



**Институт теоретической и экспериментальной физики**  
Государственный научный центр Российской Федерации

**Релятивистские эффекты переноса излучения  
при выходе ударной волны на поверхность сверхновой**

Алексей Толстов, ИТЭФ

- Вспышки сверхновых
- Радиационные ударные волны
- Релятивистское уравнение переноса излучения
- Релятивистские эффекты задержки по времени
- Модель выхода ударной волны сверхновой типа I b/c
- Кривые блеска и спектры
- Обсуждение и заключение

# Вспышки сверхновых

- Вспышка – результат выхода ударной волны на поверхность звезды.
- Детектирование вспышек - получение информации об особенностях взрыва и параметров предсверхновой, что необходимо для понимания механизмов явления.
- Учет гидродинамики и переноса излучения ведут к необходимости построения численных моделей.
- Детектирование вспышек аппаратом SWIFT (Содерберг и др., 2008).
- Получения новых данных в рамках предстоящего запуска космической обсерватории LOBSTER (Кальзавара, Матцнер, 2004).

# Радиационные ударные волны

Структура фронта определяется лучистым теплообменом (Зельдович, Райзер, 1966). Радиационное давление и энергия превышают кинетическое давление и энергию газа. Свойства фотонного газа являются определяющими. Максимальное сжатие:

$$(4/3 + 1)/(4/3 - 1) = 7 .$$

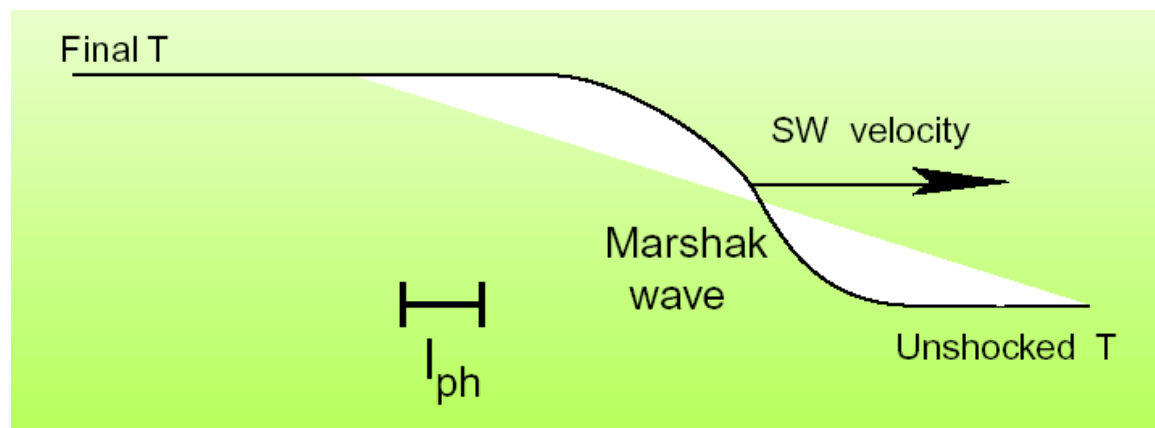
Для радиационных ударных волн сжатие может быть на порядок больше!

# Радиационные ударные волны

При больших амплитудах ударной волны, когда плотность энергии и давление излучения становятся достаточно большими по сравнению с энергией и давлением вещества разрыв исчезает. Газ приходит из начального состояния в конечное только за счет лучистой теплопроводности (С.З.Беленький - неопубл., В.А.Белоконь, 1959).

При этом:

$$P_r / P_g \approx 4.4$$



## Радиационные ударные волны Более точное решение

В радиационно доминированной ударной волне поток импульса фотонов (от фотонов к электронам и ионам) начинает играть роль сравнимую с потоком энергии.

Более строго с учетом переноса фотонов (Имшенник, Морозов, 1964):

$$P_r / P_g \approx 8.5$$

Связь приводит к необходимости строгого учета непрозрачности в расчетах.

# Источник фотонов в ударных волнах

Ударная волна внутри звезды находится в адиабатической фазе до тех пор пока

$$R/l > c/D$$

, где  $R$  – расстояние от ударной волны до фотосферы (Шевалье, 1981, Морозов, 1966)

Когда

$$R/l < c/D$$

начинается вспышка – выход ударной волны на поверхность сверхновой. Ударная волна становится неадиабатичной и ее поведение затруднительно описать аналитически.

# Численный расчет выхода ударной волны

Когда ударная волна приближается к поверхности звезды, где плотность вещества резко падает, скорость растет в соответствии с автомодельным решением Гендельмана и Франк-Каменецкого (1956), Сакураи (1960). Во внешних слоях (с томсоновской оптической толщиной  $\tau \sim c/D \sim 10$  и меньше, где  $D$  – скорость фронта ударной волны) потери на излучение становятся существенными и ускорение ударной волны прекращается.

Используется 2 алгоритма:

**STELLA** (Static Eddington-factor Low-velocity Limit Approximation)

(Блинников, 1998)

**RADA** (fully Relativistic rADiative transfer Approximation)

(Толстов, 2003)



## Численное решение уравнение переноса излучения в сопутствующей системе (RADA)

$$\begin{aligned}
 & \frac{\gamma}{c} (1 + \beta \mu_0) \frac{\partial I_0(\mu_0, \nu_0)}{\partial t} + \gamma (\mu_0 + \beta) \frac{\partial I_0(\mu_0, \nu_0)}{\partial r} \\
 & + \frac{\partial}{\partial \mu_0} \left\{ \gamma (1 - \mu_0^2) \left[ \frac{(1 + \beta \mu_0)}{r} - \gamma^2 (\mu_0 + \beta) \frac{\partial \beta}{\partial r} - \frac{\gamma^2}{c} (1 + \beta \mu_0) \frac{\partial \beta}{\partial t} \right] I_0(\mu_0, \nu_0) \right\} \\
 & - \frac{\partial}{\partial \nu_0} \left\{ \gamma \nu_0 \left[ \frac{\beta (1 - \mu_0^2)}{r} + \gamma^2 \mu_0 (\mu_0 + \beta) \frac{\partial \beta}{\partial r} + \frac{\gamma^2}{c} \mu_0 (1 + \beta \mu_0) \frac{\partial \beta}{\partial t} \right] I_0(\mu_0, \nu_0) \right\} \\
 & + \gamma \left\{ \frac{2\mu_0 + \beta(3 - \mu_0^2)}{r} + \gamma^2 (1 + \mu_0^2 + 2\beta \mu_0) \frac{\partial \beta}{\partial r} \right. \\
 & \left. + \frac{\gamma^2}{c} [2\mu_0 + \beta(1 + \mu_0^2)] \frac{\partial \beta}{\partial t} \right\} I_0(\mu_0, \nu_0) = \eta_0(\nu_0) - \chi_0(\nu_0) I_0(\mu_0, \nu_0).
 \end{aligned} \tag{95.9}$$

Уравнение переноса в сопутствующей системе координат (Михалас, 1980) решается численно алгоритмом RADA методом характеристик до значений Лоренц-фактора  $\gamma \sim 1000$ .  $\eta$  – коэффициент излучения,  $\chi$  – коэффициент поглощения, все величины – в сопутствующей системе координат.

# Эффекты Лоренц-инвариантности

Лоренц-инвариантность уравнения переноса, эффект Доплера и абберация:

$$I(\mu, \nu) = (\nu/\nu_0)^3 I_0(\mu_0, \nu_0),$$

$$\nu = \nu_0 \gamma (1 + \beta \mu_0),$$

$$\mu = \frac{\mu_0 + \beta}{1 + \beta \mu_0},$$

приводят к следующим визуальным эффектам при движении к источникам излучения:

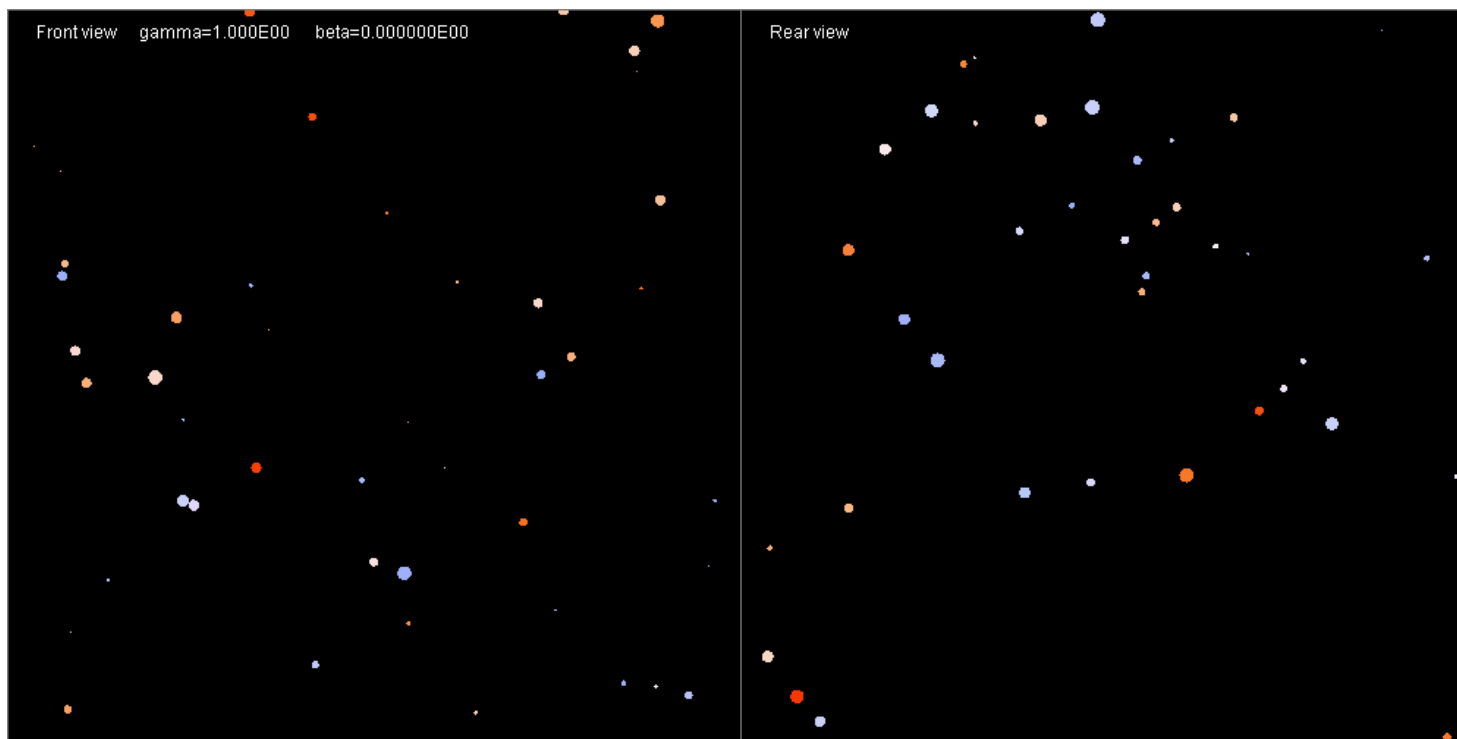
1. Поток излучения увеличивается
2. Спектр становится более жестким
3. Пространство сжимается к направлению движения

## Вид звездного неба при ускоренном движении наблюдателя

Параметры модели:

1000 звезд класса M-A (2000-10000 K) звездной величины  $m=0-10$ .

Видимый угол камеры  $\Omega \sim 1$  sr, Лоренц фактор  $\Gamma=1\dots 1000$ .



## Вид звездного неба при замедленном движении наблюдателя

Параметры модели:

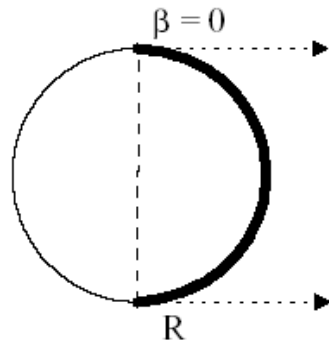
1000 звезд класса M-A (2000-10000 K) звездной величины  $m=0-10$ .

Видимый угол камеры  $\Omega \sim 1$  sr, Лоренц фактор  $\Gamma=1\dots 1000$ .

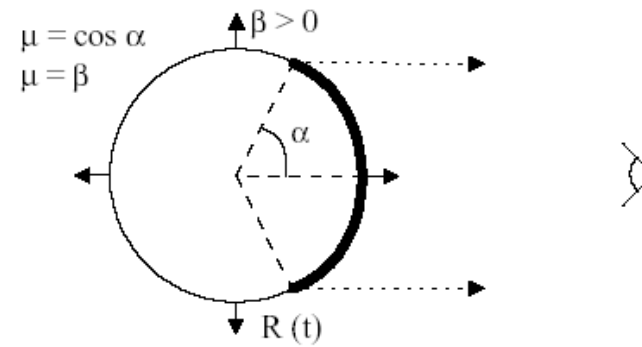


# Релятивистский эффект задержки по времени

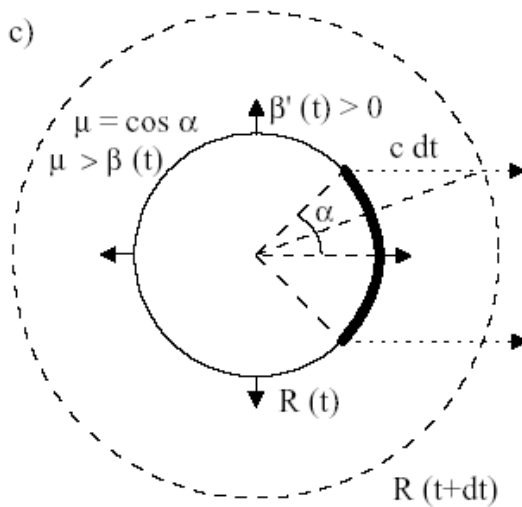
a)



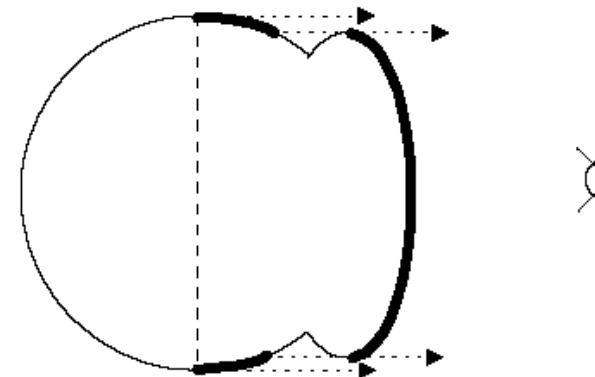
b)



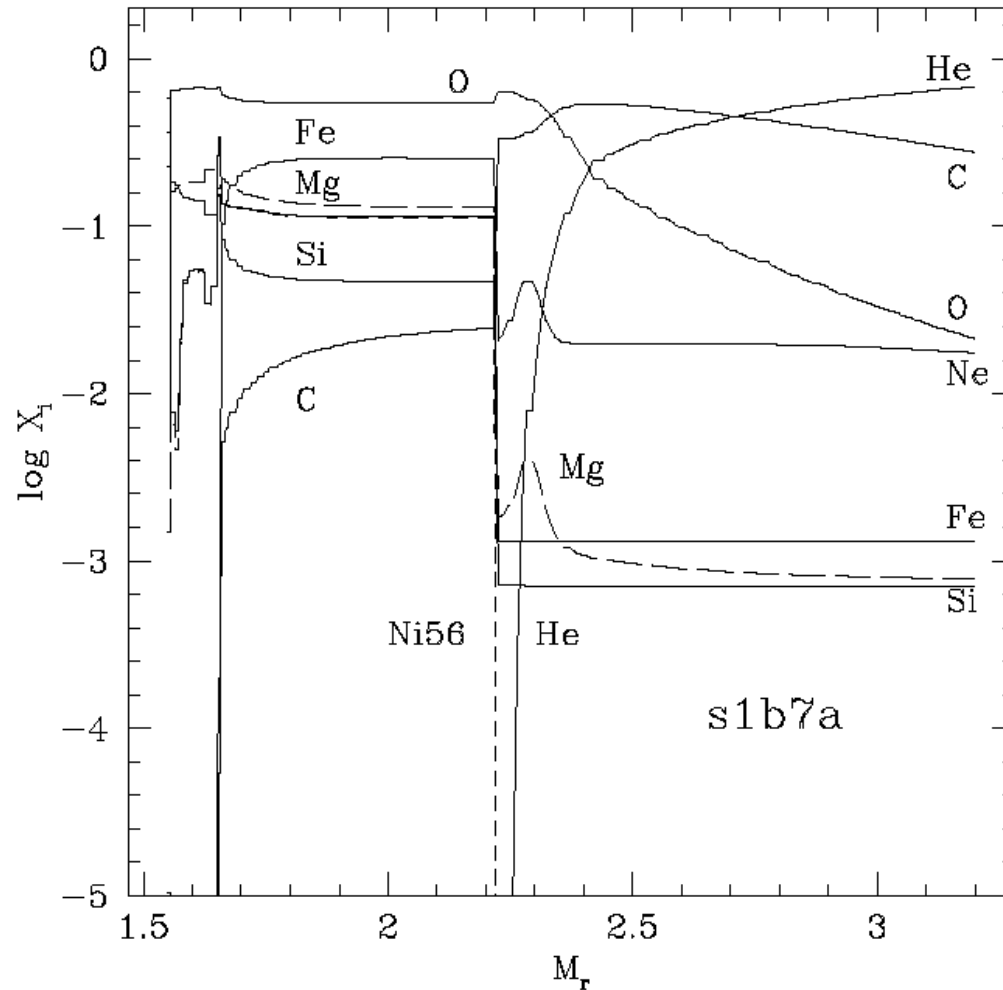
c)



d)



# Эволюционная модель предсверхновой типа Ib/c



7A model parameters  
(Woosley and al., 1995):

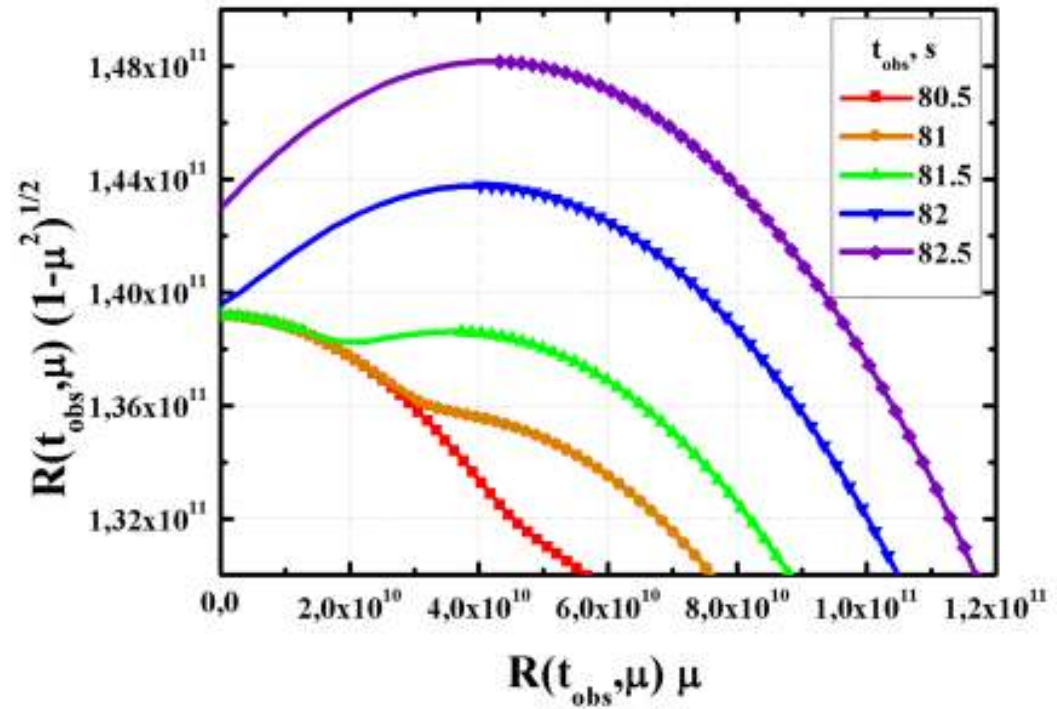
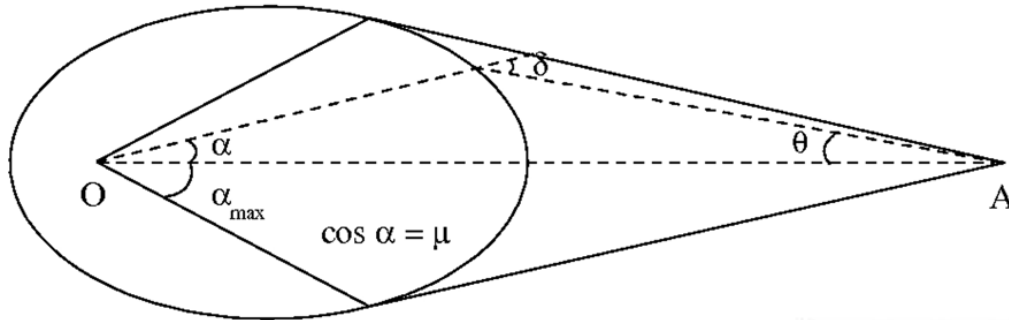
$$M = 3.199 M_{\odot}$$

$$R = 1.41 \cdot 10^{11} \text{ cm}$$

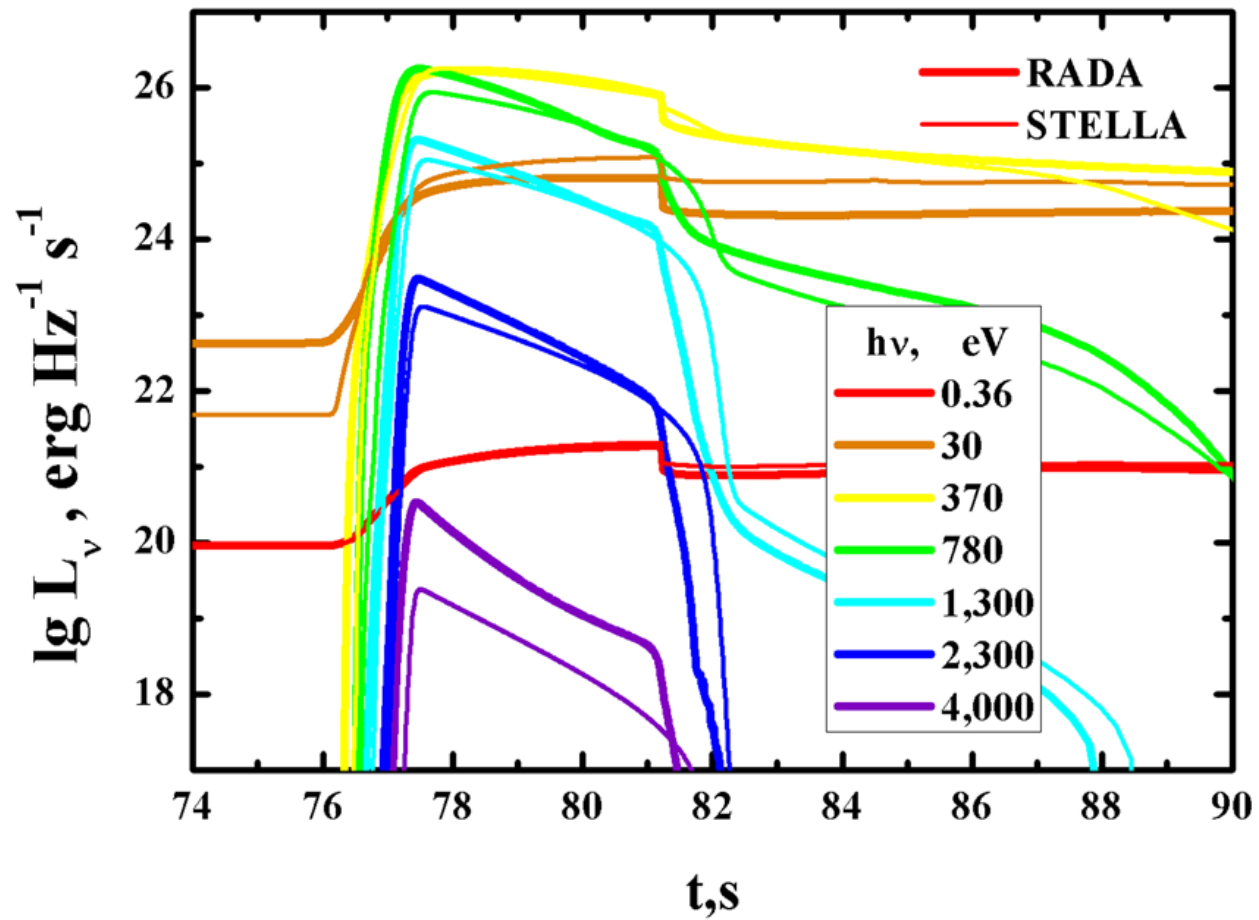
$$E = 1.24 \cdot 10^{51} \text{ erg}$$

STELLA (Блинников,  
1998)

# Эквитемпоральные поверхности

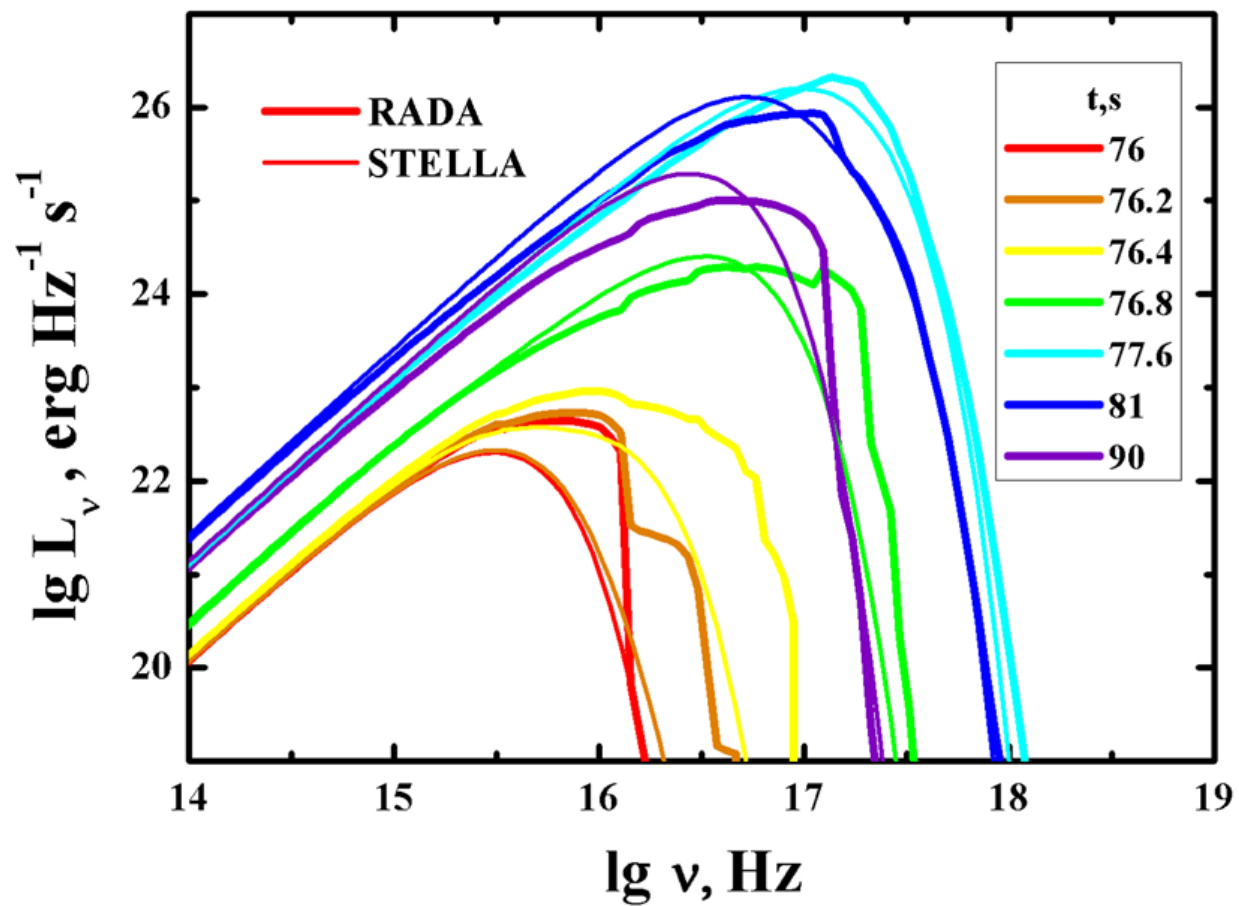


# Кривые блеска в системе отсчета наблюдателя

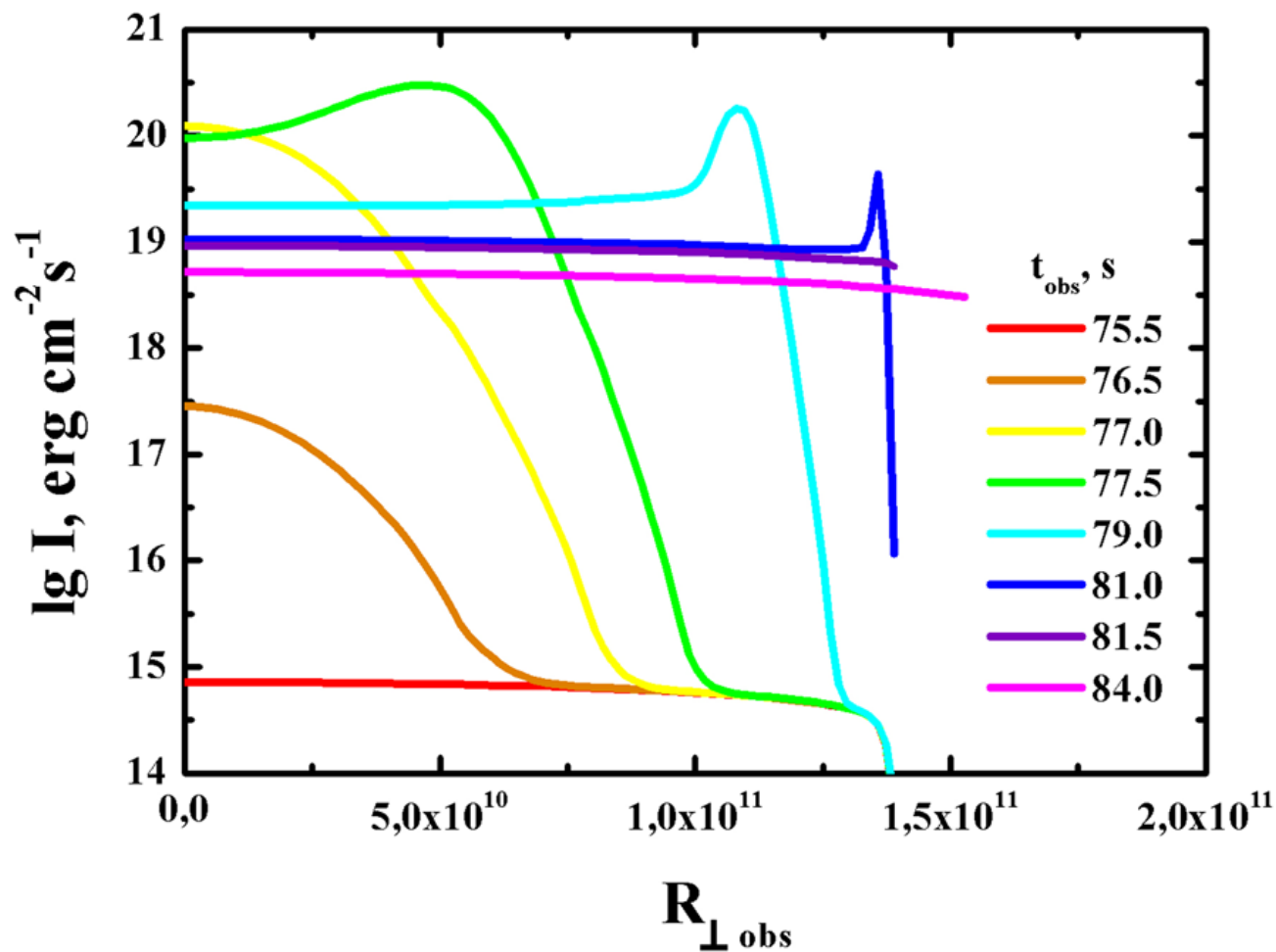




# Спектры в системе отсчета наблюдателя

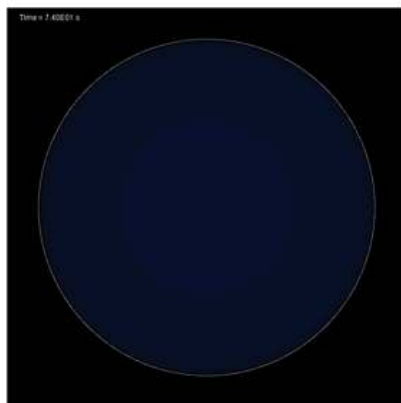


# Выход ударной волны на поверхность сверхновой

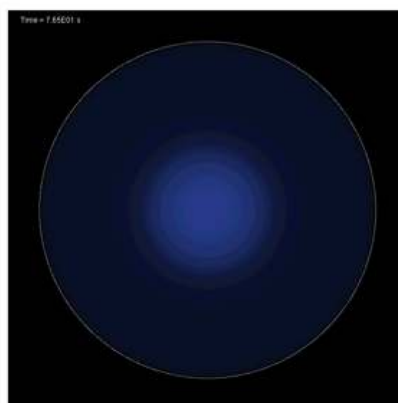


# Выход ударной волны на поверхность сверхновой

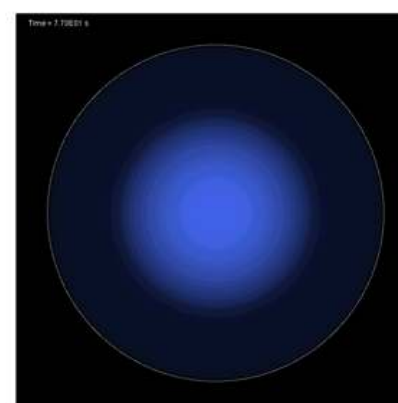
74 s



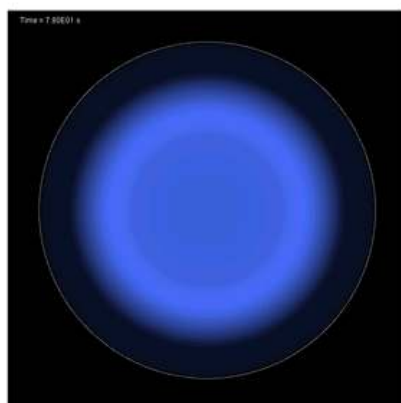
76.5 s



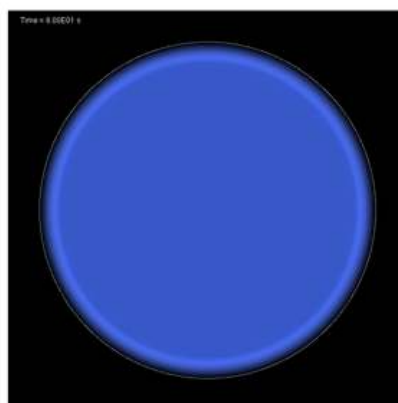
77 s



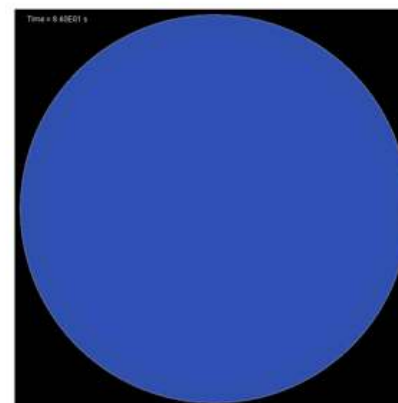
78 s



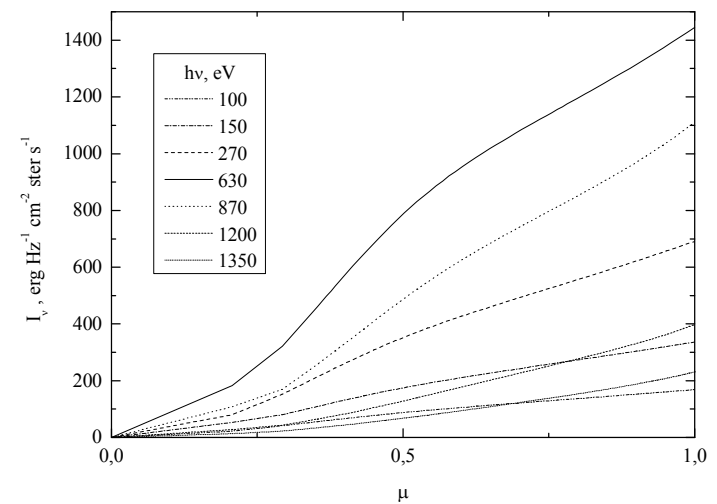
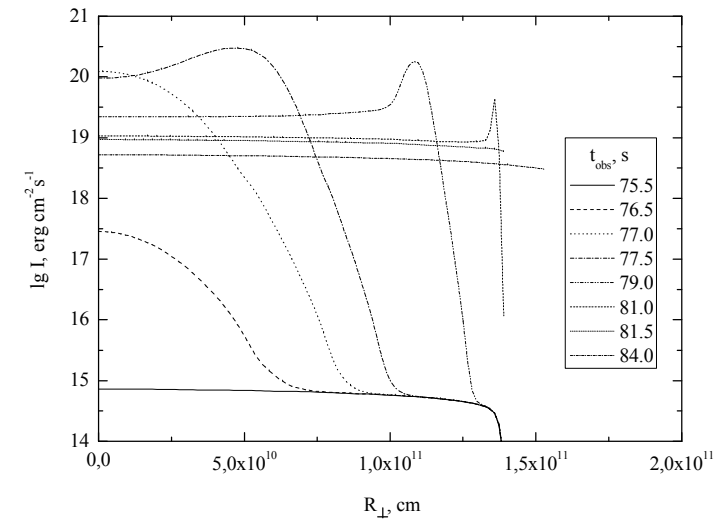
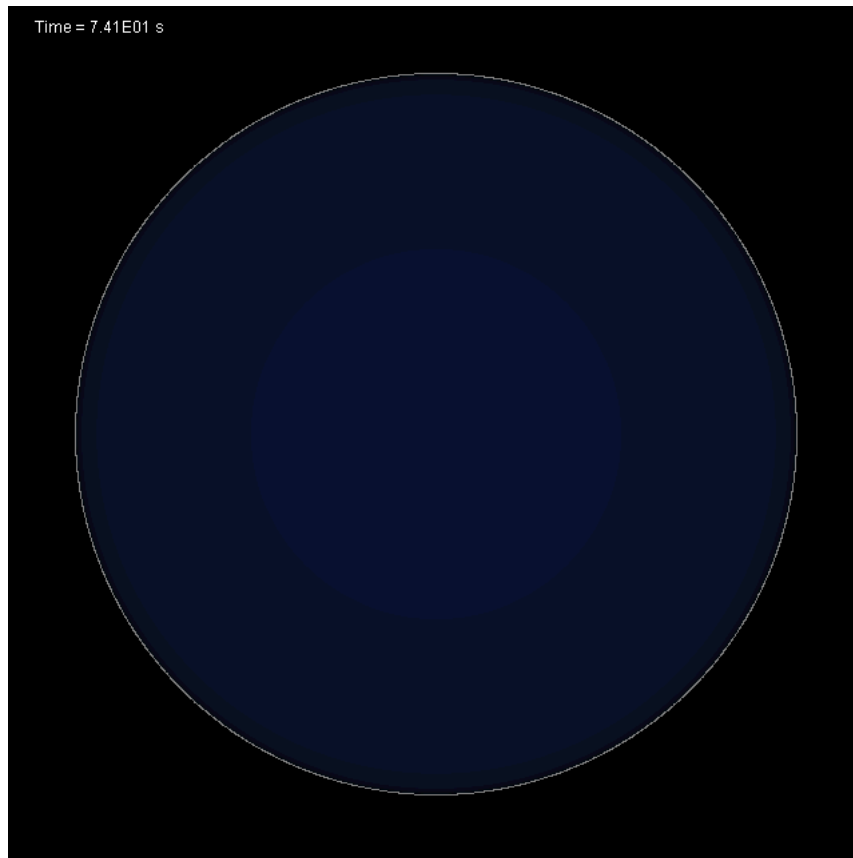
80 s



84 s

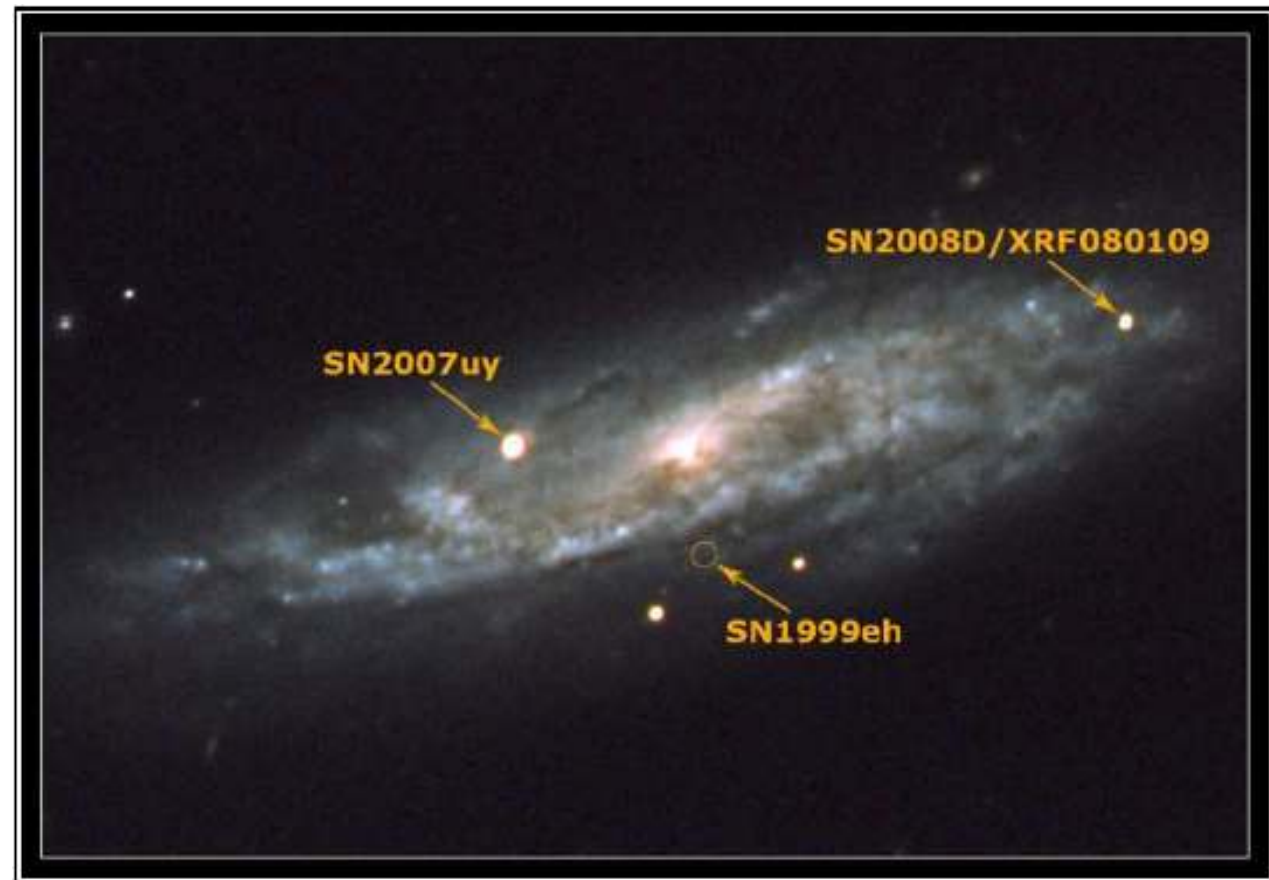


# Выход ударной волны на поверхность сверхновой



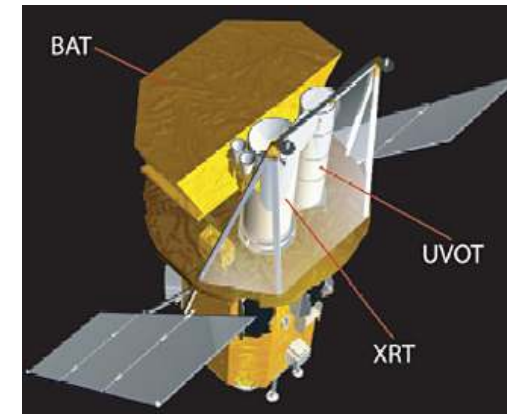
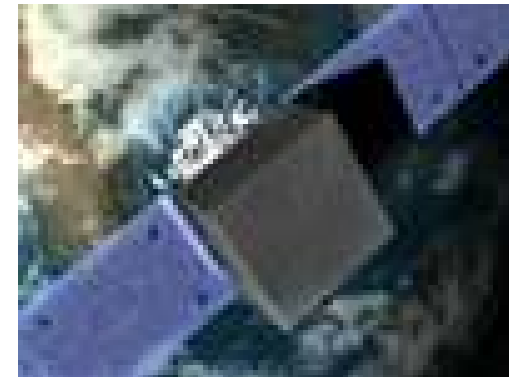
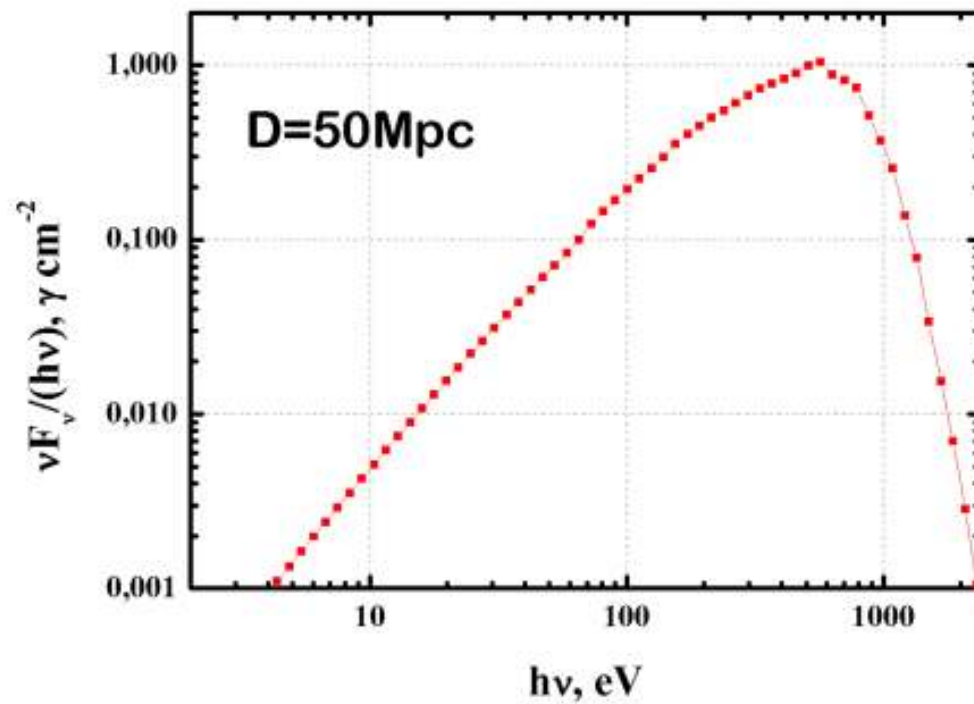
# Фабрика сверхновых NGC2770

SN2008D выход  
ударной волны  
заметен  
A.Soderberg et al.;  
LC Modjaz et al.  
(2008)



# Интерпретация наблюдательных данных

Моделирование спектра для аппаратов LOBSTER, Swift, GLAST.

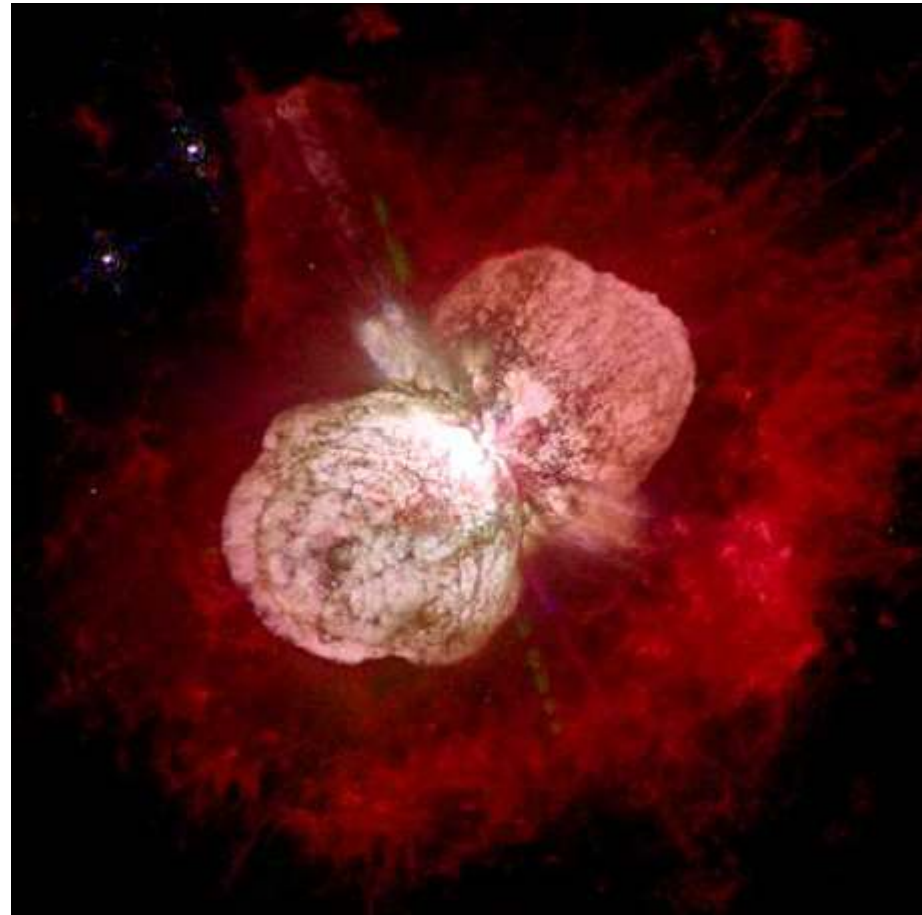


Задачи для аппарата LOBSTER и теории (Кальзавара, Матцнер, 2004):

- Неизвестное число SN II типа 1987A ( $\sim 100$  сек) - важнейшее для проверки теории эволюции звёзд (BSG/RSG at core collapse).
- 50 - 600 SNe II за 3 года - внутри 250 Мпк. Наша детальная теория должна проверить это предсказание (CM04 - простое масштабирование).
- SN Ib/c слишком коротко ( $\sim 10$  сек), но: самые жёсткие спектры, может быть рентген от ветра предсверхновой. Очень важно для гиперновых, SN-GRB time-delay, если близко - корреляции с GW и  $\nu$  событиями.

# Развитие теоретического моделирования

- Разработка быстрого алгоритма для расчета переноса излучения
- Более точный учет гидродинамических эффектов
- Более корректное описание процессов рассеяния
- Более полное описание механизмов излучения
- Разработка многомерных моделей для учета эффектов асимметрии





- Построение численного метода решения релятивистского уравнения переноса
- Возможность учета релятивистских эффектов задержки по времени
- Моделирование выхода ударной волны на поверхность сверхновой
- Вычисления спектров и кривых блеска
- Возможность предсказания, анализа и интерпретации наблюдательных данных

- Белоконь В.А., ЖЭТФ, **36**, 341 (1959).
- Бисноватый-Коган Г.С. и др. (Bisnovatyι-Kogan G.S. et al.), ApSS, **35**, 23 (1975).
- Блинников С.И. и др. (Blinnikov S.I. et al.), Astrophys.J., **496**, 454 (1998).
- Гандельман Г.М., Франк-Каменецкий, Д.А. (Gandelman G.M., Frank-Kamenetsky D.A.), Доклады АН СССР, **107**, 811 (1956).
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. (Zeldovich, Y.B., Raizer Y.P.), Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений, Наука, 1966.
- Имшенник В.С., Морозов Ю.И, ПМТФ, **2**, (1964).
- Кальзава, Матцнер (Calzavara A.J., Matzner C.D. MNRAS, **351**, 694 (2004).
- Михалас, (Mihalas, D.), Astrophys.J., **237**, 574 (1980).
- Сакураи (Sakurai A.), Commun. Pure Appl. Math., **13**, 353 (1960).
- Содерберг и др. (Soderberg A.M., et al.), Nature, **453**, 469 (2008).
- Толстов А.Г., Блинников С.И. (Tolstov A.G., Blinnikov S.I.), AstL, **29**, 403 (2003)