  от  $v$ ,  $\tau(r) \propto \exp(-v(r)/v_e)$ , где  $v \propto r$ .

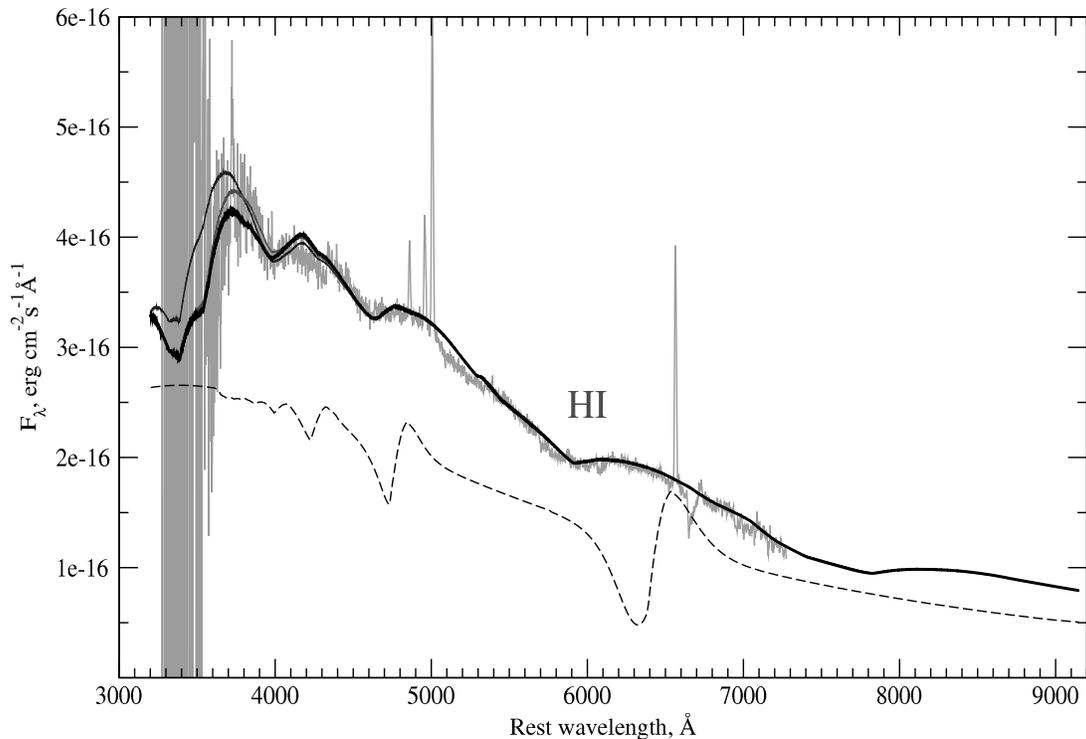
**Таблица 3.** Параметры SYNOW модели для случая отделившихся от фотосферы слоев некоторых элементов в расширяющейся оболочке СН ("detached case" на Рис. 4). Параметры соответствуют одному из синтетических спектров, показанному на Рис. 6 черной толстой линией (см. текст).

Параметры	"detached case"
$V_{phot}$	18000
$V_{max}$	75000
$t_{bb}$	8200
ai	HI, HeI, FeII, SiII, OI, CaI, CaII, TiII, CII, CI, NI, MgII, MgI, NaI
tau1	0.16, 0.02, 0.08, 0.03, 0.1, 0.3, 0.3, 0.02, 0.0004, 0.04, 0.100, 0.005, 0.03, 0.02
vmine	24.00, 24.00, 24.00, 24.00, 18.00, 18.00, 18.0, 18.00, 24.0, 24.0, 18.0, 24.0, 24.0, 18.00
ve	10.00, 20.00, 20.00, 20.00, 20.00, 10.00, 10.0, 20.00, 10.0, 10.0, 20.0, 20.0, 20.0, 20.00

увеличения блеска СН, которая соответствует радиоактивному (нетепловому) нагреву при распаде  $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ .

Пожалуй, в этом и состоит основное отличие и новизна нашего подхода к интерпретации ранних спектров XRF 060218/SN 2006aj по сравнению с тем, что представлено в статье [25], где отождествляются VLT/Lick-спектры этой СН и

где речь идет о теоретических спектрах только для фазы радиоактивного нагрева — см. кривую блеска (Fig. 2) из статьи [30]. Да и сами авторы программы SYNOW [1, 2, 19, 20], анализируя спектры обычных СН типов Ib-c ("stripped-envelope SN"), рассчитывали свои синтетические спектры со следами H $\alpha$  линии, но все-таки не для таких ранних фаз с существенным вкладом теплового излучения



**Рис. 5.** Исправленный за галактическое поглощение спектр послесвечения XRF/GRB060218/SN 2006aj в системе покоя ( $z=0$ ), полученный на 6-метровом телескопе через 2.55 сут. Показана его подгонка для случая неотделения (“undatched case”) синтетическими спектрами со скоростью фотосферы ( $V_{phot}$ ), всех элементов и их ионов (vmpine), равной 33000 км/с — гладкие линии (отличаются только в синей области спектра при  $\lambda < 4000\text{\AA}$ , см. текст). Основные параметры расчета синтетического спектра, изображенного толстой черной линией, приведены в Табл. 2. H I — это обозначение P Cug-профиля линии H $\alpha$  при  $V_{phot} = 33000$  км/с. В качестве примера H $\alpha$  P Cug-профиля штриховой линией показан модельный спектр для скорости фотосферы 8000 км/с.

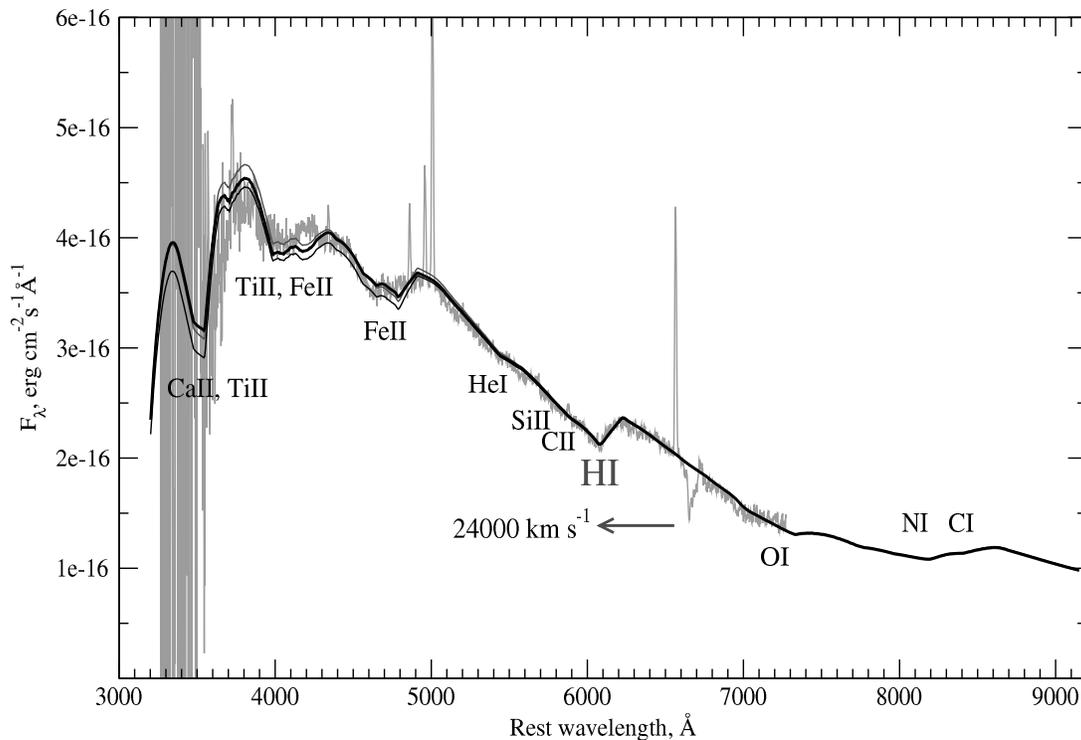
от УФ-вспышки и не при таких больших скоростях расширения, которые удалось наблюдать для XRF 060218/SN 2006aj.

Эволюция всех 16 ESO Lick и ESO VLT спектров SN 2006aj [10] была промоделирована вплоть до 10 марта 2006 (20 суток после XRF 020618) в цитированной выше статье [25] с помощью улучшенной программы синтеза спектров СН методом Монте-Карло, основанной на тех же предположениях, что и программа SYNOW, но в которой учитываются модельные распределения плотности и температуры в оболочке над фотосферой, лучистый перенос с учетом переходов в линиях и электронное рассеяние — детали метода изложены в статьях [27–29].

До широкого максимума на кривых блеска SN 2006aj (порядка 10 дней после GRB на Рис. 2) и после этого максимума в спектрах усиливаются все характерные признаки СН типа Ic. Моделирование спектров сделано для интервала скоростей ( $20000 < V < 30000$ ) км/с. Самые сильные особенности в спектрах, о которых упоминают авторы, — это линии FeII, TiII, а на более поздних

стадиях CaII ( $< 4500\text{\AA}$ ), FeIII и FeII (около  $5000\text{\AA}$ ), SiII (около  $6000\text{\AA}$ ), OI (около  $7500\text{\AA}$ ) и CaII (около  $8000\text{\AA}$ ).

Весь этот список линий мы учитывали при интерпретации наших ранних спектров с помощью программы SYNOW (см. Рис. 6) для почти такого же интервала скоростей, но, кроме того, мы включили еще вклады H I и He I линий. Из приведенных расчетов [25] видно, что в самых ранних спектрах от 21, 22, 23 февраля авторы не учитывали явные следы H $\alpha$  линии, а в более поздних спектрах учитывается только все возрастающее влияние SiII в районе  $6000\text{\AA}$  — см. Fig. 1 в статье [25] и подпись к нему. В то же время, как было сказано выше, абсорбцию с минимумом на  $6100\text{\AA}$  можно проследить в наблюдаемых спектрах по крайней мере до 4 марта. Она является самой заметной особенностью в районе  $6000\text{\AA}$  в раннем спектре от 23 февраля во всем диапазоне от  $5000\text{\AA}$  до  $8500\text{\AA}$ , в котором метод Монте-Карло не фиксирует никакой абсорбции на  $6100\text{\AA}$ .



**Рис. 6.** Исправленный за галактическое поглощение спектр SN 2006aj/XRF060218 (в системе покоя при  $z=0$ ), полученный на 6-метровом телескопе через 3.55 суток. Синтетические спектры показаны гладкими линиями. Показано положение спектральных линий некоторых ионов и blends их линий в тех областях спектра, где вклад данного иона в спектр существен при заданных параметрах модели. Толстая черная линия — синтетический спектр с параметрами из Табл. 3, при которых абсорбция с минимумом в районе  $6100\text{\AA}$  описывается подавляющим влиянием H I для случая “detached case”. Это сильно сдвинутая в синюю сторону часть P Cyg-профиля линии H $\alpha$  при скорости расширения отделившегося слоя H I, равной  $24000\text{ km/s}$ .

#### 4.2. Признаки водорода в спектрах массивных SN

Признаки водорода в спектрах SN типов Ib и Ic (Ib-c) не так редки. В частности, признаки водорода и эволюции сдвинутой в синюю сторону линии H $\alpha$  были уже найдены с помощью все той же программы SYNOW при анализе серий оптических спектров для обычных массивных SN типов Ic и Ib. Причем особое внимание при таком анализе уделялось следам присутствия водорода при наблюдениях именно этих, потерявших оболочку перед взрывом SN типов Ib-c. Хотя, согласно формальному определению этих типов SN, они не имеют явных, бросающихся в глаза линий водорода в своих оптических спектрах. Для SN типов Ib-c обычно принимается модель гравитационного коллапса массивных и голых (“stripped-envelope SNe Ib-c”), потерявших оболочку перед коллапсом, углеродно-кислородных ядер, и, по-видимому, признаки этой оболочки в виде линий водорода всегда должны присутствовать в спектрах этих SN. Хотя чаще всего водород можно более-менее надежно отождествить как раз только в достаточно ранних спектрах SN Ib-c, как было показано в работах [2, 19, 20, 26, 27].

Конкурирующей гипотезой для описания спектральной детали с минимумом в районе  $6100\text{\AA}$  может быть ее интерпретация как абсорбционной компоненты P Cyg-профиля линии CII  $6580\text{\AA}$  [27]. Но если вся протяженная (порядка  $300 R_{\odot}$ ) звездно-ветровая оболочка сначала проявлялась как рентгеновская, а затем и как УФ-вспышка в послесвечении XRF 060218/SN 2006aj, то именно с нейтральным водородом нужно связывать по крайней мере ту часть этой оболочки, которая не проэволюционировала и относится к звездно-ветровой стадии эволюции массивной звезды-прародителя, и которая возникла задолго до взрыва SN. В пользу того, что именно эти слои (связанные с ветровой оболочкой) первыми приходят в движение в результате взрыва SN, говорит и то, что именно водород всегда показывает наибольший контраст скорости между занятым H I-слоем и фотосферой по сравнению с другими элементами в спектрах массивных SN типов Ib-c: см. Fig. 9 в работе [1], см. Fig. 5 в работе [2], см. Fig. 23 в работе [19]. Можно оценить и массу этой пришедшей в движение части оболочки (массы

газа в  $H\alpha$  или в  $H\text{I}$ -слое), используя уравнение из статьи [2] следующим образом:

$$M(M_{\odot}) \simeq (2.38 \times 10^{-5}) v_4^3 t_d^2 \tau(H\alpha),$$

где время после взрыва  $t_d$  выражено в сутках,  $v_4$  — скорость слоя в единицах  $10^4$  км/с,  $\tau(H\alpha)$  — глубина формирования линии. В этом уравнении, выведенном для соболевской оптической глубины в расширяющейся оболочке [2, 30], мы использовали значение скорости 24000 км/с, которая относится только к той части  $H\text{I}$ -слоя, которая пришла в движение (см. данные в Табл. 3). Это и соответствует случаю “detached case” на Рис. 4. В результате масса  $H\text{I}$ -слоя оказывается порядка  $6 \times 10^{-4} M_{\odot}$ , а расстояние его от центра к этому времени (3.55 суток после начала взрыва СН) не меньше, чем  $7.36 \times 10^{14}$  см.

#### 4.3. Колгейтовский “shock-breakout” эффект у XRF 060218/SN 2006aj и у других СН — кривые блеска, спектры, светимости и размеры

СН типов Ib and Ic наблюдают давно, и считается, что их прародителями скорее всего являются звезды WR, окруженные более-менее плотной ветровой оболочкой, которая является результатом эволюции массивной звезды. УВ, возникающая при взрыве проэволюционировавшего ядра звезды, проходя через эту оболочку, приводит к яркой и короткой рентгеновской и УФ-вспышке, которые могут длиться несколько часов — длительность вспышки зависит от того, насколько массивной и насколько протяженной ветровой оболочкой была окружена звезда-прародитель перед взрывом СН. Взаимодействие УВ, возникающей вследствие взрыва СН, с оболочкой (“shock breakout” эффект) предсказано давно [12, 31, 32]. В частности, будущим систематическим наблюдениям этого эффекта посвящена работа [14]. Но пока, до события XRF 060218/SN 2006aj, почти полностью весь эффект удалось наблюдать только для небольшого числа массивных СН.

Очень короткий, из-за компактности голубого сверхгиганта ( $20\text{--}30 R_{\odot}$ ), эффект взаимодействия УВ наблюдался (хотя и не с самого начала) у знаменитой SN 1987A II типа (см. об этом в обзоре [16]). Долго, 2–3 недели, можно было наблюдать эффект взаимодействия УВ в очень протяженной (порядка  $10^{15}$  см) оболочке СН типа IIp — см., например, [33] для SN 1994W типа IIp. В других случаях СН типов Ib-с удалось увидеть этот эффект уже в самом его конце, перед последующим увеличением блеска СН, соответствующим радиоактивному нагреву  $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$  — для SN 1999ex [34]. Такие

же “остатки” этого эффекта видны (в R-полосе) даже у SN 1998bw, которую обычно связывают с GRB 980425 см. [35].

*SN 1993J в M81:* Можно сказать, что SN 1993J удалось наблюдать почти в самом начале взрыва. “Почти”, потому что и в этом случае момент начала взрыва СН известен с точностью до 12 часов, а не секунд, как в случае XRF/GRB СН. Первоначально эта СН была классифицирована по спектру как СН типа II из-за появления линий водорода в ее ранних спектрах (Рис. 7), но через некоторое время тип этой СН изменился на Ib [37], когда водород в спектрах перестал надежно обнаруживаться. Ранние спектры SN 1993J на Рис. 7 показывают сильный УФ-избыток, характерный для эффекта взаимодействия УВ, и сглаженный континуум почти без линий выше  $5000\text{\AA}$ , похожий на спектр XRF 060218/SN 2006aj на Рис. 5, хотя в случае SN 2006aj скорости расширения значительно выше (см. далее замечания о возможной асимметрии взрыва СН, отождествляемых с GRB). SN 1993J имела и необычную кривую блеска, когда светимость быстро возросла до первого максимума, а затем стремительно упала за несколько дней, чтобы затем медленно увеличиться во второй раз за следующие две недели — поведение, аналогичное показанному на Рис. 2 для XRF 060218/SN 2006aj. Кривая блеска SN 1993J давно промоделирована многими группами [38–40]. В этих работах указано, что такое поведение кривой блеска у SN 1993J объясняется взаимодействием УВ с протяженной порядка ( $300 R_{\odot}$ ) водородной оболочкой массы  $1 M_{\odot}$  вокруг звезды-прародителя. Причем светимость, достигаемая в вершине первого (быстрого) максимума, который длится всего лишь 4–5 часов, может достигать значений порядка  $10^{45}$  эрг/с, с полным энерговыделением порядка  $5 \times 10^{49}$  эрг.

Неудивительно, что примерно эти же параметры оболочки объясняют и вспышку, обусловленную выходом УВ, в случае XRF/GRB 060218/SN 2006aj. И в этом случае полное энерговыделение оказывается того же порядка,  $10^{49}$  эрг. Правда, в случае SN 1993J не было гамма-всплеска, и, скорее всего, тут все дело в асимметрии взрыва СН (см. об этом ниже).

Если GRB/XRF 060218/SN 2006aj — это еще один случай, когда удалось наблюдать колгейтовский эффект в чистом виде и с самого начала взрыва СН, то это можно понимать как совершенно определенный намек на то, что сам гамма-всплеск может быть первым сигналом в гамма-лучах о том, что коллапс массивного ядра начался, а за ним следует и весь процесс — взрыв массивной СН: после всплеска может наблюдаться рентгеновская, а затем и мощная УФ-вспышка. Тогда ключевым

моментом оптических наблюдений транзиентных источников, связанных с XRF/GRB, может стать поиск всех проявлений ветровых оболочек вокруг массивных звезд-прародителей в ранних спектрах и в фотометрии послесвечения XRF/GRB, так как взаимодействие ударной волны СН с этими оболочками — самое первое событие в оптическом диапазоне после начала коллапса массивного ядра звезды, и здесь можно ожидать наблюдений новых эффектов, связанных, например, с той же асимметрией взрыва.

#### 4.4. Асимметрия взрывов СН типов Ib и Ic

Вспышка XRF 060218/SN 2006aj действительно была классическим XRF-событием [4, 41]. А то, что в случае обычных и близких СН взрыв начинается не с гамма-всплеска, естественно объяснять асимметричным, осесимметричным или биполярным (с образованием джетов) взрывом массивных СН. Одно из популярных сейчас представлений (см. ссылки в статье [42]) исходит из того, что в случае всплеска типа XRF наблюдатель оказывается вне конуса, в котором по тем или иным причинам сосредоточена большая часть гамма-излучения.

Чем дальше наблюдатель от оси взрыва СН, тем больше регистрируется рентгеновских и меньше гамма-квантов от вспышки — GRB переходят в X-ray Rich GRB (как GRB 030329) и становятся XRF [43]. А если смотреть под углом, близким к  $90^\circ$  к оси взрыва, то вообще никакого гамма-всплеска наблюдаться не будет, а будет наблюдаться только рентгеновская и затем мощная УФ-оптическая вспышка, причиной которой является взаимодействие УВ с окружающей пред-СН оболочкой, как это было в случае SN 1993J.

Таким образом, если СН наблюдается близко к экватору взрыва (а это наиболее вероятная ситуация) и если есть достаточно плотная звездно-ветровая оболочка вокруг массивного коллапсирующего ядра звезды, то тогда рассматриваемый эффект должен наблюдаться только в рентгеновском и оптическом диапазонах. В этом случае вклад послесвечения гамма-всплеска в кривую блеска “обычной” СН может быть незначительным. Так или иначе, но он должен быть значительно меньшим, чем для классических GRB, наблюдаемых близко к оси взрыва СН (наименее вероятная ситуация). В связи с этим в [44] авторы недавно заметили, что существенно несимметричный взрыв может быть особенностью массивных СН всех типов, хотя, пока не ясно, тот ли самый механизм, который генерирует гамма-всплеск, ответственен и за взрыв звезды.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

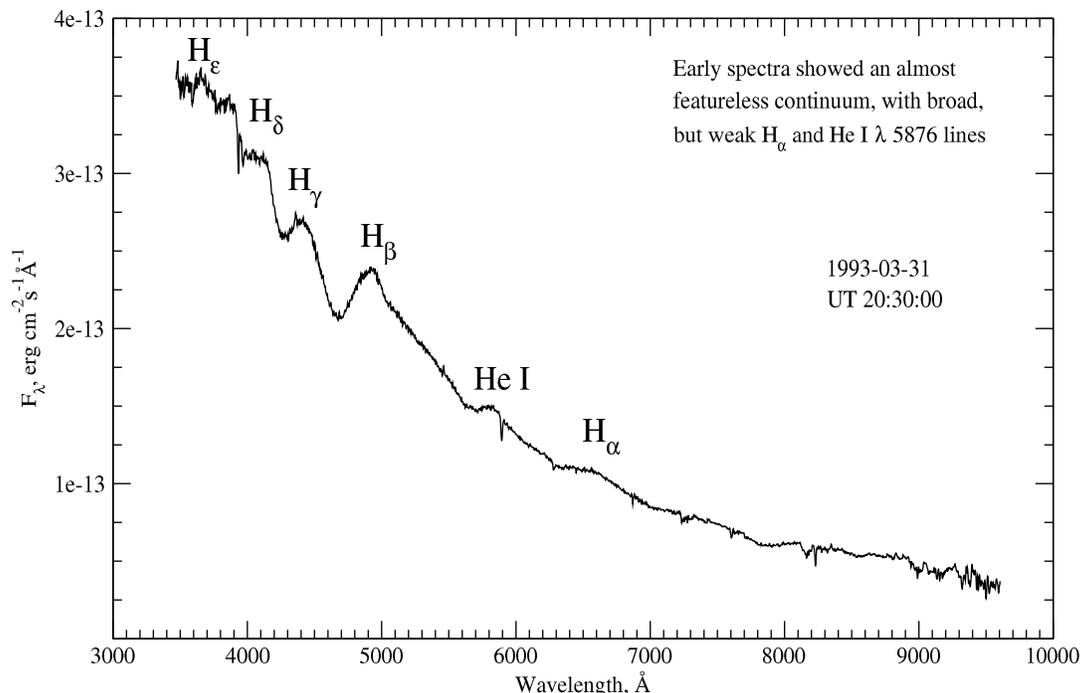
В этой статье приведены дополнительные аргументы в пользу звездно-ветрового происхождения эффекта взаимодействия УВ, обнаруженного ранее по данным Swift/XRT/UVOT [4] наблюдений вспышки XRF/GRB 060218. В наших оптических спектрах послесвечения XRF/GRB 060218 были обнаружены особенности, интерпретируемые как линии водорода, которые наблюдаются и в ранних ESO Lick, ESO VLT и NOT спектрах [10, 11]. Водород впервые обнаружен в спектрах послесвечения гамма-всплеска, что является прямым признаком ветровой оболочки около массивной звезды-прародителя.

Показаны результаты моделирования двух спектров, полученных на 6-метровом телескопе через 2.55 и 3.55 суток после взрыва SN 2006aj, связанной с рентгеновской вспышкой XRF/GRB 060218. Спектры промоделированы в приближении Соболева с помощью программы SYNOW [1, 2]. В этих ранних спектрах SN 2006aj типа Ic нами были обнаружены спектральные особенности, интерпретируемые как:

- 1) P Cуг-профиль линии  $H\alpha$  для скоростей порядка 33000 км/с — широкая и почти незаметная деформация континуума в области длин волн 5600 – 6600 Å (в системе покоя при  $z=0$ ) для первой эпохи (2.55 сут.);
- 2) часть P Cуг-профиля  $H\alpha$  линии в поглощении, сдвинутая в синюю сторону для скорости 24000 км/с — широкая и малоконтрастная спектральная особенность с минимумом на длине волны примерно равной 6100 Å (в системе покоя) для второй эпохи (3.55 сут.).

Эволюцию этих же спектральных деталей можно проследить и по спектрам SN 2006aj, полученным на других телескопах [10, 11]. Такие  $H\alpha$  линии могут прямо подтверждать существование звездно-ветровой оболочки, которая уже наблюдалась во время самой XRF/GRB 060218 вспышки в виде мощной чернотельной компоненты сначала в рентгеновском, а затем и в оптическом спектре [4]. Таким образом, имея в виду ранние наблюдения, проведенные на 6-метровом и других телескопах (Табл. 1), можно говорить о том, что мы наблюдаем эволюцию оптических спектров массивной SN 2006aj — переход от фазы колгейтовского эффекта к фазе увеличения блеска, соответствующей радиоактивному нагреву.

Наше отождествление этих особенностей с  $H\alpha$ -линией водорода в ранних спектрах SN 2006aj типа



**Рис. 7.** Самый ранний оптический спектр SN 1993J (см. текст). Спектр взят из базы данных SUSPECT - The Online Supernova Spectrum Database <http://bruford.nhn.ou.edu/suspect/> ([36]).

Is подтверждается также спектральными наблюдениями обычных (не отождествленных с GRB) массивных СН типов Ic и Ib и интерпретацией их спектров, в которых был найден водород, с помощью программы SYNOW [2, 19, 27].

Если интерпретация тепловой компоненты в спектре всплеска GRB/XRF 060218 как взаимодействия ударной волны СН с ветровой оболочкой звезды-прародителя SN 2006aj/XRF 060218 будет подтверждаться наблюдениями послесвечений и других всплесков, то это даст новый импульс в развитии теории как самих гамма-всплесков, так и массивных СН. Гамма-всплески и отождествляемые с ними СН (GRB/SN) с малыми  $z$  хоть и относительно редко наблюдаются [5], но зато они являются наиболее информативными событиями (такими как XRF/GRB 060218/SN 2006aj или GRB 030329/SN 2003dh) в смысле выяснения связи гамма-всплесков и СН. При этом ключевым моментом исследований этих транзиентных источников может стать поиск проявлений ветровых оболочек вокруг массивных звезд-прародителей гамма-всплесков как в ранних спектрах, так и в фотометрии послесвечения этих GRB.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Дэвиду Бранчу и другим авторам программы SYNOW за консультации по

запуску программы в CAO РАН и по ее практическому использованию, а также Е. Л. Ченцову и С. Н. Фабрике за чтение и конструктивную критику первого варианта текста. Данная работа была частично поддержана Испанскими исследовательскими программами ESP2005-07714-C03-03 и AYA2004-01515.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. Branch et al., *Supernovae and Gamma-Ray Bursters*. Ed. by K. Weiler., *Lecture Notes in Physics*, **598**, 47 (2001) (astro-ph/0111573).
2. A. Elmhamdi et al., *Astronom. and Astrophys.* **450**, 305 (2006) (astro-ph/0512572).
3. A. J. Blustin, astro-ph/0701804.
4. S. Campana et al., *Nature* **442**, 1008 (2006).
5. R. Chapman, N. R. Tanvir, R. S. Priddey, and A. J. Levan, astro-ph/arXiv:0708.2106.
6. T. A. Fatkhullin et al., *GCN* **4809**, 1 (2006).
7. V. V. Sokolov et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **56**, 5 (2003).
8. M. Modjaz et al., *Astrophys. J.* **645**, L21 (2006).
9. N. Mirabal et al., *Astrophys. J.* **643**, L99 (2006).
10. E. Pian et al., *Nature* **442**, 1011 (2006).
11. J. Sollerman et al., *Astronom. and Astrophys.* **454** (2), 503 (2006).
12. S. A. Colgate, *Canadian Journal of Physics* **46**, 476 (1968).
13. V. S. Imshennik and D. K. Nadezhin, *Sov. Sci. Rev. E. Astrophys. Space Phys.* **8**, 1 (1989).

14. A. J. Calzavara and C. D. Matzner, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **351**, 694C (2004), astro-ph/0312464.
15. M. Jelinek et al., 2007 (in preparation).
16. В. С. Имшенник и Д. К. Надежин, *УФН* **156**, 521 (1988).
17. D. Schlegel, D. Finkbeiner, and M. Davis, *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).
18. J. A. Cardelli, G. C. Clayton, and J. S. Mathis, *Astrophys. J.* **345**, 245 (1989).
19. D. Branch et al., *Astrophys. J.* **566**, 1005 (2002).
20. E. Baron et al., *ASPC* **342**, 351 (2005).
21. В. В. Соболев, “Курс теоретической астрофизики”, 1967, Гл. VI, пар-ф 28, разд.2.
22. V. V. Sobolev, *Theoretical Astrophysics* (Pergamon Press Ltd., London, 1958).
23. V. V. Sobolev, *Moving Envelopes of Stars* (Harvard University Press, 1960)
24. В. Г. Горбачкий и И. Н. Минин, “Нестационарные звезды”, 1963, Гл. VI, пар-ф 24.
25. P. A. Mazzali et al., *Nature* **442**, 1018 (2006).
26. Parrent et al., astro-ph/0701198.
27. D. Branch et al., astro-ph/0604047.
28. L. B. Lucy, *Astronom. and Astrophys.* **345**, 211 (1999).
29. P. A. Mazzali et al., *Astronom. and Astrophys.* **279**, 447 (1993).
30. J. I. Castor, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **149**, 111 (1970).
31. G. S. Bisnovatyi-Kogan et al., *Ap. Space. Sci.* **35**, 23 (1975).
32. S. I. Blinnikov et al., astro-ph/0212569.
33. N. Chugai et al., astro-ph/0405369.
34. Stritzinger et al., *Astrophys. J.* **124**, 2100 (2002).
35. T. Galama et al., *Nature* **395**, 670 (1998).
36. D. Richardson et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **201**, 5609R (2002).
37. A. V. Filippenko, T. Matheson, and L.C. Ho, *Astrophys. J.* **415**, L103 (1993).
38. K. Nomoto et al., *Nature* **364**, 507 (1993).
39. T. R. Young et al., *Astrophys. J.* **449**, L51 (1995).
40. T. Shigeyama et al., *Astrophys. J.* **420**, 341 (1994).
41. J. Heise, in’t Zand J., R. M. Kippen, and P. M. Woods, in *Proceedings of the International Workshop, Rome, Italy, 2000*, astro-ph/0111246.
42. A. Soderberg et al., astro-ph/0502553.
43. V. V. Sokolov et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **59**, 5 (2006).
44. A. Filippenko et al., astro-ph/0603297.

## STELLAR-WIND ENVELOPE AROUND THE MASSIVE SUPERNOVA PROGENITOR XRF/GRB 060218/SN 2006AJ

**E. Sonbas, A.S. Moskvitin, T. A. Fatkhullin, V. V. Sokolov, A. Castro-Tirado, A. De Ugarte Postigo, G. Gorosabel, S. Guzij, M. Jelinec, T. N. Sokolova, V. N. Chernenkov**

The spectra of the supernova SN 2006aj identified with the X-ray flash (XRF) and gamma-ray burst XRF/GRB 060218/SN 2006aj taken with the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences are found to exhibit features, which can be interpreted as hydrogen lines. Such features indicate the existence of a stellar-wind envelope around the massive star—the progenitor of the gamma-ray burst. The results of our modeling of two early spectra taken with the 6-m telescope 2.55 and 3.55 days after the explosion of the type-Ic supernova SN 2006aj ( $z=0.0331$ ) are reported. The spectra are modeled in the Sobolev approximation using SYNOW code [1, 2]. The spectra of the optical afterglow of the X-ray flash XRF/GRB 060218 are found to exhibit spectral features, which can be interpreted as: (1) the P Cyg-profile of the  $H\alpha$  line for the velocity of 33000 km/s—a broad and small deformation of the continuum in the wavelength interval 5600–6600Å for the first epoch (2.55 days) and (2) a part of the P  $\gamma$ -profile of the  $H\alpha$  line in absorption blueshifted by 24000 km/s—a broad spectral feature with a minimum at 6100Å (rest wavelength) for the second epoch (3.55 days). Given earlier observations made with the 6-m telescope and the spectra taken with other telescopes (ESO Lick, ESO VLT and NOT) prior to February 23, 2006, it can be concluded that we are observing the evolution of optical spectra of the type Ic massive supernova SN 2006aj during its transition from the short phase with the “shock breakout” into the external layers of the stellar-wind envelope to the spectra of the phase of rising supernova luminosity, which corresponds to radiative heating. We are the first to observe the signs of hydrogen in the spectra of a gamma-ray afterglow.