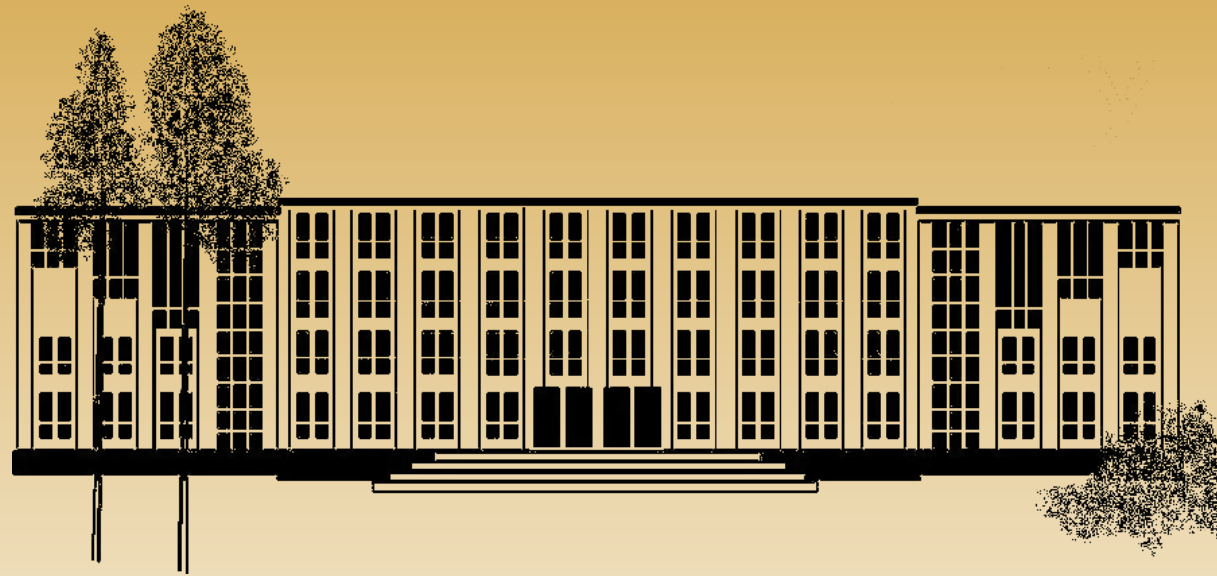


Моделирование вспышки XRF080109/SN2008D в гидродинамическом расчёте с многогрупповым переносом излучения



Толстов А.Г., Блинников С.И., Долгов А.Д.

Институт Теоретической и Экспериментальной Физики (ИТЭФ)
Новосибирский Государственный Университет (НГУ)



ВВЕДЕНИЕ

Взрывы сверхновых звёзд (ниже просто сверхновых, сокращённо SN) – это сложные явления с огромным энергетическим выходом. В теории сверхновых разделяют две задачи: *внутреннюю*, в которой пытаются найти механизм взрыва, и *внешнюю*, где предполагается, что взрыв заданной энергии, детали которого неизвестны, произошёл в центральных слоях звезды, и изучается радиационная гидродинамика последующих событий. В настоящей работе рассматривается внешняя задача. Её решение может дать много ценной информации о строении предсверхновой звезды, о развитии вспышки, и о самом механизме взрыва, в тех случаях, когда характерное время взрыва существенно меньше гидростатического времени всей звезды и он в самом деле развивался в центре звезды. Эти предположения подтверждаются опытом для подавляющего большинства сверхновых – тех, которые порождаются коллапсом ядра. Изучение выхода ударной волны на поверхность сверхновой приобретает особую актуальность в связи с детектированием этого явления аппаратом SWIFT (Содерберг и др. 2008) для SN 2008D.

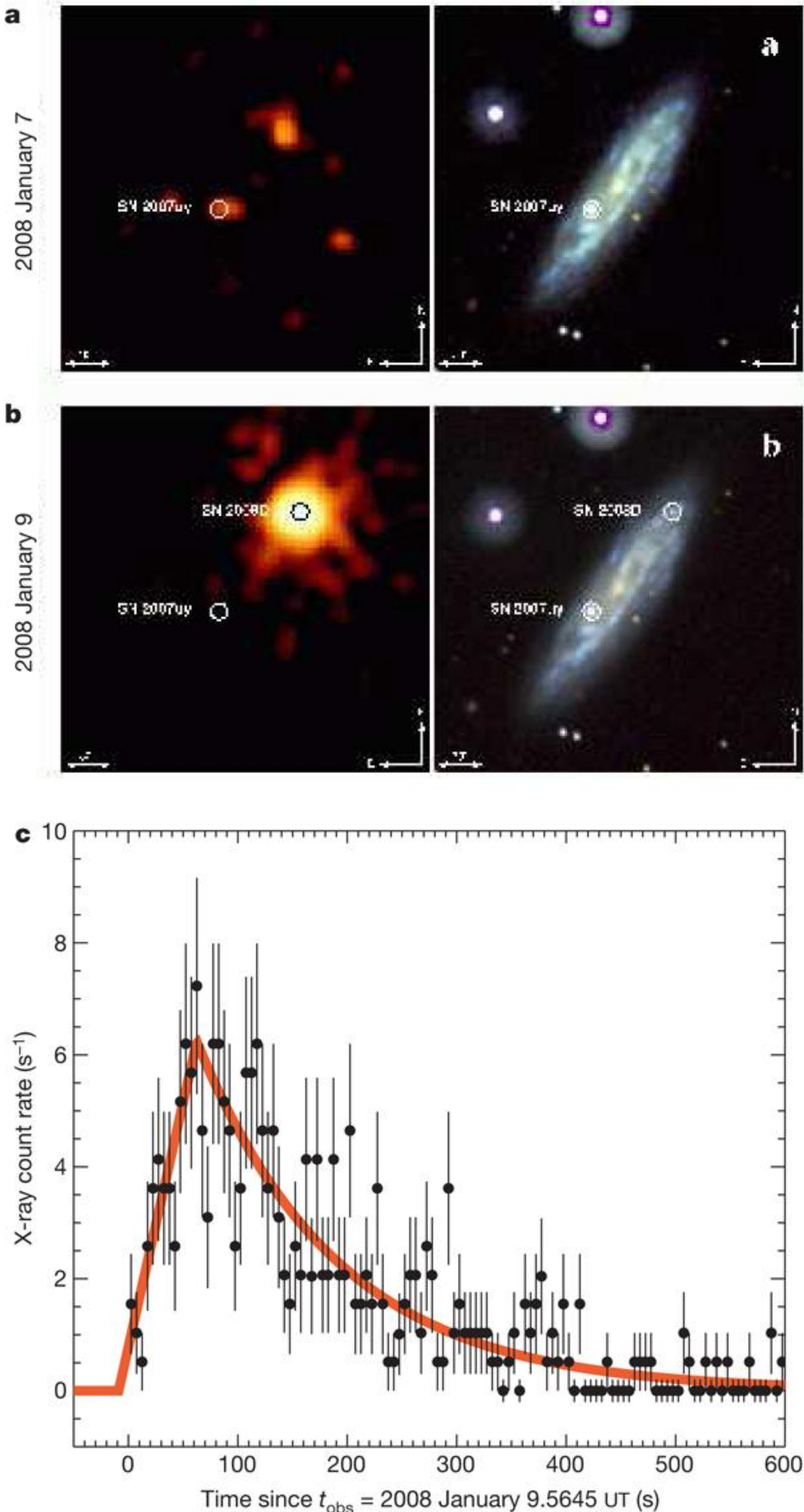


Рис. 1. Рентгеновская вспышка XRF080109, зафиксированная космическим аппаратом SWIFT, предшествовала обнаружению сверхновой SN2008D; (а): на снимке 7 янв 2008 нет рентгеновского источника (слева) и сверхновой (справа); (б): 9 янв 2008 рентгеновская (слева) и ультрафиолетовая (справа) вспышка были открыты; (с): зависимость потока в диапазоне 0.3-10 кэВ транзитного источника XRF080109 (Рисунок заимствован из статьи Содерберг и др. (2008))

ЦЕЛИ

В этой работе мы используем комплексы программ STELLA RADA для моделирования XRF080109, чтобы выяснить, можно ли объяснить данные наблюдений этого объекта в самой естественной модели (звезда WR плюс наблюдаемый ветер). Мы рассматриваем простые одномерные модели, но с максимально полным учетом физики явления.

МЕТОДЫ

Мы используем код STELLA (Static Eddington-factor Low-velocity Limit Approximation) (Блинников и др. 1998, Блинников и др. 2006), который предназначен для решения задач переноса неравновесного излучения с учетом газодинамики и последующего моделирования кривых блеска сверхновых. STELLA – гидродинамический код, включающий расчет многогруппового переноса излучения. Мы используем подробную численную сетку во внешних слоях звезды с несколькими точками внутри фронта ударной волны. Отсутствие вязкого скачка в радиационно-доминированных ударных волнах важно для их расчета с точностью расчета переноса излучения. Таким образом, во внешних слоях можно обойтись без использования искусственной вязкости для расчета радиационно-доминированных ударных волн.

Нестационарное уравнение переноса решается для каждой частотной группы в моментном приближении в неявной по времени конечно-разностной схеме. Число групп по частоте фотонов, допустимое на рабочих станциях современной мощности 100 - 300 достаточно для адекватного представления неравновесного излучения в континууме с разумной точностью (это проверяется путём сравнения с программами, учитывающими тысячи групп).

STELLA включает в полную непрозрачность фотоионизацию, свободно-свободное поглощение, линии и электронное рассеяние. В уравнении состояния для ионизации используется приближение Саха. Таким образом, используется метод полной многогрупповой радиационной гидродинамики, в котором исправлены недочёты более старых подходов.

Алгоритм STELLA хорошо применим для моделей сверхновых II типа, как, например, 1987A и 1993J (Блинников и др., 1998, Блинников и др., 2000). Он позволяет получить наиболее надежные предсказания для вспышки, пока скорость вещества u не превышает 20-30 % скорости света c . Метод учитывает все члены порядка (u/c) в гидродинамике и переносе излучения, а членами порядка $(u/c)^2$ пренебрегается.

Если скорость вещества за фронтом ударной волны превышает значительную часть скорости света, $\beta \equiv u/c > 0.2$, то STELLA использует алгоритм RADA (fully Relativistic rAdiative transfer Approximation) (Tolstov 2010), основанный на методе коротких характеристик, который решает уравнения переноса излучения в сопутствующей системе отсчета вплоть до значений Лоренц-фактора $\gamma \equiv (1 - \beta^2)^{-1/2}$ равного 1000. Точные значения эддингтоновских факторов, рассчитанные алгоритмом RADA, используются в алгоритме STELLA. Кроме решения уравнения переноса в сопутствующей системе координат RADA учитывает эффект задержки излучения по времени от взрыва сверхновой. Эффект есть следствие того, что излучения с края видимой звезды приходит позже, чем от центральных областей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Как упоминалось во введении, источник XRF080109 связан с выходом ударной волны на поверхность звезды, породившей сверхновую SN2008D. По всем признакам, это была свехновая типа Ib, т.е. взорвалась достаточно компактная звезда типа Вольф-Райе (Wolf-Rayet, WR). Радиусы таких звёзд порядка радиуса Солнца, или немного больше, т.е. несколько световых секунд. Поэтому рентгеновская вспышка продолжается всего несколько секунд, см. Рис. 2, тогда как в наблюдениях она, по крайней мере, на порядок дольше – Рис. 1.

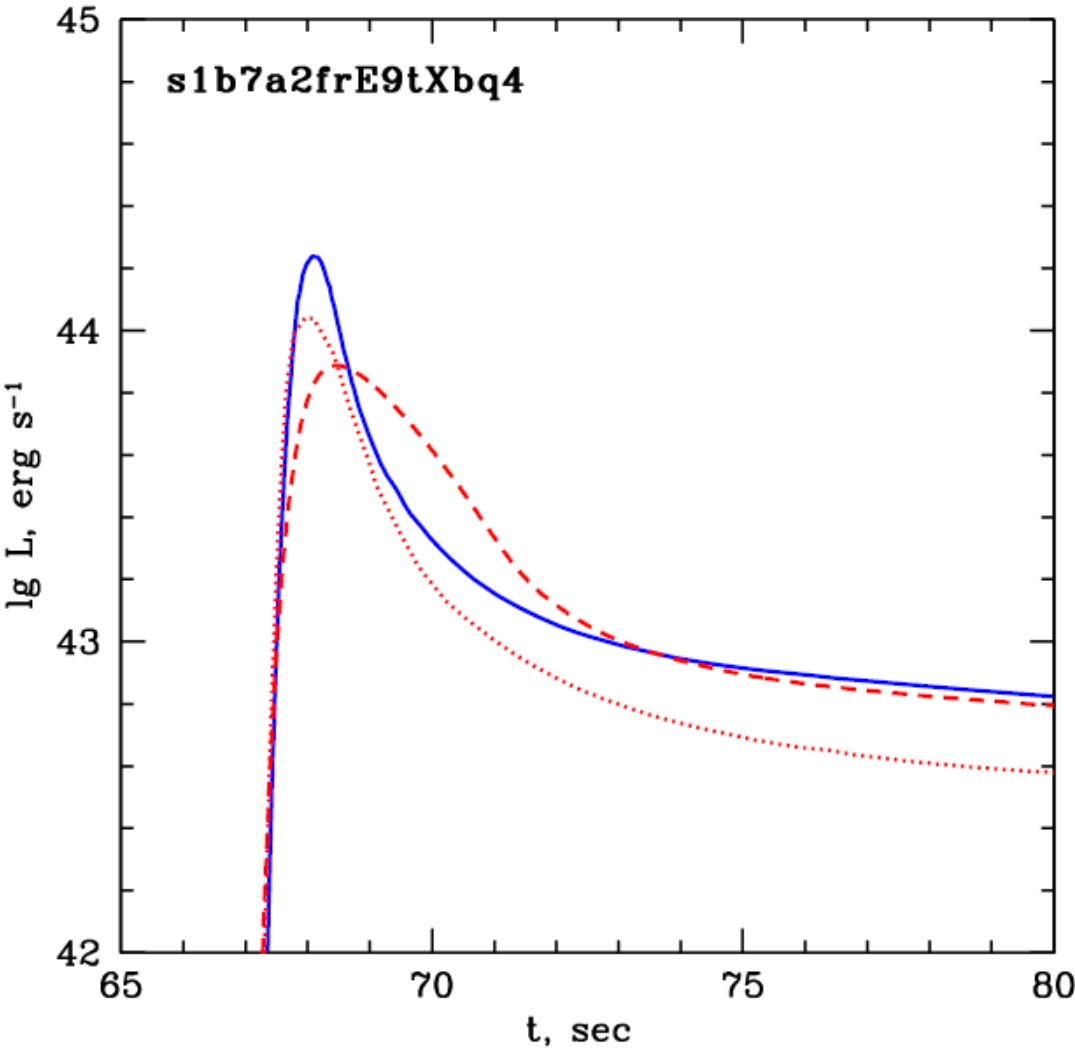


Рис. 2. Сравнение болометрических кривых блеска в момент выхода УВ для модели предсверхновой Ib/c без звездного ветра: энергия $E = 9 \cdot 10^{50}$ эрг, максимальная скорость $\approx 0.3 c$. Синяя линия – расчет STELLA, красная пунктирная – расчет RADA без учета эффекта задержки по времени, красная штриховая – с учетом.

Все горячие звёзды, в том числе WR, сильно теряют массу, они окружены звездным ветром, аналогичным солнечному ветру, но примерно в миллиард раз более мощным.

Темп потери массы при *стационарном* истечении с скоростью v составляет для WR-звёзд

$$\dot{M} = 4\pi\rho v r^2 \sim 10^{-5} M_{\odot}/\text{год} \quad (1)$$

Таким образом, имеем в стационарном ветре распределе $\rho \propto r^{-2}$. Мы сконструировали из модели 7A новую модель, в которой снаружи добавлено распределение плотности $\rho \propto r^{-2}$, соответствующее (1). На Рис. 2 изображены исходная и модифицированная модели.

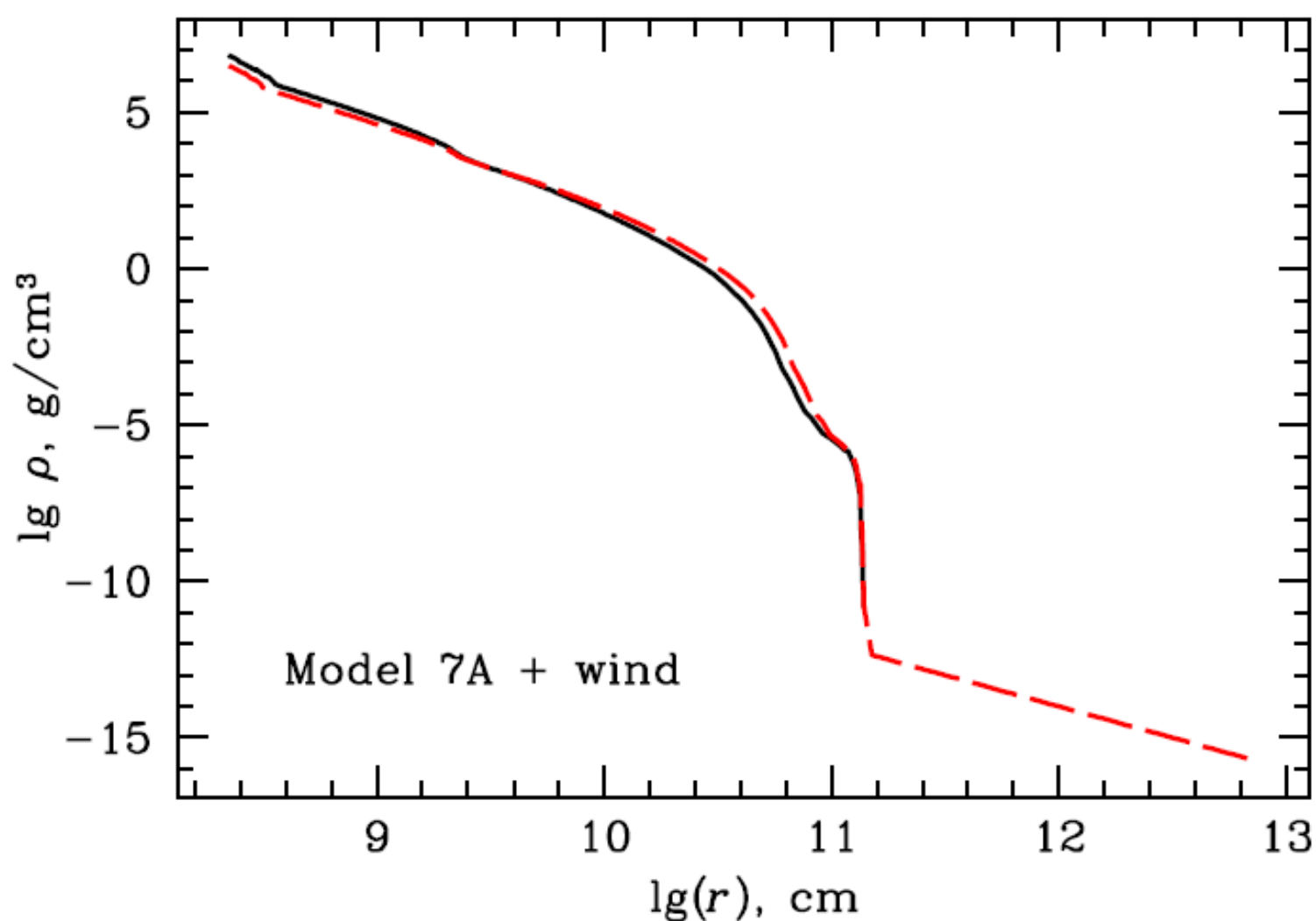


Рис. 3. Сравнение профилей плотности для исходной модели 7A (черная сплошная линия) и модели с ветром (красная штриховая)

Для обеих моделей были проведены расчёты выхода ударной волны. В наблюдениях Содерберг и др. (2008) рентгеновский спектр лучше всего фитируется степенным законом $N(E) \propto E^{-\Gamma}$, где N и E – это число фотонов и их энергия соответственно, причём $\Gamma = 2.3 \pm 0.3$, а максимальная светимость оценивается в $L \approx 6.1 \cdot 10^{43}$ эрг/с для рентгеновского диапазона 0.3 - 10 кэВ. На Рис. 4 показаны спектры для обеих моделей.

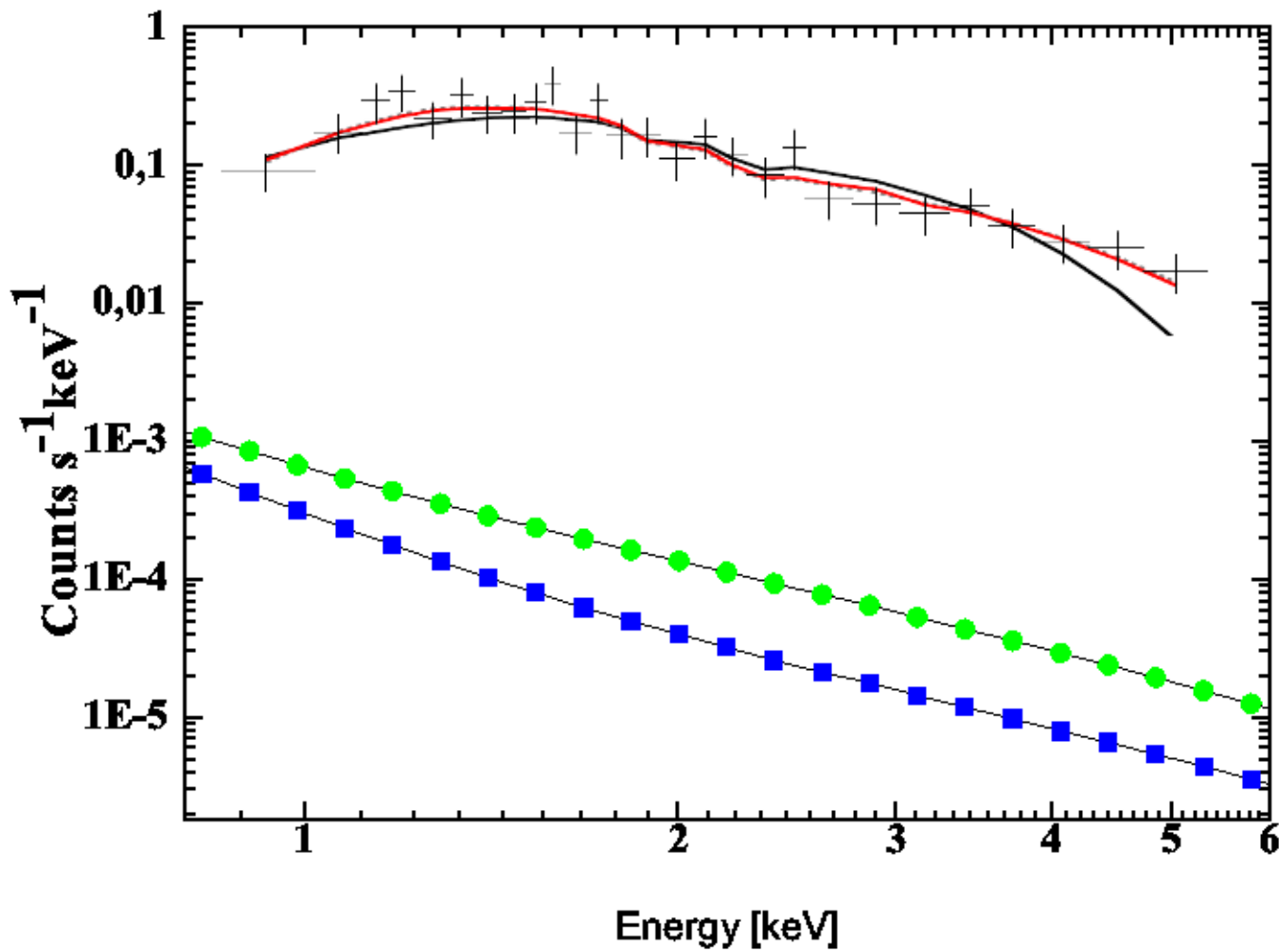


Рис. 4. Сравнение рентгеновских спектров XRT 080109 в диапазоне Swift/ XRT (0.3 - 10 кэВ) (Моджас и др. 2008) и расчетов модели 7A, усредненных по длительности вспышки. Зеленая линия – расчет RADA в сопутствующей системе отсчета, синяя – в системе отсчета наблюдателя.

На Рис. 5 видно, что в модели с ветром протяжённость вспышки вполне согласуется с наблюдаемой (Рис. 1).

Пиковая светимость L может быть согласована с наблюдаемой при некотором снижении мощности ветра (так как в модели без ветра L выше наблюдаемой), изменении радиуса и строения внешних слоев предсверхновой и некотором увеличении энергии взрыва. Наши модели из работы Вусли и др. (1995) имеют небольшую кинетическую энергию взрыва, $E_{\text{kin}} \approx 0.5$ Бете, а оценка для SN2008D даёт $E_{\text{kin}} \approx 2$ Бете.

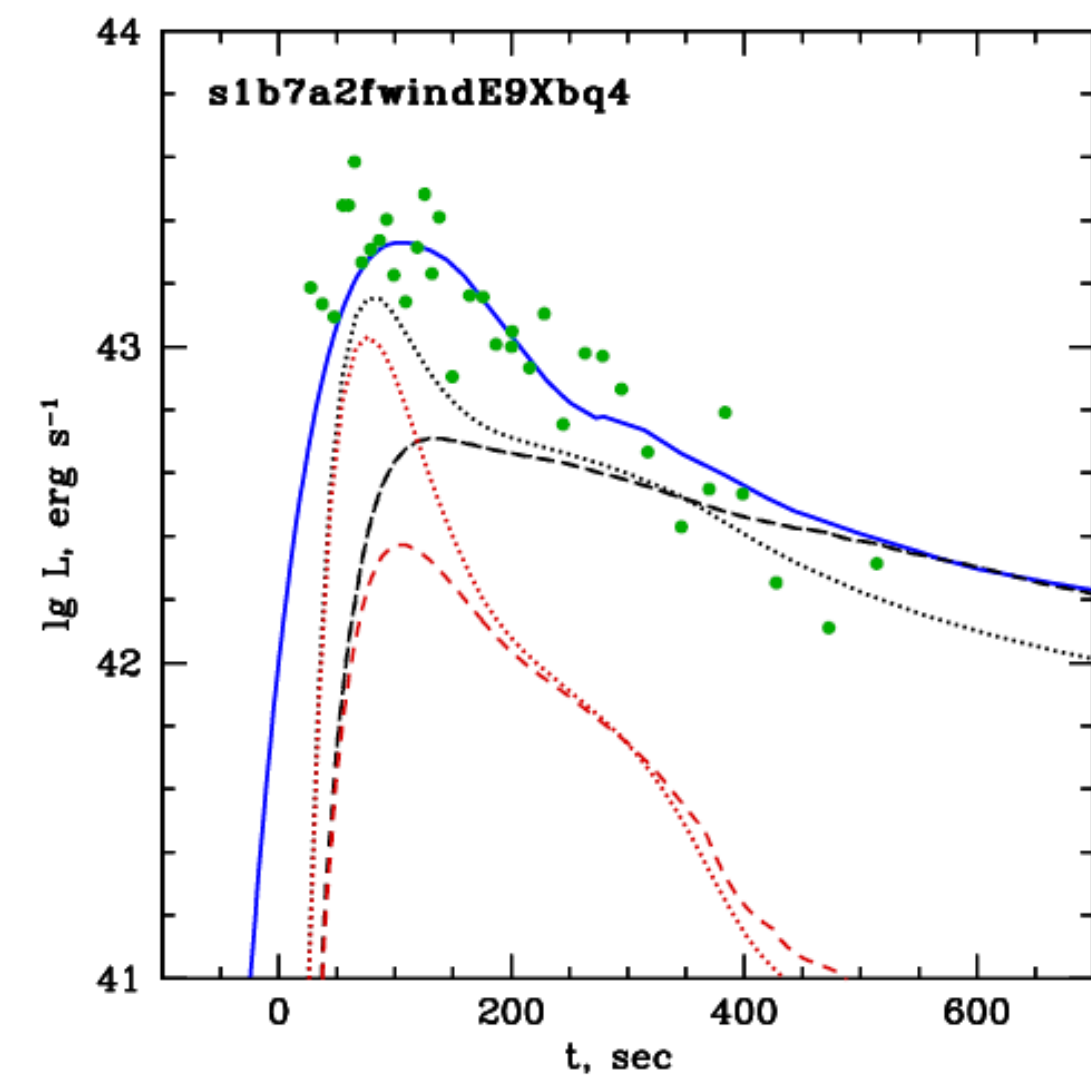


Рис. 5. Сравнение кривых блеска в момент выхода УВ для модели предсверхновой Ib/c со звездным ветром: энергия $E = 9 \cdot 10^{50}$ эрг, максимальная скорость $\approx 0.3 c$. Синяя линия – расчет болометрической STELLA, черная линия – расчет болометрической RADA, красная – в диапазоне SWIFT, пунктирная – расчет RADA без учета эффекта задержки по времени, красная штриховая – с учетом, зеленая – данные SWIFT (Моджас и др. 2008)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для получения оптимальной модели уже наблюдавшейся вспышки XRF080109/SN2008D требуется специальное исследование, которое должно воспроизвести не только рентгеновскую вспышку XRF080109, но и всю кривую блеска SN2008D. Тем не менее, уже сейчас можно утверждать, что качественно явление XRF080109/SN2008D вполне может быть объяснено взрывом обычной WR-звезды, окружённой звездным ветром. Количественный анализ надо продолжить: нужно исследовать возможность увеличения рентгеновского потока за счёт увеличения энергии взрыва, снижения плотности ветра, эффекты несферичности и т.п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Блинников и др. (Blinnikov S. I., Eastman R., Bartunov O. S. et al.), 1998, ApJ, 496, 454
- Блинников и др. (Blinnikov S., Lundqvist P., Bartunov O. et al.), 2000, ApJ, 532, 1132
- Блинников и др. (Blinnikov S. I., Röpke F. K., Sorokina E. I. et al.), 2006, A&A, 453, 229
- Вусли и др. (Woosley S. E., Langer N., Weaver T. A.), 1995, ApJ, 448, 315
- Содерберг и др. (Soderberg A. M., Berger E., Page K. L. et al.), 2008, Nature, 453, 469
- Моджас (Modjaz, M., Li, W., Butler, N. et al.), 2009, ApJ, 702, 226M
- Толстов (Tolstov A. G.), 2010, Astronomy Letters, 36, 109
- Шевалье и Фрэнсон (Chevalier, Roger A.; Fransson, Claes), 2008, ApJ, 683L, 135C

БЛАГОДАРНОСТИ

Эта работа частично поддержана грантам РФФИ 10-02-00249-А, грантом ведущей научной школы НШ-5440.2012.2, грантом SNSF (Swiss National Science Foundation) программы SCOPES No.~IZ73Z0-128180/1 и грантом Правительства Российской Федерации 11.G34.31.0047.

КОНТАКТЫ

E-mail: tolstov@itep.ru, sergei.blinnikov@itep.ru, dolgov@itep.ru

Дополнительную информацию о наших работах можно найти на сайте <http://dau.itep.ru>

Ссылка на PDF версию постера:

<http://dau.itep.ru/sn/f/ckf/TolstovHEA2012.pdf>

