

# МОДЕЛЬ И ПРОЯВЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОСЛЕСВЕЧЕНИЯХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ

Д.А. Бадьин, К.А. Постнов, С.И. Блинников

ГАИШ МГУ, ИТЭФ

26 февраля 2013 г.



# ВВЕДЕНИЕ

Идея работы – показать

- уместность концепции теплового излучения в послесвечениях ГВ (наравне с традиционным нетепловым)
- важность **радиационно-гидродинамических** расчётов при моделировании послесвечений



# Что такое GRB:

- Первичное гамма-излучение (prompt emission) + послесвечение (от рентгена до радио), степенные спектры
- Стандартная модель: массивная звезда  $\rightarrow$  коллапс  $\rightarrow$  нестационарная гипераккреция  $\rightarrow$  релятивистское истечение (джет)  $\rightarrow$  ударные волны (внутренние, внешние, обратные ...)  $\rightarrow$  ускорение  $e^-$ , усиление B  $\rightarrow$  Synchrotron, CS
- $\exists$  и нестандартные модели ...



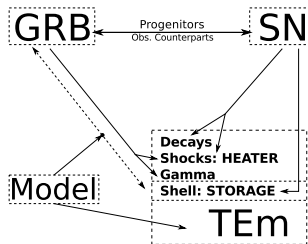
# Почему ТИ в послесвечениях?

- ∃ тепловая компонента в первичном  $\gamma$ - и раннем рентгене
- в наблюдениях (*Ryde & Pe'er 2009, Campana et al. 2006, Page et al. 2011*),
  - в моделях (*Blinnikov et al., 1999*)
  - в 2D rel-HD симуляциях (*Lazzati et al. 2009, Nagakura et al. 2011*)



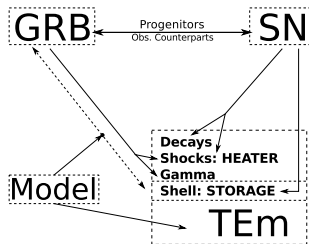
# Почему ТИ в послесвечениях?

**Общие соображения:** много энергии ( $10^{51} - 10^{53}$  эрг) + много вещества (вокруг массивной звезды)  $\Rightarrow$  ТИ



# Почему ТИ в послесвечениях?

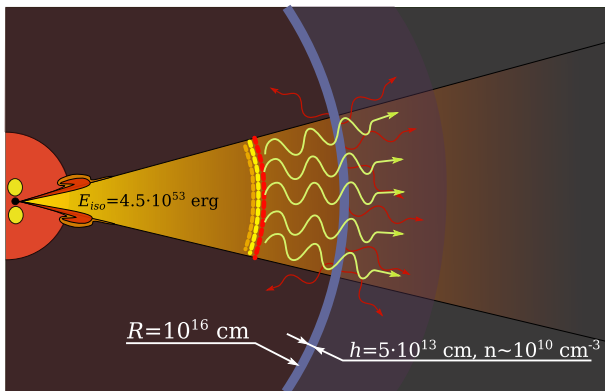
**Общие соображения:** много энергии ( $10^{51} - 10^{53}$  эрг) + много вещества (вокруг массивной звезды)  $\Rightarrow$  ТИ



Наконец, собственно **горбы сверхновых** в оптике (*Woosley & Bloom 2006, Cano et al. 2011*), а также иррегулярности



**Идея:** тонкая плотная оболочка испытывает нагрев излучением и джетом GRB



# ОСОБЕННОСТИ ЗАДАЧИ О ТИ GRB AG

- Нестационарность (и неавтомоделность)
- Перенос излучения + изменение (ионизационного) состояния + гидродинамика
- Широкий диапазон масштабов по времени, координатам и частотам
- *при важной роли комптоновского рассеяния (в самом общем варианте) – связь частотных и пространственных масштабов.*
- *Желательны неоднородность, кинетический подход и релятивизм ...*





# Код STELLA

- Изначально – для расчётов кривых блеска сверхновых от ИК до рентгена (Blinnikov et.al 1998)
- Уравнение переноса в моментном приближении (замыкание через Эддингтоновские множители) + Лагранжева гидродинамика
- УрЧП сводятся к системе ОДУ методом линий + полностью неявная схема с динамическим контролем шага и порядка (Brayton, Gustavson & Hachtel, 1972)
- Взаимное влияние излучения и движения вещества: непрозрачность при расширении, баланс сил и энергии.
- Возможность введения различных механизмов в коэффициенты поглощения, излучения, ионизационного баланса ...
- В рамках приближений: одномерие, нерелятивизм (все эффекты –  $O(v/c)$ ), однотемпературность



# Доработка кода

- Перенос и поглощение  $\gamma$ -излучения (фотоионизация, комптоновское рассеяние на свободных и связанных электронах)



# Доработка кода

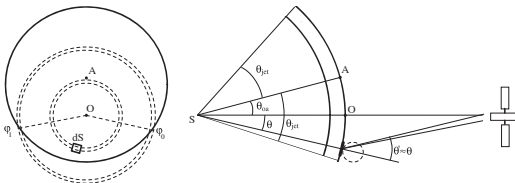
- Перенос и поглощение  $\gamma$ -излучения (фотоионизация, комптоновское рассеяние на свободных и связанных электронах)
- Нестационарная ионизационная кинетика (фотоионизация, CS, столкновительные процессы) в областях нагрева.



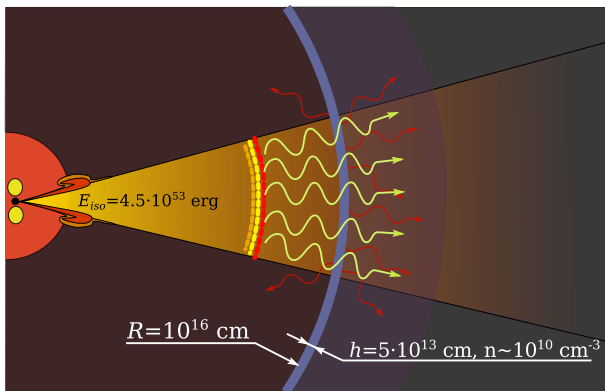
# Доработка кода

- Перенос и поглощение  $\gamma$ -излучения (фотоионизация, комптоновское рассеяние на свободных и связанных электронах)
- Нестационарная ионизационная кинетика (фотоионизация, CS, столкновительные процессы) в областях нагрева.
- Учёт коллимации, космологического красного смещения

$$L_{\nu}(t) = 8\pi^2 \int_{\mu_{min}}^1 R_{out}^2(t'_{\mu}) \mu I_{\nu}(t'_{\mu}, \mu) d\mu, \quad t'_{\mu} + R_{out}(t'_{\mu})(1 - \mu)/c = t$$



**Идея:** тонкая плотная оболочка испытывает нагрев излучением и джетом GRB



# Параметры

- **Оболочка:** Столкновение двух выбросов,  $n \sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ,  $R = 10^{16} \text{ см}$ ,  $\delta R = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}$ , химсостав как у внешних слоёв звезды  $100 - 200 M_{\odot}$ , испытавшей PI пульсации (Woosley, Blinnikov, Heger),  $\tau_T \approx 1$ , 100 зон



# Параметры

- **Оболочка:** Столкновение двух выбросов,  $n \sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ,  $R = 10^{16} \text{ см}$ ,  $\delta R = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}$ , химсостав как у внешних слоёв звезды  $100 - 200 M_{\odot}$ , испытавшей PI пульсации (Woosley, Blinnikov, Heger),  $\tau_T \approx 1$ , 100 зон
- **$\gamma$ -излучение:**  $E_{iso} = 4.5 \cdot 10^{53} \text{ эрг}$ ,  $\epsilon_{peak} = 330 \text{ кэВ}$ , Band function ( $\alpha = 0.9$ ,  $\beta = 2$ , 1 кэВ – 30 МэВ), 3xFRED-пульса по 1.5 с, общая длительность 16 с,  $\theta = 10^\circ$ , 100 энергий.



# Параметры

- **Оболочка:** Столкновение двух выбросов,  $n \sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ,  $R = 10^{16} \text{ см}$ ,  $\delta R = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}$ , химсостав как у внешних слоёв звезды  $100 - 200 M_{\odot}$ , испытавшей PI пульсации (Woosley, Blinnikov, Heger),  $\tau_T \approx 1$ , 100 зон
- **$\gamma$ -излучение:**  $E_{iso} = 4.5 \cdot 10^{53} \text{ эрг}$ ,  $\epsilon_{peak} = 330 \text{ кэВ}$ , Band function ( $\alpha = 0.9$ ,  $\beta = 2$ , 1 кэВ – 30 МэВ), 3xFRED-пульса по 1.5 с, общая длительность 16 с,  $\theta = 10^\circ$ , 100 энергий.
- **Джет** = “тепловая бомба” во внутренней зоне,  $E = E_{iso}$ ,  $\delta t = \delta R_1/c \approx 17 \text{ с}$  с задержкой  $R/(2c\Gamma^2) \approx 200 \text{ с}$  относительно  $\gamma$ -лучей





# Параметры

- **Оболочка:** Столкновение двух выбросов,  $n \sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ,  $R = 10^{16} \text{ см}$ ,  $\delta R = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}$ , химсостав как у внешних слоёв звезды  $100 - 200 M_{\odot}$ , испытавшей PI пульсации (Woosley, Blinnikov, Heger),  $\tau_T \approx 1$ , 100 зон
- **$\gamma$ -излучение:**  $E_{iso} = 4.5 \cdot 10^{53} \text{ эрг}$ ,  $\epsilon_{peak} = 330 \text{ кэВ}$ , Band function ( $\alpha = 0.9$ ,  $\beta = 2$ , 1 кэВ – 30 МэВ), 3xFRED-пульса по 1.5 с, общая длительность 16 с,  $\theta = 10^\circ$ , 100 энергий.
- **Джет** = “тепловая бомба” во внутренней зоне,  $E = E_{iso}$ ,  $\delta t = \delta R_1/c \approx 17 \text{ с}$  с задержкой  $R/(2c\Gamma^2) \approx 200 \text{ с}$  относительно  $\gamma$ -лучей
- **Тепловое излучение:** 50 тыс.  $\text{\AA}$  – 60 кэВ, 120 частот

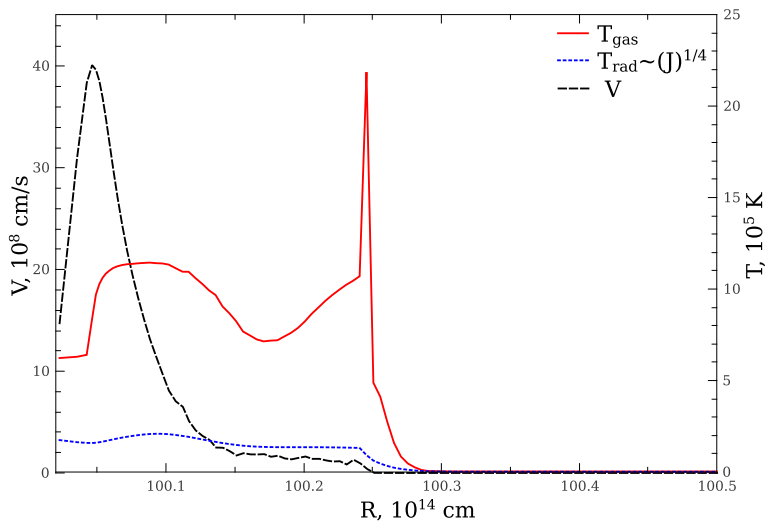


# Параметры

- **Оболочка:** Столкновение двух выбросов,  $n \sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ,  $R = 10^{16} \text{ см}$ ,  $\delta R = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}$ , химсостав как у внешних слоёв звезды  $100 - 200 M_{\odot}$ , испытавшей PI пульсации (Woosley, Blinnikov, Heger),  $\tau_T \approx 1$ , 100 зон
- **$\gamma$ -излучение:**  $E_{iso} = 4.5 \cdot 10^{53} \text{ эрг}$ ,  $\epsilon_{peak} = 330 \text{ кэВ}$ , Band function ( $\alpha = 0.9$ ,  $\beta = 2$ , 1 кэВ – 30 МэВ), 3xFRED-пульса по 1.5 с, общая длительность 16 с,  $\theta = 10^\circ$ , 100 энергий.
- **Джет** = “тепловая бомба” во внутренней зоне,  $E = E_{iso}$ ,  $\delta t = \delta R_1/c \approx 17 \text{ с}$  с задержкой  $R/(2c\Gamma^2) \approx 200 \text{ с}$  относительно  $\gamma$ -лучей
- **Тепловое излучение:** 50 тыс. Å – 60 кэВ, 120 частот
- **Граничные условия:** Обе границы прозрачны + фон  $0.1 \cdot \text{BB}(2700 \text{ К})$  на внутренней.



## Профили скорости и температуры



# Характерные эффекты

- Разрыв в непрозрачности и свойствах ТИ на фронте гамма-лучей

---

<sup>1</sup>Однако, для длительного степенного послесвечения, всё же необходимы “окна” в оболочке, чтобы часть джета осталась релятивистской



# Характерные эффекты

- Разрыв в непрозрачности и свойствах ТИ на фронте гамма-лучей
- Полная ионизация на шкале  $\sim 10^{-3}$  с (остаются только водородоподобные ионы самых тяжёлых элементов, например, FeXXVI в концентрациях  $0.1 - 10 \text{ см}^{-3}$ ), рекомбинация – в течение нескольких 10 с  $\Rightarrow$  гамма-всплеск и раннее рентгеновское послесвечения наблюдаемы<sup>1</sup>
- Сильный нагрев и сильные потери (ff, fb), температура (в Лагранжевой зоне) колеблется вслед за плотностью гамма-лучей (2-10 млн К).

---

<sup>1</sup> Однако, для длительного степенного послесвечения, всё же необходимы “окна” в оболочке, чтобы часть джета осталась релятивистской



# Характерные эффекты

- Разрыв в непрозрачности и свойствах ТИ на фронте гамма-лучей
- Полная ионизация на шкале  $\sim 10^{-3}$  с (остаются только водородоподобные ионы самых тяжёлых элементов, например, FeXXVI в концентрациях  $0.1 - 10 \text{ см}^{-3}$ ), рекомбинация – в течение нескольких 10 с  $\Rightarrow$  гамма-всплеск и раннее рентгеновское послесвечения наблюдаемы<sup>1</sup>
- Сильный нагрев и сильные потери (ff, fb), температура (в Лагранжевой зоне) колеблется вслед за плотностью гамма-лучей (2-10 млн К).
- Давление излучения =  $\sim 10^4$  от газового  $\Rightarrow$  чувствительность динамики к непрозрачности (и граничному условию)

---

<sup>1</sup>Однако, для длительного степенного послесвечения, всё же необходимы “окна” в оболочке, чтобы часть джета осталась релятивистской



# Характерные эффекты

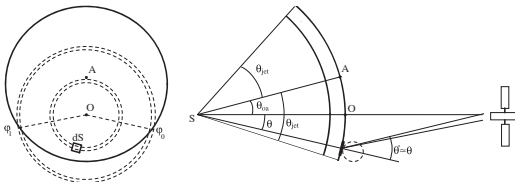
- Разрыв в непрозрачности и свойствах ТИ на фронте гамма-лучей
- Полная ионизация на шкале  $\sim 10^{-3}$  с (остаются только водородоподобные ионы самых тяжёлых элементов, например, FeXXVI в концентрациях  $0.1 - 10 \text{ см}^{-3}$ ), рекомбинация – в течение нескольких 10 с  $\Rightarrow$  гамма-всплеск и раннее рентгеновское послесвечения наблюдаемы<sup>1</sup>
- Сильный нагрев и сильные потери (ff, fb), температура (в Лагранжевой зоне) колеблется вслед за плотностью гамма-лучей (2-10 млн К).
- Давление излучения =  $\sim 10^4$  от газового  $\Rightarrow$  чувствительность динамики к непрозрачности (и граничному условию)
- Радиационное охлаждение, размывание и торможение ударной волны

---

<sup>1</sup>Однако, для длительного степенного послесвечения, всё же необходимы “окна” в оболочке, чтобы часть джета осталась релятивистской



# Задержка и красное смещение

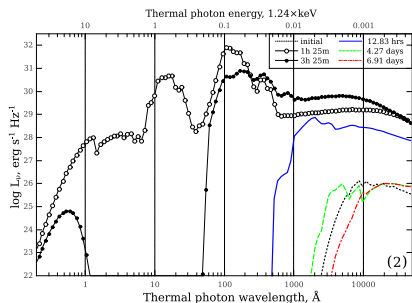
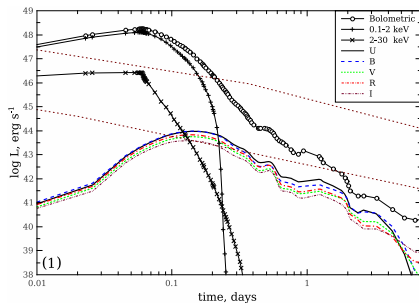


- $$L_\nu(t) = 8\pi^2 \int_{\mu_{min}}^1 R_{out}^2(t'_\mu) \mu l_\nu(t'_\mu, \mu) d\mu, \text{ и } t'_\mu + R_{out}(t'_\mu)(1 - \mu)/c = t$$
- $\delta t = (1 - \cos \theta)R(t - \delta t)/c \approx 5000 \text{ с}$  больше  $\delta R/c \approx 1700 \text{ с}$ . Нарастание светимости на шкале  $\delta t$ , спад – на шкале нагрева/охлаждения  $\Rightarrow$  резко очерченные плато в рентгене
- Космологические эффекты:  $t = (1 + z)t_0$ ,  $\nu = \nu_0/(1 + z)$ ,  
 $F_\nu(\nu) = L_{\nu 0}(\nu_0)/(4\pi(1 + z)D_L^2(z))$

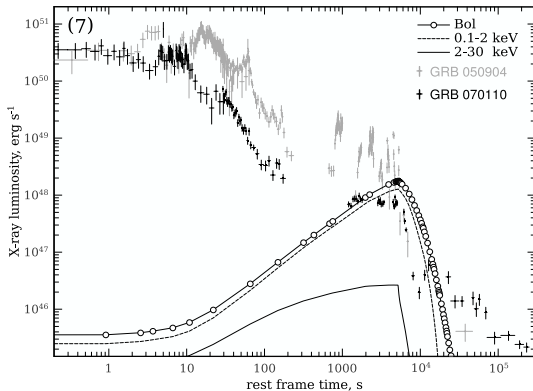




## Светимости и спектры



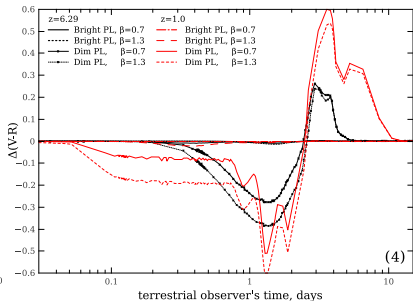
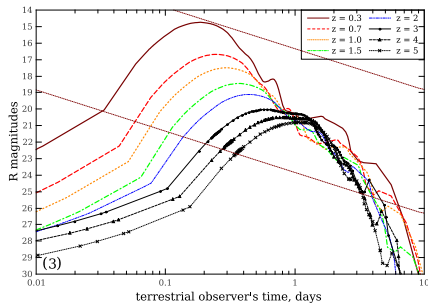
# Рентген: плато



- Э “Дефицит жёсткости” из-за однотемпературности и неучёта рассеянного  $\gamma$ -излучения в кривой ТИ



## R-величины и цвета



$$R = -2.5 \log \left( \frac{1}{4\pi D^2(z)(1+z)} \int_R L_\nu(\nu(1+z)) d\nu \right) + C_R$$



# Оптические послесвечения: иррегулярности, горбы

- Послесвечения с иррегулярностями систематически более “синие”

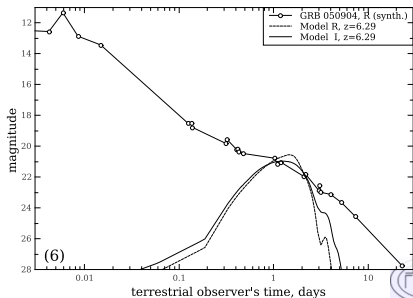
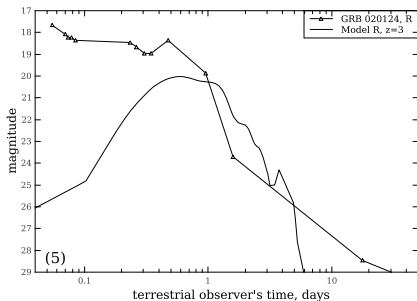
GRB	$z$	$E_{\gamma,iso}^1$ $10^{53}$ эрг	$R_{bump}^4$ зв. вел.	$t_{peak}^5$ сут.	$t_{bump}^6$ сут.	$\beta$ (средн.)
020124	3.198	1.6	18.36	0.47	$\approx 7$	0.56
021004	2.3351	$0.1^2$	16.2 19.05	0.08 0.9	0.5 1.7	0.67
030328	1.52	3.3	19.4	0.28	1.2	0.36
030429X	2.65	$0.13^3$	20.9	1.2	$\approx 4$	0.22
050904	6.29	6–32	20.5	0.32	$\approx 7$	...
Model	any	4.5	Рис. (3)	Рис. (3)	Рис. (3)	Рис. (2),(4)

<sup>1</sup> – приведено к диапазону 1 кэВ – 10 МэВ. <sup>2</sup> – в диапазоне 15-150 кэВ, за отсутствием спектров в более жёстких областях. <sup>3</sup> – пиковая светимость была  $5 \cdot 10^{53}$  эрг/с



# Оптика: иррегулярности GRB 020124, 050904

- Модель иррегулярности.** Плавное начало – синхротронное излучение релятивистской УВ на сильном контрасте плотности (*Nakar & Granot, 2007*), плато и крутое окончание – ТИ. Характерное время перехода на отклонение д.б.  $\sim 10t_{\gamma-sh}$   $\sim 2000$  с, что с учётом  $(1+z)$  соответствует наблюдаемым моментам начала.



# КВАЗИСВЕРХНОВАЯ

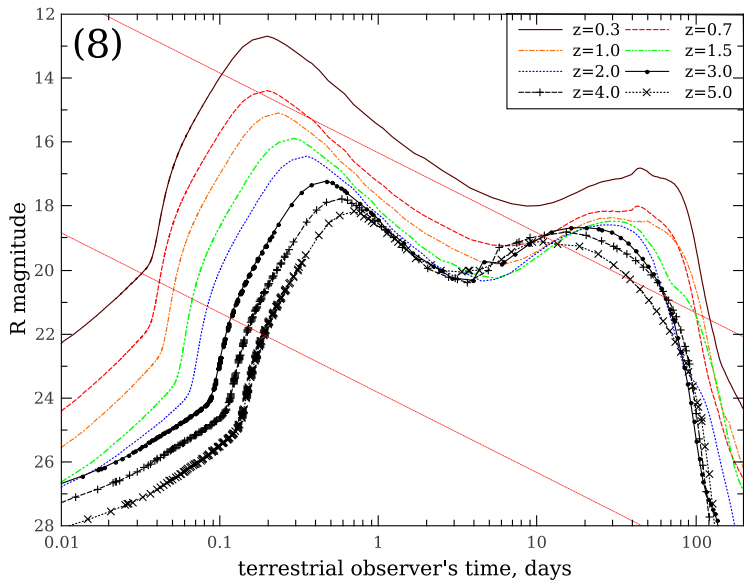
- Для 1D – экзотика, но может быть ключом к пониманию 2-3-D эффектов (термализация большого количества энергии в областях с контрастом непрозрачности) и объяснению связи GRB-SN, без наложения ограничений на “центральную машину”



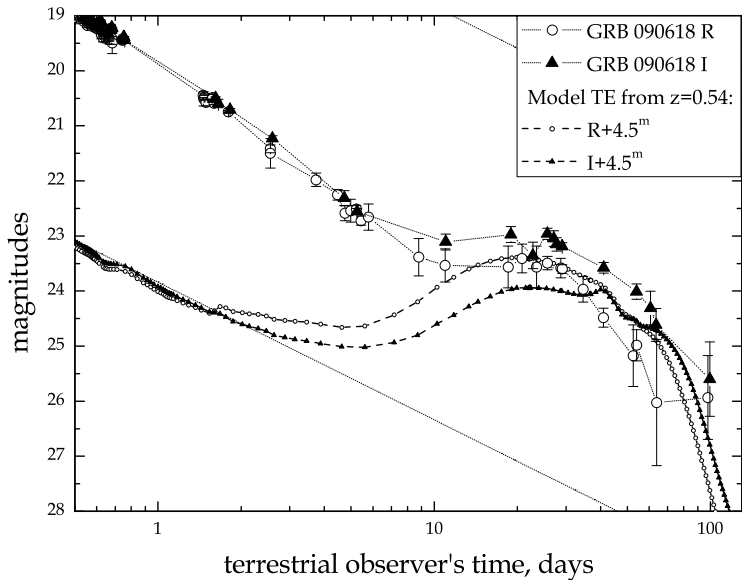
# КВАЗИСВЕРХНОВАЯ

- Непрозрачная внутренняя граница (т.е. предельный случай).  $\Rightarrow$  Излучение “разрывает” оболочку:
- Скорости разлёта  $\approx 6 \cdot 10^4$  км/с, Кривая блеска: вспышка (аналог выхода UV)  $\rightarrow$  степенной спад  $\rightarrow$  горб как у яркой SNIIn









# ВЫВОДЫ

- Тепловое излучение (структур околосвѣздной среды) имеет право быть важной частью моделей послесвечений, также как и prompt emission



# ВЫВОДЫ

- Тепловое излучение (структур околзвёздной среды) имеет право быть важной частью моделей послесвечений, также как и prompt emission
- Взаимосвязь эффектов переноса, гидродинамики, релятивизма, микрофизики и особо – комптоновского рассеяния, ставит задачу **согласованного** их моделирования для объяснения наблюдений и физики гамма-всплесков и их послесвечений. Это не “роскошь”, а насущная потребность.



# ВЫВОДЫ

- Тепловое излучение (структур околзвёздной среды) имеет право быть важной частью моделей послесвечений, также как и prompt emission
- Взаимосвязь эффектов переноса, гидродинамики, релятивизма, микрофизики и особо – комптоновского рассеяния, ставит задачу **согласованного** их моделирования для объяснения наблюдений и физики гамма-всплесков и их послесвечений. Это не “роскошь”, а насущная потребность.
- Возможность сверхновоподобных взрывов в околзвёздном веществе  $\Rightarrow$  интерпретация связи GRB-SN + бóльшая свобода для моделей “центральной машины”.

