

---

Проявление не-ЛТР эффектов на  
кривых блеска сверхновых:  
влияние неравновесного излучения  
на уравнение состояния вещества  
и учет рассеяния в линиях

П.Бакланов, С.Блинников

[baklanovp@gmail.com](mailto:baklanovp@gmail.com)

ITER

# Содержание

---

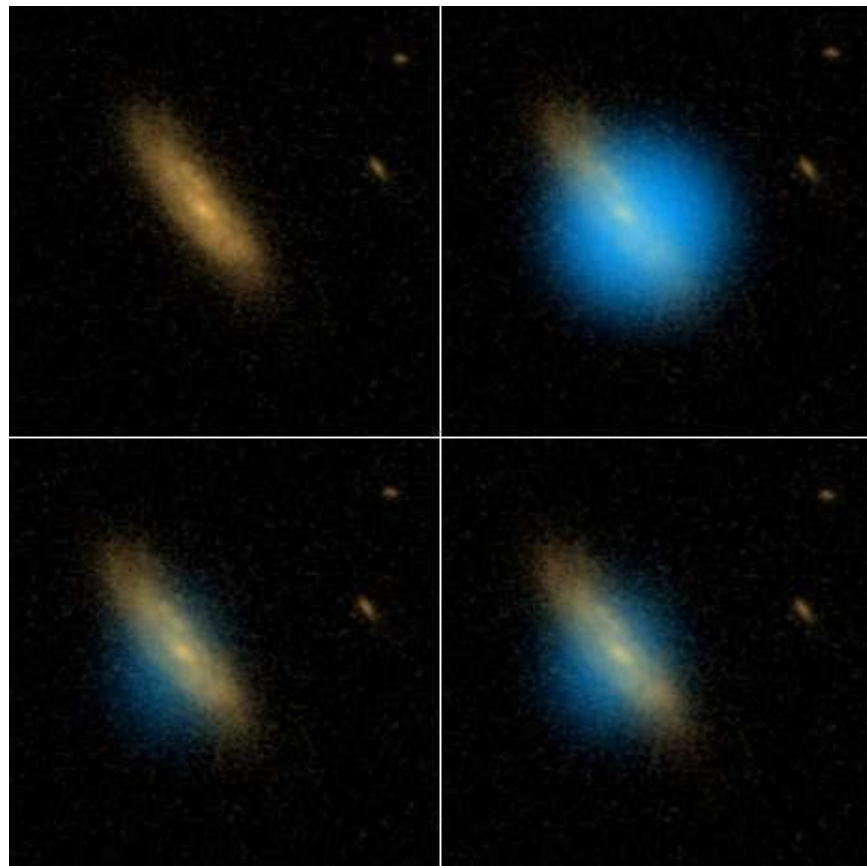
- Введение
- SNLS-04D2dc: выход ударной волны
- Исходные модельные предположения
- Предсверхновые SN Ia, IIP
- Флуоресценция
- Сравнение скоростей ударных и радиационных процессов
- Модифицированное небулярное приближение
- Заключение

# SNLS-04D2dc: открытие

---

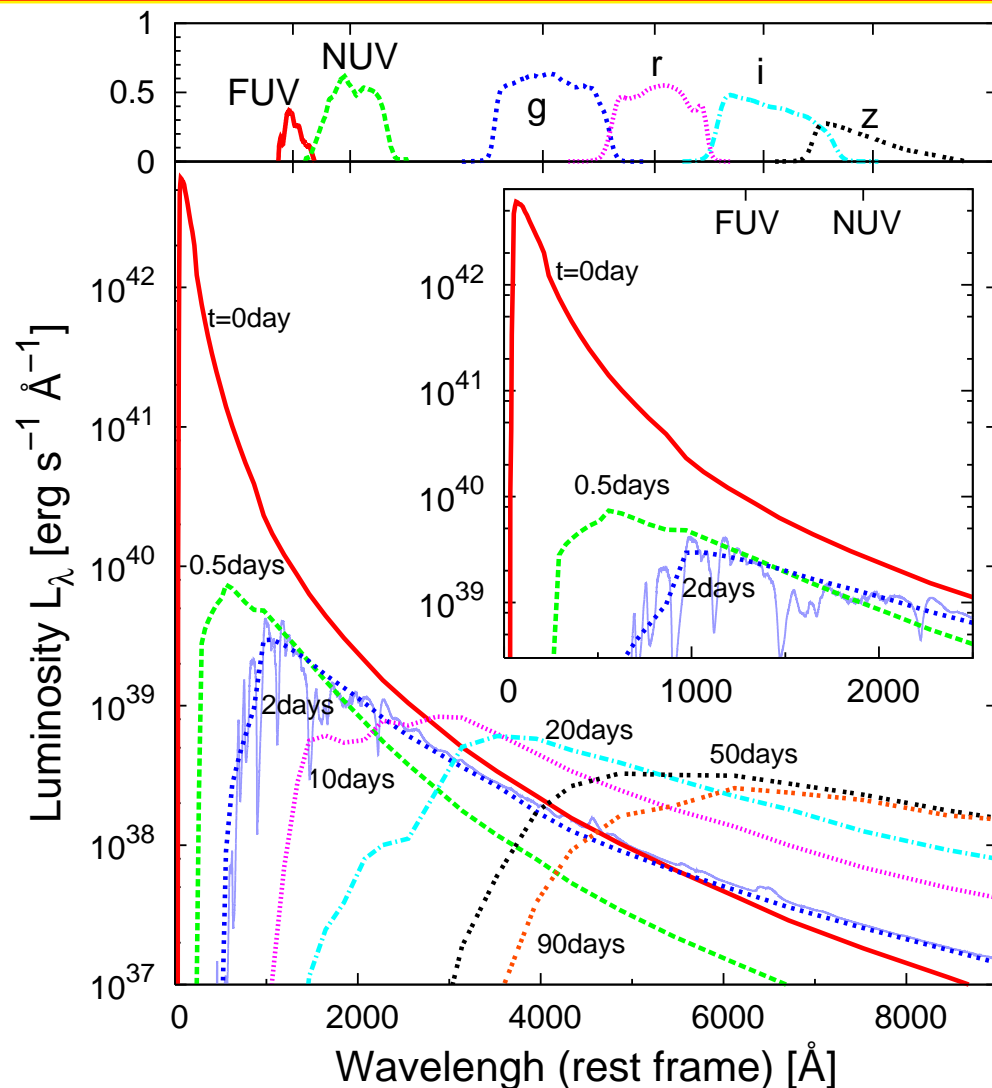
Вспышка в УФ, зарегистрированная GALEX в 2008 году. Красное изображение родительской галактики NAS-04D2dc получено Хабблом.

Мы получили, что SNLS-04D2dc вызвана взрывом звезды с массой предсверхновой  $18.4M_{\odot}$ , радиусом  $800R_{\odot}$  и с характерной для SN II энергией  $1.2 \times 10^{51}$  эрг.



# SNLS-04D2dc: эволюция спектра

Эволюция модельного спектра на моменты  $0^d$ ,  $0.5^d$ ,  $2^d$ ,  $10^d$ ,  $20^d$ ,  $50^d$ ,  $90^d$  дней от начала вспышки. Тонкой сплошной синей линией изображен не-ЛТР спектр на 2-й день (Gezari et al. 2008). (g-band, r-band, i-band, z-band in AB magnitude system).



из работы N. Tominaga, etc (2009)

# Исходные модельные предположения

---

- геометрия: сферическое приближение, 100-300 зон по радиусу
- спектр: ок. 100 групп по частоте (обычно)
- непрозрачность: 150 тыс. линий (список Истмана), расчет по Соболеву
- уравнение состояния: ЛТР (  $T, \rho, X_i$  )
- перенос излучения: решение нерелятив. кин. ур. Больцмана в моментном приближении, замыкание системы уравнений через эддингтоновские факторы.

# Кинетическое уравнение Больцмана

---

$$\frac{1}{c} \frac{\partial f}{\partial t} + \mu \frac{\partial f}{\partial r} + \frac{1 - \mu^2}{r} \left( 1 - \frac{Q\mu v}{c} \right) \frac{\partial f}{\partial \mu} - \frac{v(1 + Q\mu^2)\nu}{cr} \frac{\partial f}{\partial \nu} = \eta_\nu - \chi_\nu f$$

$f \equiv f(t, r, \mu, \nu)$  – числа заполнения для фотонов

$$(\ast \ast \ast) = -\chi^{\text{tot}} f + \chi^{\text{abs}} b_\nu + \chi^{\text{scat}} f,$$

$\chi^{\text{abs}}$  - коэффициент истинного поглощения

$\chi^{\text{scat}}$  - коэффициент томсоновского рассеяния

$$\chi^{\text{tot}} = \chi_\nu^{\text{abs}} + \chi_\nu^{\text{scat}}$$

# Кинетическое уравнение Больцмана

---

$$\frac{1}{c} \frac{\partial f}{\partial t} + \mu \frac{\partial f}{\partial r} + \frac{1 - \mu^2}{r} \left( 1 - \frac{Q\mu\nu}{c} \right) \frac{\partial f}{\partial \mu} - \frac{v(1 + Q\mu^2)\nu}{cr} \frac{\partial f}{\partial \nu} = \eta_\nu - \chi_\nu f$$

$f \equiv f(t, r, \mu, \nu)$  – числа заполнения для фотонов

$$(*) = -\chi_k^{\text{tot}} f_k + \chi_k^{\text{abs}} b_k + \chi_e^{\text{scat}} f + \chi_{kk'}^{\text{fluor}} f_{k'},$$

$\chi^{\text{abs}}$  - коэффициент истинного поглощения

$\chi^{\text{scat}}$  - коэффициент рассеяния

$$\chi^{\text{tot}} = \chi_\nu^{\text{abs}} + \chi_\nu^{\text{scat}} + \chi_{kk'}^{\text{fluor}}$$

$\chi_{kk'}^{\text{fluor}}$  - коэффициент флуоресцентного поглощения

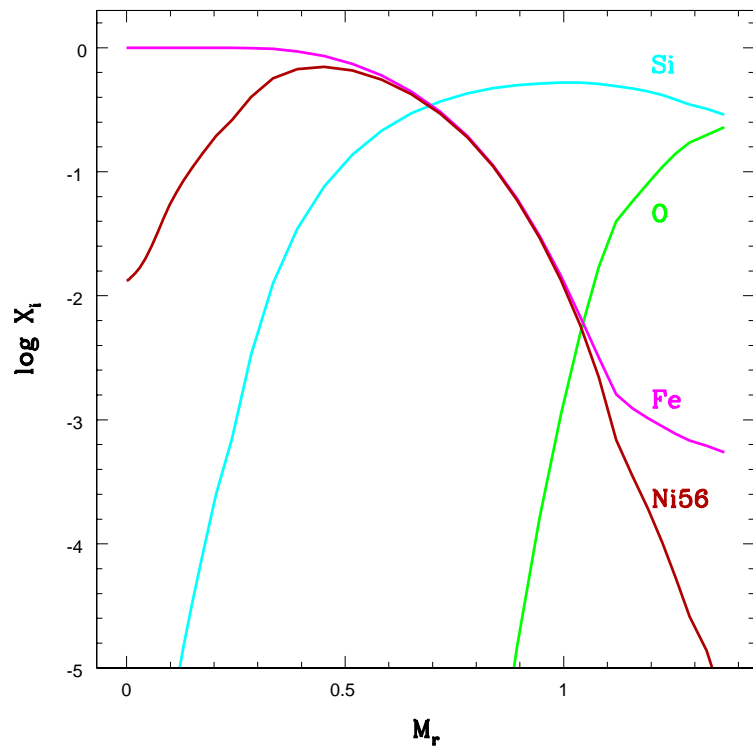
# Флуоресценция

Pinto, Eastman 2000

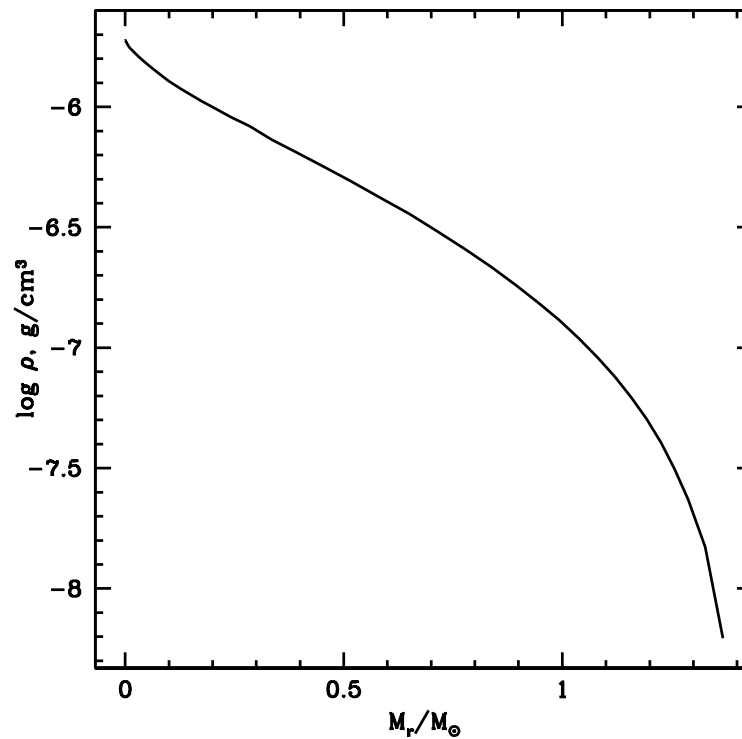
$$\begin{aligned}\chi_{\text{tot}}^k &= \chi_{\text{abs}}^k + \chi_{\text{split}}^k + \chi_{\text{scat}}^k = \frac{\nu}{\Delta\nu} \frac{\partial\beta}{\partial r} \sum_{(\forall\{u,l\} \in (\nu_k, \nu_k + \Delta\nu))} [1 - e^{-\tau_{u,l}}] \\ \chi_{\text{abs}}^k &= \frac{\nu}{\Delta\nu} \frac{\partial\beta}{\partial r} \sum_{(\forall\{u,l\} \in (\nu_k, \nu_k + \Delta\nu))} [1 - e^{-\tau_{u,l}}] \epsilon_{u,l} \\ \chi_{\text{fluor}}^{k,k'} &= \frac{\nu}{\Delta\nu} \frac{\partial\beta}{\partial r} \sum_{(\forall\{u,l\} \in (\nu_k, \nu_k + \Delta\nu))} \left[ (1 - e^{-\tau_{u,l}}) (1 - \epsilon_{u,l}) \sum_{(\forall\{u,l'\} \in (\nu'_k, \nu'_k + \Delta\nu))} b_{u,l'} \right] \\ \chi_{\text{scat}}^k &= \chi_{\text{fluor}}^{k,k} \\ \tau_{u,l} &= \frac{hc}{4\pi} \frac{(n_l B_{l,u} - n_u B_{u,l})}{|\partial\nu/\partial r|}, p_{ul} = \frac{1 - e^{-\tau_{ul}}}{\tau_{ul}}, b_{u,l} = \frac{p_{u,l} A_{u,l}}{\sum_l p_{u,l} A_{u,l}}\end{aligned}$$



# Предсверхновая SN Ia, модель: m030307m

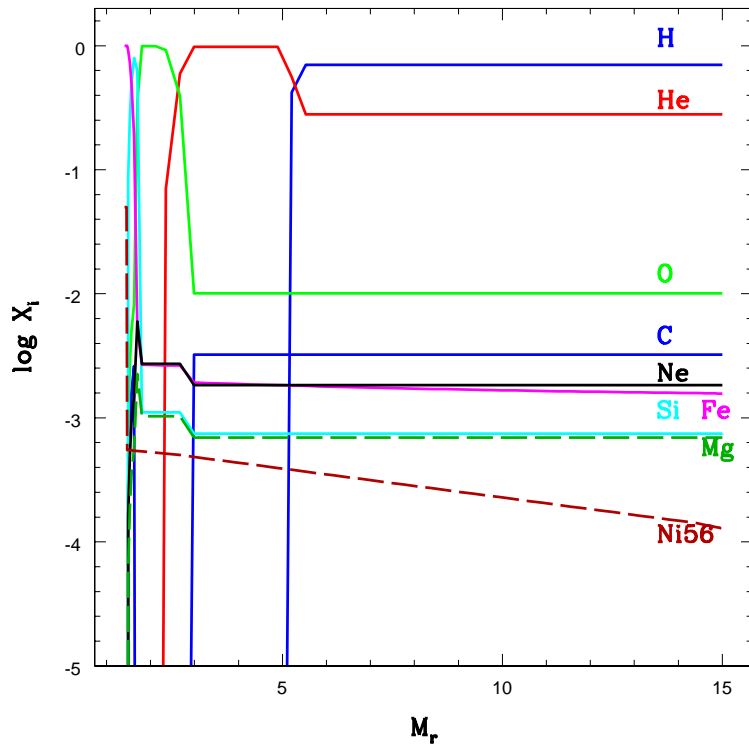


Химический состав

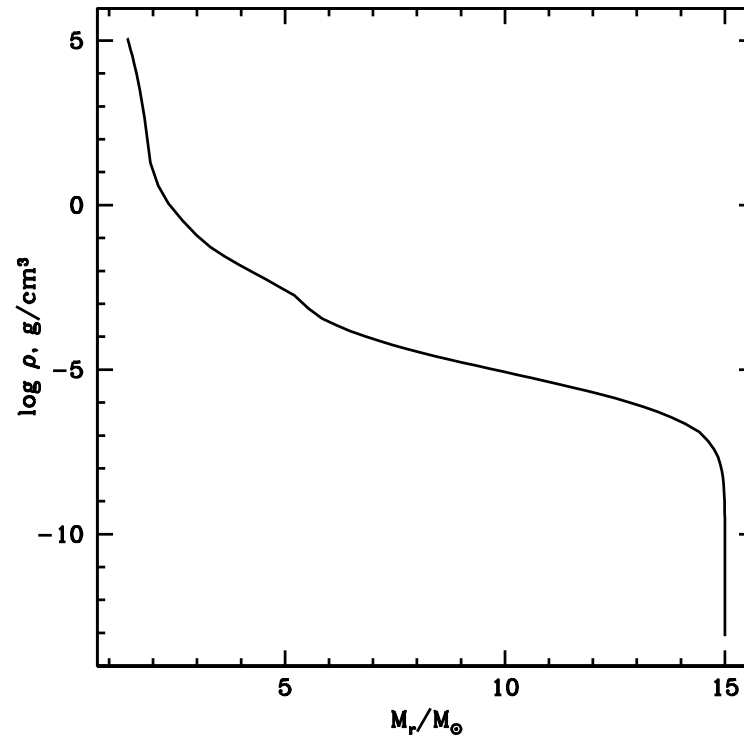


Плотность

# Предсверхновая SN IIр, модель: cat\_R500\_M15\_Ni004\_E7

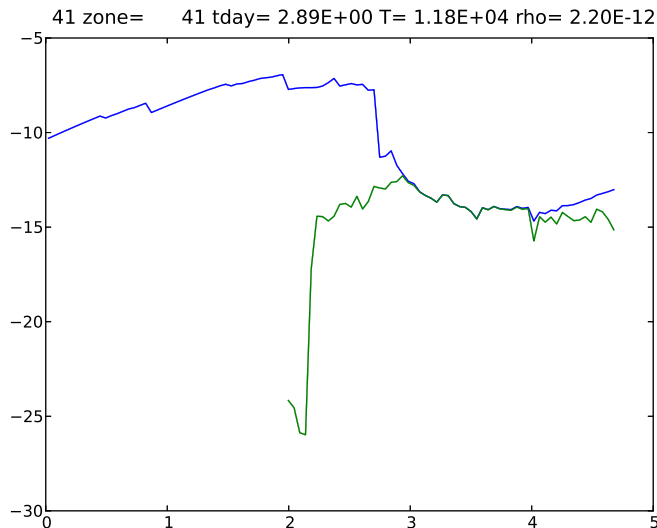
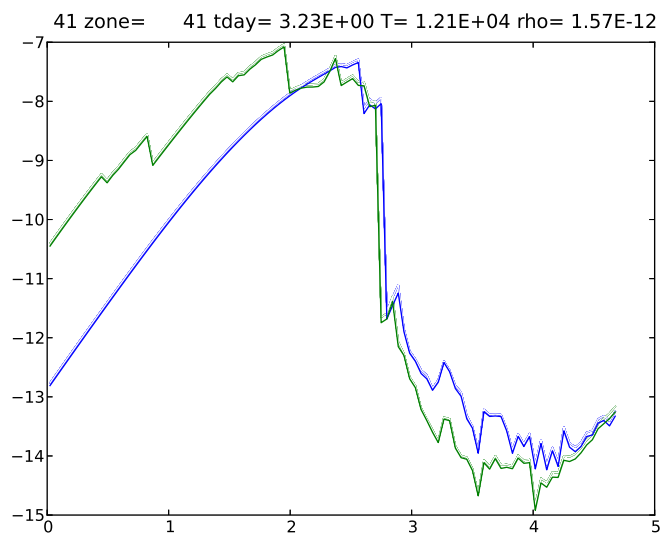


Химический состав



Плотность

# Непрозрачность, модель: m030307m



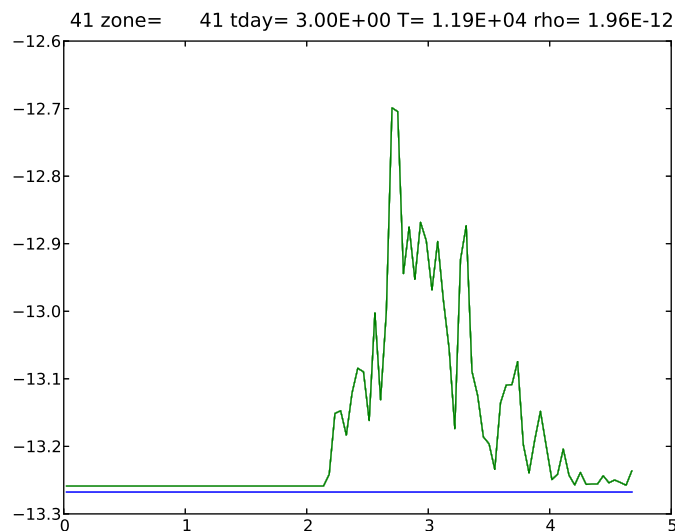
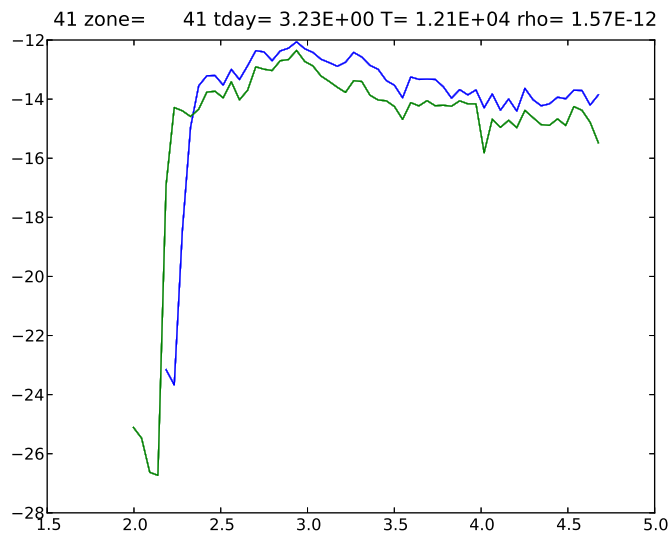
Полная непрозрачность:  $bb + bf + ff$ .

С

Полная и  $bb$ -непрозрачность, синяя и зеленая соответственно.

Зона 41, 3 день

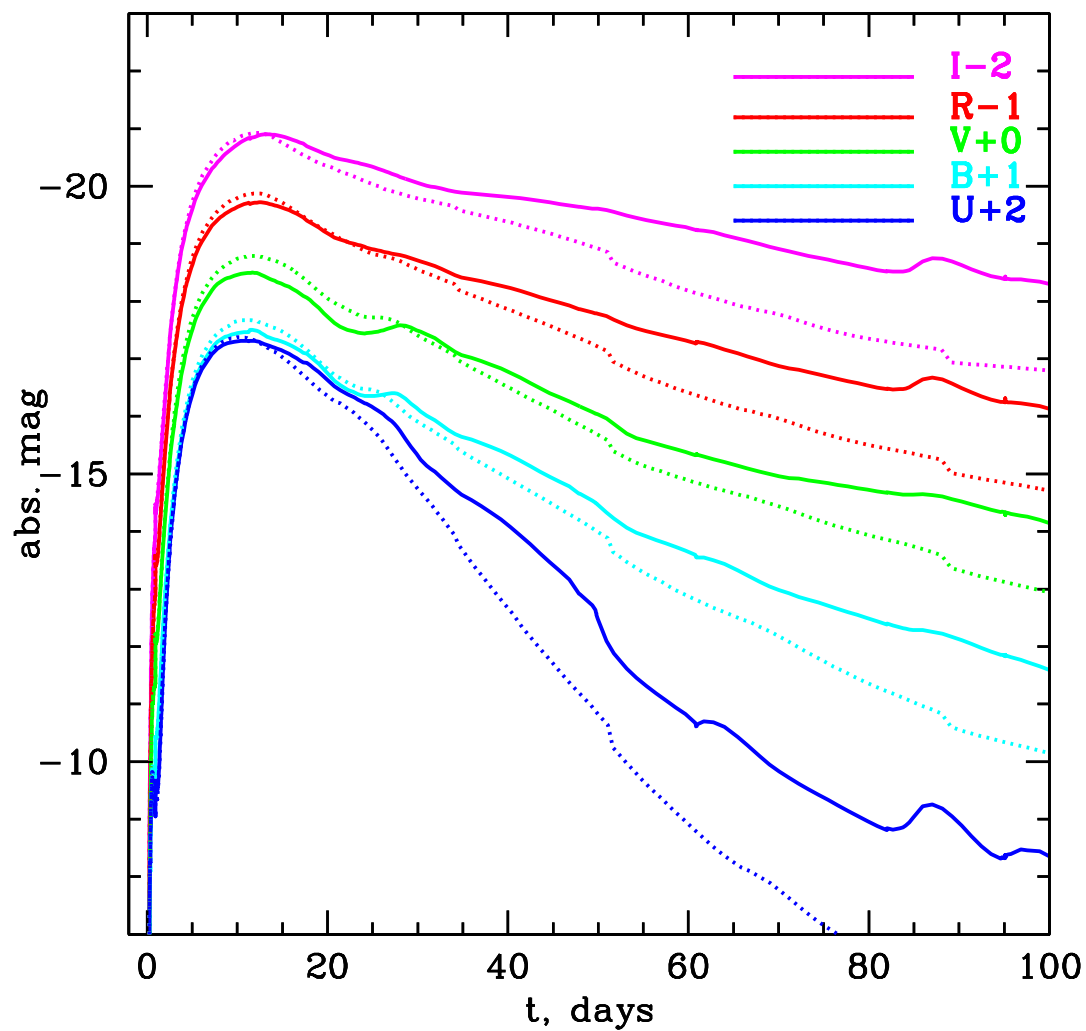
# Непрозрачность, модель: m030307m



Непрозрачность при расширении:  
старый расчет (синяя) и расчет с учетом рассеяния в линиях (зеленая)

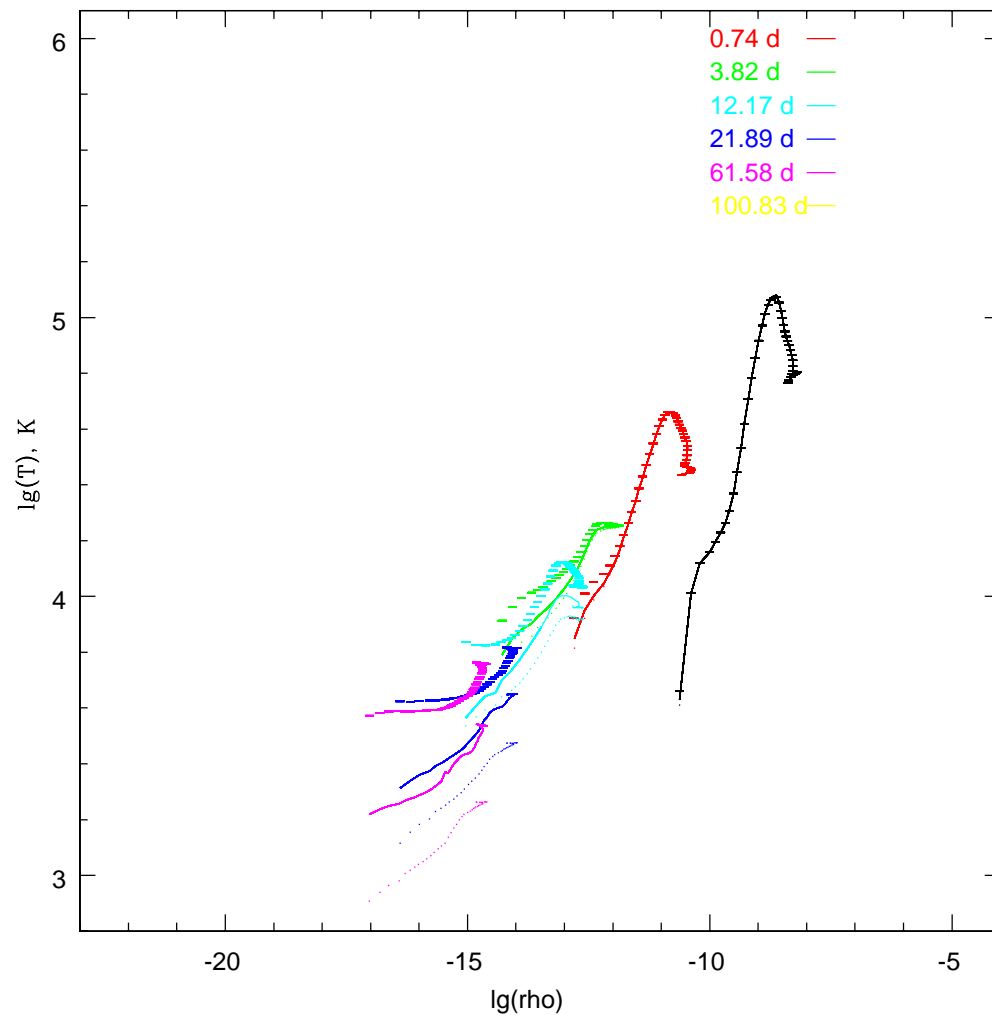
Томсоновское рассеяние (синяя),  
+ рассеяние в линиях (зеленая)

# UBVRI кривые блеска, модель: m030307m



Влияние рассеяния в линиях  
на модельную кривую блеска  
СН Ia. ЛТР расчет.

# Диаграмма $\lg(T)$ - $\lg(\rho)$ , модель: m030307m



Эволюция  $\lg(T)$ - $\lg(\rho)$ . ЛТР расчет. Штрихи отмечают радиационную температуру  $T_{rad}$ .

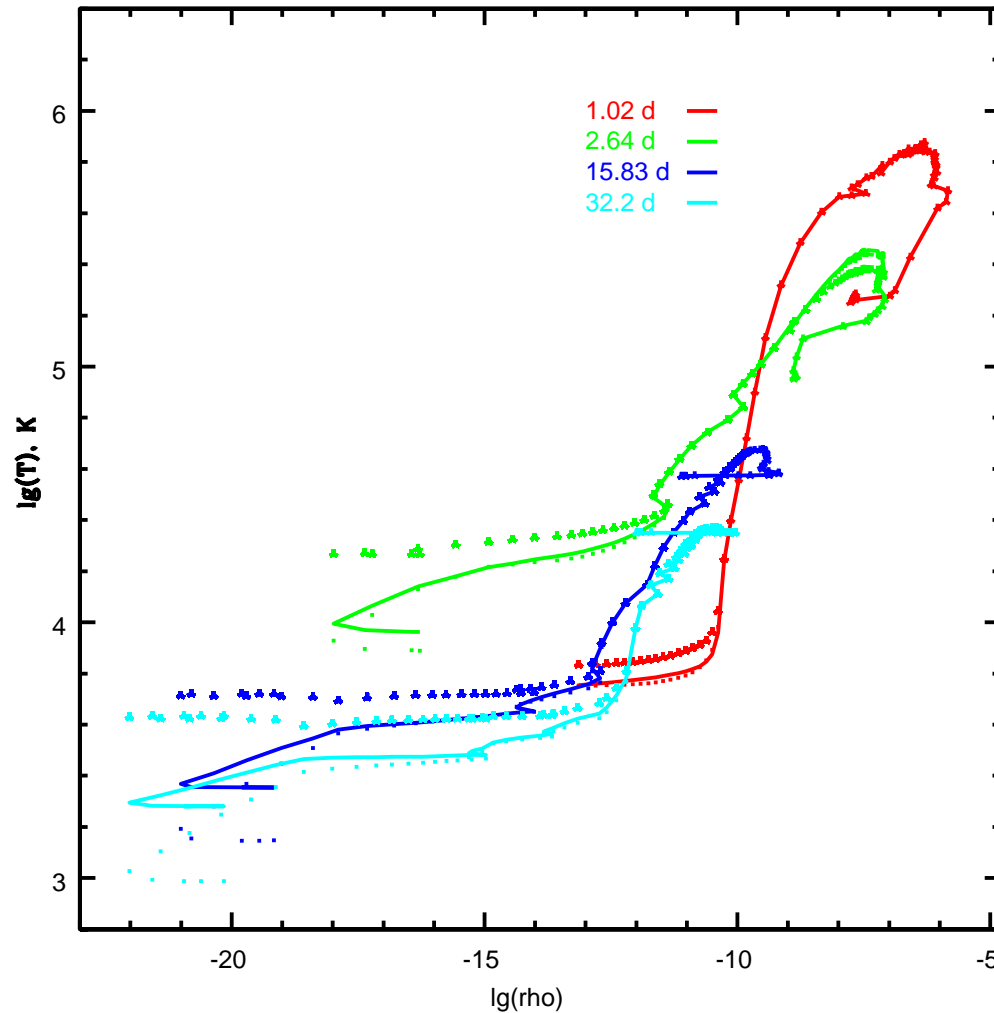
Для заданного  $t$ , каждая точка на  $(T, \rho)$  кривой соответствует некоторому значению массовой лагранжевой координате, меняющейся от  $6 \times 10^{-6} M_{\odot}$  до  $1.37 M_{\odot}$

Диапазон:

$$\rho < 10^{-10} g cm^{-3};$$

$$T < 4 \times 10^4 K$$

# Диаграмма $\lg(T)$ - $\lg(\rho)$ , модель: cat\_R500\_M15\_Ni004\_E7



Эволюция  $\lg(T)$ - $\lg(\rho)$ . ЛТР расчет. Штрихи отмечают радиационную температуру  $T_{rad}$ .

Для заданного  $t$ , каждая точка на  $(T, \rho)$  кривой соответствует некоторому значению массовой лагранжевой координате, меняющейся от  $1.4 M_{\odot}$  до  $15 M_{\odot}$

Диапазон:

$$\rho < 10^{-10} g cm^{-3};$$

$$T < 4 \times 10^4 K$$

# Сравнение скоростей ударных и радиационных процессов - 1

---

Скорость фотоионизации:

$$R_c^{ij} = 4\pi \int_{\nu_{th}^{ij}}^{\infty} \alpha_{ph}^{ij} \frac{J_\nu}{h\nu} d\nu ,$$

$\nu_{th}^{ij}$  - порог ионизации,  $J_\nu$  - интенсивность излучения,  $\alpha_{ph}^{ij}$  - сечение фотоионизации.

Ударная ионизация:

$$C_c^{ij} = n_e \langle \sigma v \rangle = n_e \int_{v_{th}^{ij}}^{\infty} \sigma^{ij}(v) f(v) v dv$$

$\sigma^{ij}$  - сечение ударной ионизации.



## Сравнение скоростей ударных и радиационных процессов - 2

---

$T, K$	H I	He I	Fe I
$3.5 \cdot 10^3$	$3.6 \times 10^{-9}$	$< 10^{-20}$	$9.2 \times 10^{-8}$
$1.2 \cdot 10^4$	$7.6 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-4}$	$3.3 \times 10^{-8}$
$4.0 \cdot 10^4$	$5.0 \times 10^{-3}$	$3.2 \times 10^{-4}$	$1. \times 10^{-1}$

$\frac{C_i^{jc}}{R_i^{jc}}$  вычисленно для H I, He I, FeI на основном уровне при  $\rho = 10^{-9} \frac{\text{г}}{\text{см}^{-3}}$  и  $T = 3.5 \cdot 10^3, 1.2 \cdot 10^4, 4 \cdot 10^4$  К.

# не-ЛТР: модифицированное небулярное приближение

Lucy (1999)

Формула для возбуждения уровней:

$$\frac{n_i^{ju}}{n_i^{jl}} = W \frac{g_i^{ju}}{g_i^{jl}} e^{-\frac{h\nu_{ul}}{kT_{rad}}}$$

Формула для расчета ионизации:

$$\frac{N_i^{j+1} n_e}{N_i^j} = \eta W \frac{2U_i^{j+1}}{U_i^j} \frac{(2\pi m_e k T_{rad})^{3/2}}{h^3} \left( \frac{T_e}{T_{rad}} \right)^{1/2} e^{-\frac{\chi_j^i}{kT_{rad}}}$$

where

$W$  - фактор дилуции

$$T_{rad} = \frac{h\langle\nu\rangle}{kx}, \quad \langle\nu\rangle \equiv \frac{\int_0^\infty \nu J_\nu d\nu}{\int_0^\infty J_\nu d\nu}, \quad x \equiv \frac{\int_0^\infty \frac{y^3 dy}{e^y - 1}}{\int_0^\infty \frac{y^2 dy}{e^y - 1}} \approx 3.8324$$

$T_e$  - электронная температура

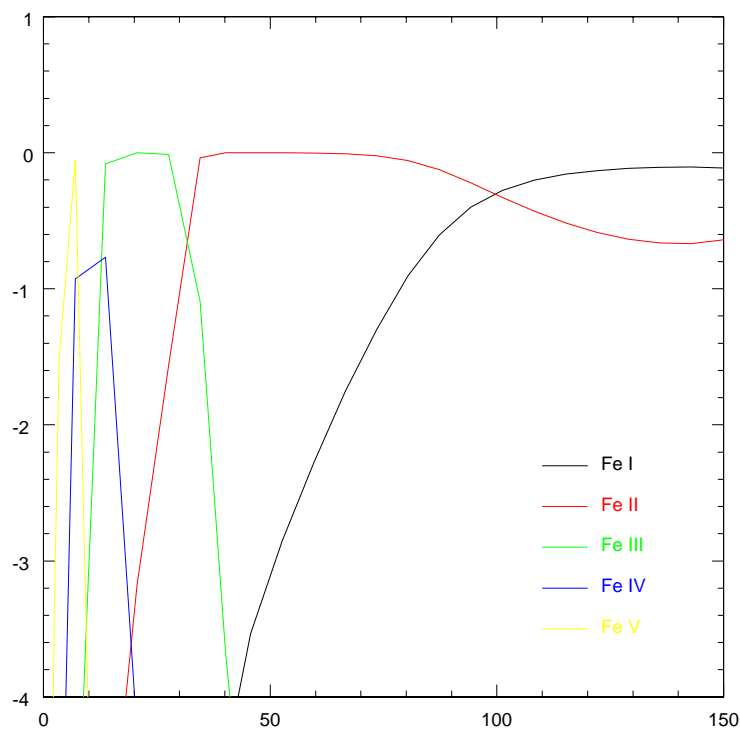
$$W = \frac{\pi\langle J \rangle}{\sigma T_{rad}^4}$$

$$T_J = W^{1/4} T_{rad}$$

$\eta = \zeta + W(1 - \zeta)$ ,  $\zeta$  - доля рекомбинаций, идущих на основной уровень

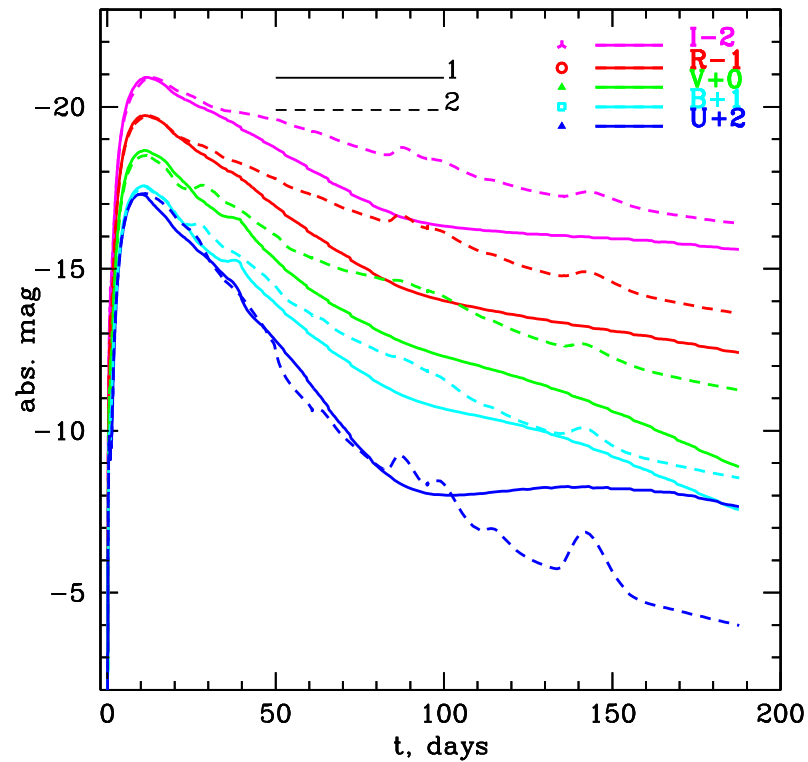
# Ионизация Fe: LTE VS NLTE, модель: m030307m

Fe Fe



Эволюция ионизационной структуры на срезе скорости 8200 км/с (зона 29, 0.5 M)

# UBVRI кривые блеска, модель: m030307m



Сравнение не-ЛТР (сплошная) и ЛТР (штрих) UBVRI кривых блеска для модели m030307m

# Заключение

---

- Флуоресценция в оболочках сверхновых существенно влияет на спектр выходящего излучения
- Можно использовать модифицированное небулярное приближение для учета влияния неравновесного излучения на ур. состояния
- Интересно применить результаты к реальным сверхновым...

---

Проявление не-ЛТР эффектов на  
кривых блеска сверхновых:  
влияние неравновесного излучения  
на уравнение состояния вещества  
и учет рассеяния в линиях

П.Бакланов, С.Блинников

[baklanovp@gmail.com](mailto:baklanovp@gmail.com)

ITER

# STELLA VS others

---

- S.Blinnikov, P.Baklanov, etc: Stella [RadHydro, LTE+NLTE, 1D, Eq ]
- L.Lucy, P.Mazzali [None RadHydro, NLTE, Spectrum, 3D, MC]
- S. Sim, M.Kromer: Nero, ARTIS [None RadHydro, NLTE, Spectrum, 3D, MC]
- J.Hillier, L. Dessart: code CMFGEN [RadHydro?,NLTE,1D,Eq]
- P.Hauschildt, E.Baron: Phoenix [None RadHydro, NLTE, Spectrum, MC]
- R.Eastman: code Eddington [None RadHydro, 1D, Eq]
- D.Sauer, Pauldrach: code WM-basic [None RadHydro, NLTE, Spectrum, Eq]
- Kasen: SEDONA [None RadHydro, NLTE, Spectrum, 3D, MC]
- Fisher: SYNOW [None RadHydro, LTE, Spectrum, 1D, Eq]
- M.Pumo,L.Zampieri [None RadHydro, LTE, Grey Ath, TOPS, 1D, Eq ]
- P.Utrobin [RadHydro, Grey Ath, NLTE+LTE, 1D, Eq ]
- S.Woosley: code Kepler [Nuc.syn.,RadHydro, Trad, NLTE,1D,Eq]
- D.Whalen, C.Fryer: RAGE [RadHydro, TOPS, LTE, 3D, Eq ]