

Космография по SN II

Пётр Бакланов, С.И. Блинников, М.Ш. Поташов

ИТЭФ

4 марта 2014

Содержание

- ▶ Фотометрическое расстояние
- ▶ Метод расширяющихся фотосфер для SN IIp (Expanding Photosphere Method, EPM)
- ▶ Метод плотного слоя для SN IIn (Dense Shell Method, DSM)
- ▶ Устойчивость DSM к уравнению состояния: ЛТР VS неЛТР
- ▶ Аппробация DSM: 3 примера
- ▶ Флюоресценция (дополнение)

Стандартная свеча и линейка



(Credit: NASA/JPL-Caltech)

Фотометрическое расстояние

Определение

По определению **фотометрическое расстояние** это

$$d_L^2 = \frac{L_\nu}{4\pi 10^{0.4 A_\nu} F_\nu} ,$$

где L_ν - абсолютная светимость источника, F_ν - зарегистрированный наблюдателем поток, A_ν - межзвездное поглощение.

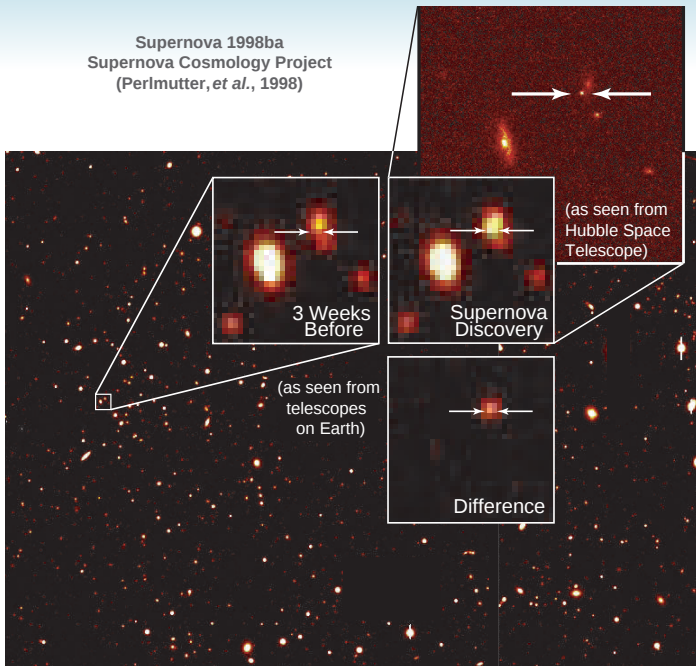
Космология

Зависимость между красным смещением (z) и d_L определяется космологической моделью:

$$d_L(z)(\Omega_m, \Omega_{DE}, w(z))|_{\text{theory}}$$

Наблюдения дают $d_L(z)(\text{observed})$, из которых мы можем получить параметры модели $\Omega_m, \Omega_{DE}, w(z)$, и т.п.

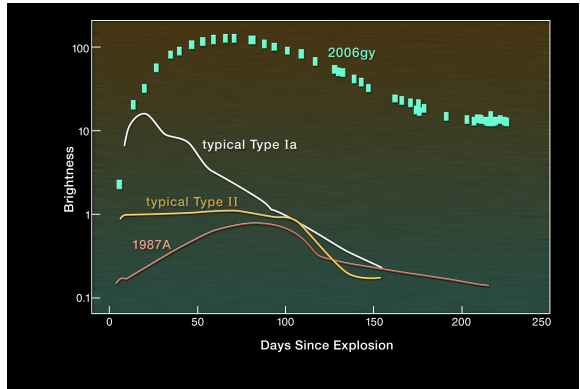
Supernova 1998ba
Supernova Cosmology Project
(Perlmutter, et al., 1998)



Измерительные инструменты для космологии

Методы:

- ▶ **SN Ia** - основной инструмент, “стандартная свеча”
- ▶ **SN IIp** - прямой геометрический метод расширяющихся фотосфер
- ▶ **SN IIн** - новый прямой геометрический метод плотного слоя



(Credit: NASA/CXC/UC Berkeley/N.Smith et al.)

SN Ia: успех метода

Нобелевская премия по физике за 2011 год

"for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae".

Adam Riess

Riess, Adam G., et al.

Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant.

The Astronomical Journal,
116(3), (1998).

Saul Perlmutter

Perlmutter, Saul, et al.

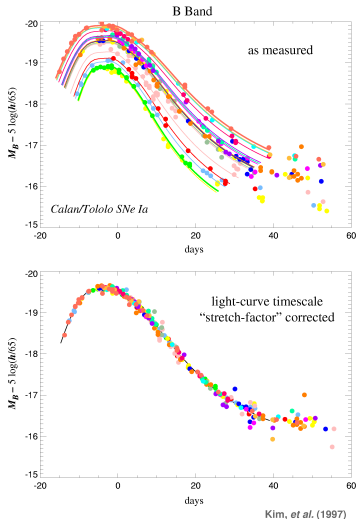
Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae

The Astrophysical Journal,
517(2), (1999).

SN Ia: стандартная свеча

Требования

- ▶ Кривые блеска близки по светимости и похожи по форме
- ▶ Процедура стандартизации светимости - соотношение PP между шириной максимума кривой блеска и его амплитудой
- ▶ Необходим большой набор SN Ia с измеренным независимым способом расстоянием
- ▶ Вторичный измерительный инструмент



(Credit: SCP, <http://panisse.lbl.gov/public/>)

SN Ia: стандартная свеча

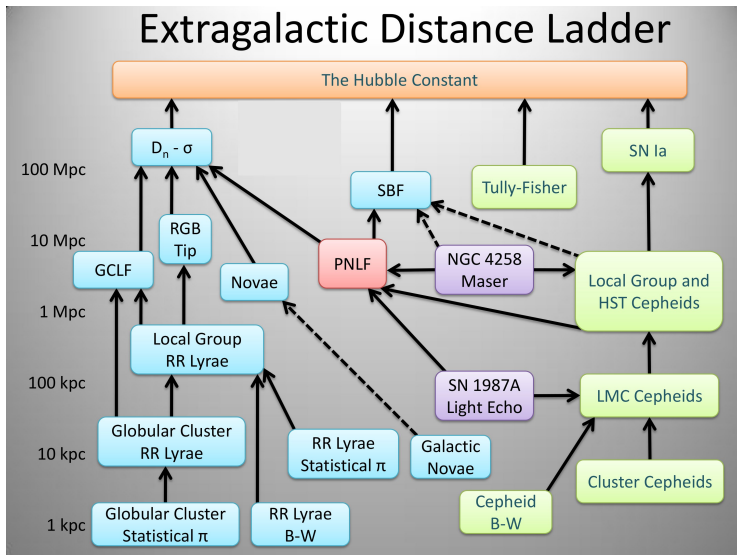
Требования

- ▶ Кривые блеска близки по светимости и похожи по форме
- ▶ Процедура стандартизации светимости - соотношение RR между шириной максимума кривой блеска и его амплитудой
- ▶ Необходим большой набор SN Ia с измеренным независимым способом расстоянием
- ▶ Вторичный измерительный инструмент

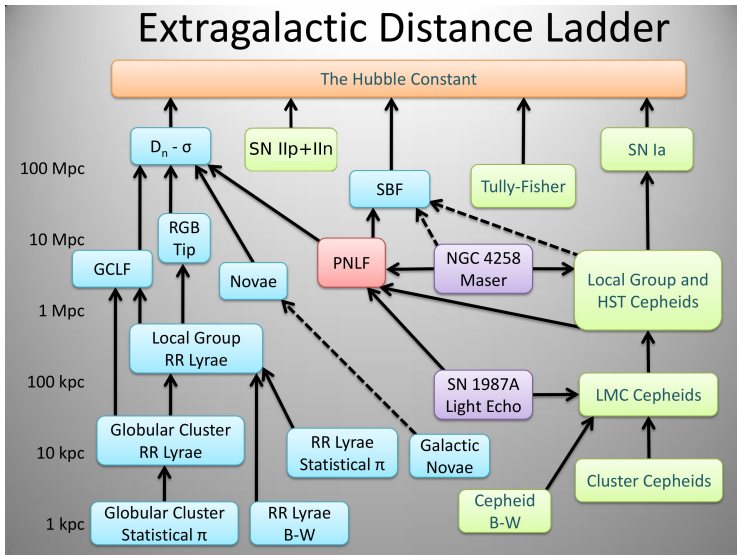
Псковский Юрий Павлович, ГАИШ



Шкала расстояний



Шкала расстояний

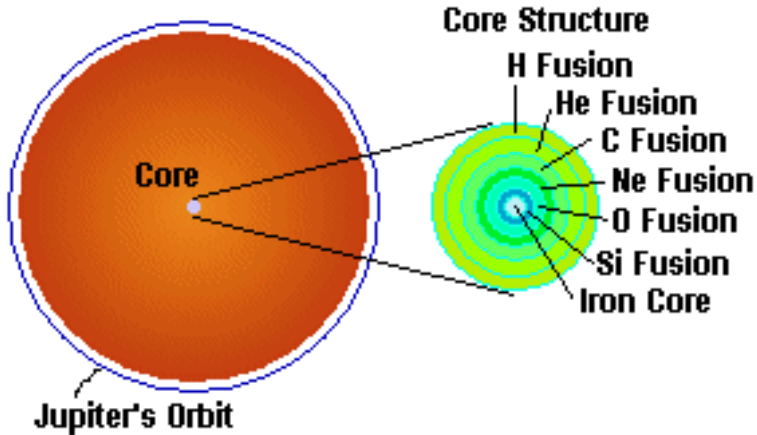


SN IIp + SN IIn

Методы:

- ▶ **SN IIp** — прямой геометрический метод расширяющихся фотосфер
Expanding Photosphere Method (EPM)
- ▶ **SN IIn** - новый прямой геометрический метод плотного слоя
Dense Shell Method (DSM)

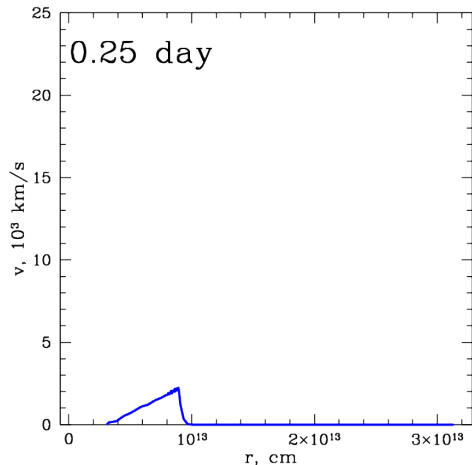
SN IIp: структура



(Credit <http://www.uni.edu/morgans/astro/course/Notes/section2/new9.html>)

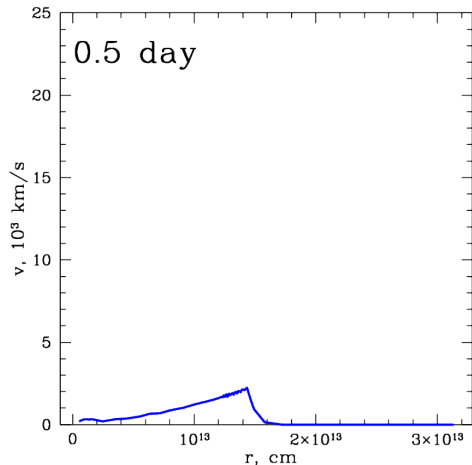
SN IIP: ударная волна разгоняет вещество оболочки

SN 1999em: Профиль скорости v по радиусу оболочки



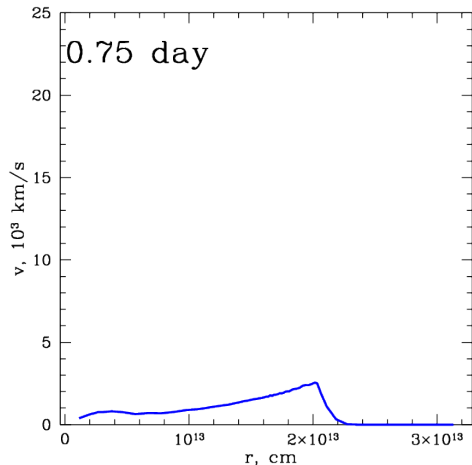
SN Iip: ударная волна разгоняет вещество оболочки

SN 1999em: Профиль скорости v по радиусу оболочки



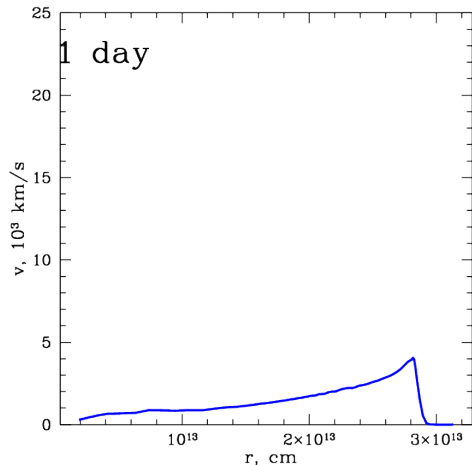
SN IIP: ударная волна разгоняет вещество оболочки

SN 1999em: Профиль скорости v по радиусу оболочки



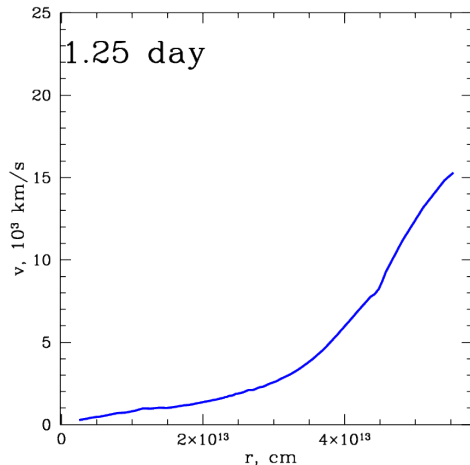
SN IIP: ударная волна разгоняет вещество оболочки

SN 1999em: Профиль скорости v по радиусу оболочки



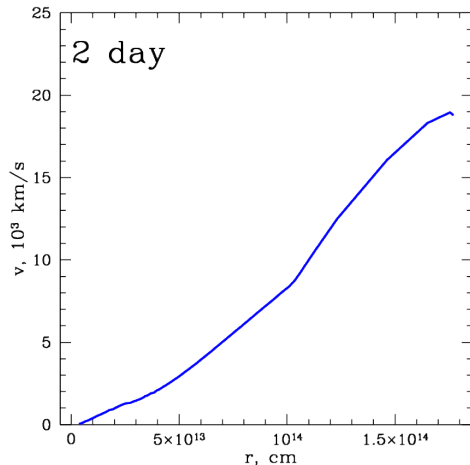
SN Iip: ударная волна разгоняет вещество оболочки

SN 1999em: Профиль скорости v по радиусу оболочки



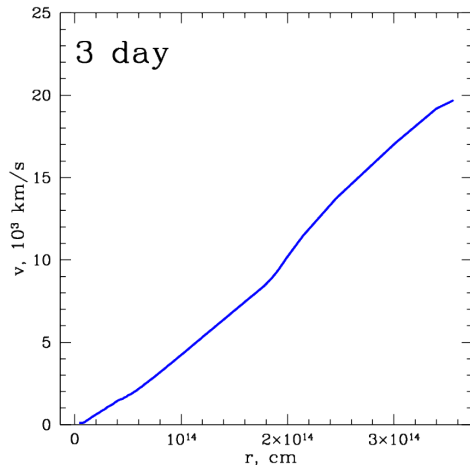
SN IIP: ударная волна разгоняет вещество оболочки

SN 1999em: Профиль скорости v по радиусу оболочки



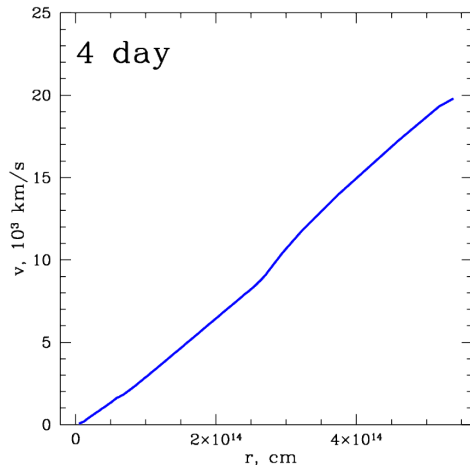
SN IIP: ударная волна разгоняет вещество оболочки

SN 1999em: Профиль скорости v по радиусу оболочки



SN IIP: ударная волна разгоняет вещество оболочки

SN 1999em: Профиль скорости v по радиусу оболочки



Истинная фотосфера

Фотометрическое расстояние

$$d_L = \sqrt{\frac{L_\nu}{4\pi F_\nu(d_L)}}$$

С фотосферой R_{ph}

$$L_\nu = 4\pi R_{ph}^2 F_\nu(R_{ph}),$$

где R_{ph} - радиус фотосферы

$$d_L = R_{ph} \sqrt{\frac{F_\nu(R_{ph})}{F_\nu(d_L)}}$$

Угловой размер звезды θ :

$$\theta = \frac{R_{ph}}{d_L} = \sqrt{\frac{F_\nu(d_L)}{F_\nu(R_{ph})}}. \quad (1)$$



BW: Из известных $F_\nu(d_L)$ и $F_\nu(R_{ph}) \Rightarrow \theta$.

Если R_{ph} можно измерить, то из (1) можно вычислить расстояние d_L .

SN IIp: Метод Расширяющихся фотосфер

Baade(1926) – Wesselink(1946) – Kirshner & Kwan (1974).
(Expanding Photosphere Method, EPM)

Используя слабые линии, можно померить скорость вещества на уровне фотосферы u и вычислить R_{ph} :

$$R_{ph} = u(t - t_0) + R_0 ,$$

где t_0 - момент взрыва, R_0 - начальный радиус предсверхновой.
Тоже самое, но через $\theta = \frac{R_{ph}}{d_L}$:

$$t_i = d_L \frac{\theta_i}{u_i} + t_0$$

SN IIp: Метод Расширяющихся фотосфер

Baade(1926) – Wesselink(1946) – Kirshner & Kwan (1974).
(Expanding Photosphere Method, EPM)

Метод EPM использует предположение о дилутированном чернотельном спектре:

$$F_{\nu}(R_{\text{ph}}) = \zeta^2 \pi B_{\nu}(T_c),$$

где ζ – корректирующий коэффициент(фактор дилуции), T_c – цветовая температура (из наблюдений)

Фактор дилуции находится из моделирования сверхновых:

$J = \int_0^{\infty} J_{\nu} d\nu$ - модельный нулевой момент интенсивности

$T_c = \frac{h \langle \nu \rangle}{kx}$, $x \approx 3.8324$ (для черного тела)

$$\langle \nu \rangle \equiv \int_0^{\infty} \nu J_{\nu} d\nu / J$$

$$\zeta = \frac{\pi J}{\sigma T_c^4}$$

ЕРМ: корреляционная зависимость

Eastman R. G. etc 1996

На основе 60-ти
радиационно-гидродинамических
моделей построена корреляция
между $\zeta - T_{color}$

Полученная зависимость
позволяет без сложных расчётов,
имея только наблюдения,
вычислить фактор ζ .

Метод ЕРМ доступен для
массового применения.

Корреляция $\zeta - T_{color}$

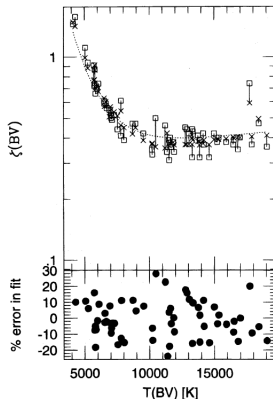


FIG. 34.—*Top*: Distance correction factors for the bandpass combination $S = \{BV\}$, vs. BV color temperature. The squares are the model results from Table 4. Crosses connected to squares by solid lines show the value of ζ_{BV} computed by fitting eq. (4.4) to the values of Table 4. Dashed line shows the derived temperature variation, $\pi(T_{BV})$, which is a second-order polynomial (vertically scaled). *Bottom*: Difference between computed and fit value of ζ_{BV} , in percent.

ЕРМ: успех метода

Методом ЕРМ получены независимые оценки на постоянную Хаббла H_0 .

$$H_0 = 73 \pm 6 \text{ km/s/Mpc}$$

Schmidt, Brian P., et al.

The distances to five Type II supernovae using the expanding photosphere method, and the value of H_0

The Astrophysical Journal 432
(1994): 42-48.

$\zeta - T_{color}$ correlation

Дали теоретическое обоснование ЕРМ и подтвердили результат Schmidt

Eastman R. G., Schmidt B. P. and Kirshner R.

The Atmospheres of Type II Supernovae and the Expanding Photosphere Method

Astrophysical Journal v.466,
p.9116 (1996)

ЕРМ: разброс в расстояниях до SN 1999em

Прекрасно изученная SN 1999em в галактике NGC 1637.

Расстояние D до Sn 1999em: разница в 50%

Источник	D [Мпк]	Метод
Tully (1988)	8.9 ± 1.6	T-F
Sohn, Davidge (1998)	7.8 ± 1.0	TRGB
Hamuy et al. (2001)	8.2 ± 0.6	ЕРМ
Leonard et al. (2002a)	7.5 ± 0.5	ЕРМ
Nadyozhin (2003)	11.1 ± 2.2	Plateau-tail
Leonard et al. (2003)	11.7 ± 1.0	Cepheids
Elmhamdi et al. (2003)	7.8 ± 0.3	ЕРМ
Baron et al. (2004)	12.5 ± 1.8	SEAM
Dessart, Hillier (2006)	11.5 ± 1.0	ЕРМ
Saha et al. (2006)	12.0 ± 0.4	Cepheids
Jones et al. (2009)	9.3 ± 0.5 to 13.9 ± 1.4	ЕРМ
Tully (2009)	9.8 ± 1.6	T-F
Springob et al. (2009)	17.1 ± 3.0	T-F
Enriquez, J. E. (2010)	11.5 ± 1.0	ЕРМ

ЕРМ: сомнение в достоверности метода

Развитие ЕРМ — нет черному телу.

В методе воспроизведения спектров расширяющихся атмосфер (Spectral-fitting expanding atmosphere method, SEAM) в модели подгоняется весь наблюдаемый спектр.

Применяя SEAM Барон получил расстояние до SN 1999em

$$D = 12.5 \pm 1.8 \text{ Mpc.}$$

Baron, E., Nugent, P. E., Branch, D., Hauschildt, P. H.
Type IIP supernovae as cosmological probes: a spectral-fitting expanding atmosphere model distance to SN 1999em.

The Astrophysical Journal Letters, 616(2), L91, (2004).

Вопрос

$$d = \zeta R_{ph} \sqrt{\frac{\pi B_{\nu}(T_{color})}{F_{\nu}(observed)}}$$

Корректно ли применять ЕРМ без учета изменения дилуции при массовой оценке расстояния для разных сверхновых?

Ответ: **нет**

ЕРМ: корреляция $\zeta - T_c$ не выполняется

Наше исследование SN 1999em, расчёт
радиационно-гидродинамическим кодом STELLA

ζ для модели SN 1999em

Date (JD 2451000+)	ζ E96	ζ BB05
481.2	0.45	0.50
485.863	0.424	0.52
486.767	0.42	0.55
517.795	0.65	0.86
530.755	0.75	0.89
540.7	0.8	0.89
575.42	0.88	0.80

Расстояние до SN 1999em

Мы получили $d = 10.4 \pm 1$ Мпс,
что хорошо согласуется с SEAM!

Для каждой сверхновой надо
подбирать индивидуальную
модель (каталог сверхновых).

Наблюдения должны
максимально ограничивать
свободные параметры модели.

Baklanov, P. V., Blinnikov, S. I., Pavlyuk, N. N. (2005).
Parameters of the classical type-IIP supernova SN 1999em.
Astronomy Letters, 31(7), 429-441.

SN IIp + SN IIn

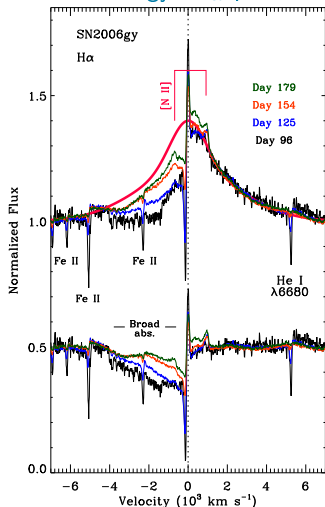
Методы:

- ▶ **SN IIp** — прямой геометрический метод расширяющихся фотосфер
Expanding Photosphere Method (EPM)
- ▶ **SN IIn** - новый прямой геометрический метод плотного слоя
Dense Shell Method (DSM)

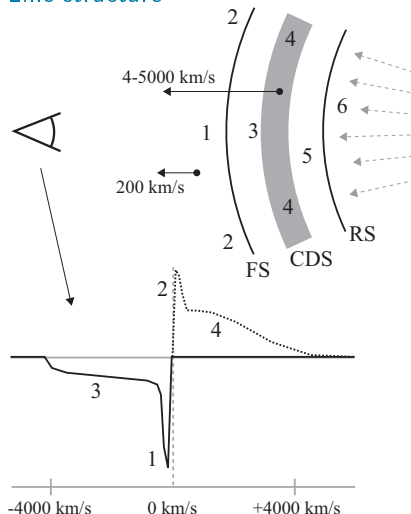
SN II_n— сверхновые с узкими (**narrow**) профилями линий

N.Smith et al., arXiv:0906.2200

SN 2006gy: H_{α} profile



Line structure



SN 2009ip- пример SN IIn

SN 2009ip

- ▶ Два всплеска с интервалом 1 месяц
- ▶ 1 всплеск: выброс массы порядка $1.5 M_{\odot}$
- ▶ 2 всплеск: сверхновая, ударная волна от которой бежит по веществу из первого выброса

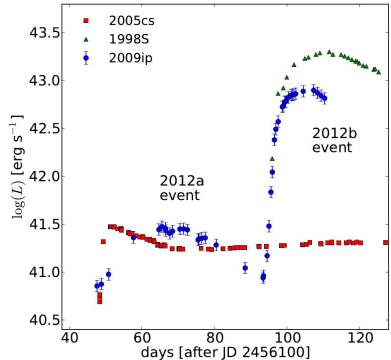


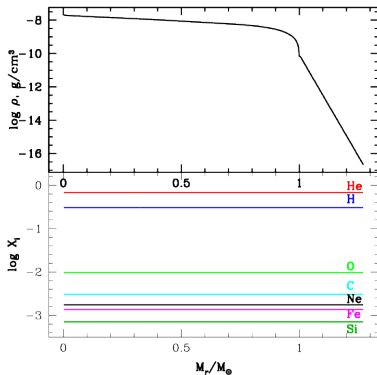
FIG. 4.— Bolometric light curve of SN 2009ip from August to October 2012 (showing both the 2012a and 2012b events), compared with the bolometric light curves of the faint type IIP SN 2005cs (Brown et al. [2007], Pastorello et al. [2006, 2009]) and the type IIn/IIL SN 1998S (Liu et al. [2000], Fassia et al. [2000], Gerardy et al. [2002], Pozzo et al. [2004]). The light curves of SNe 2005cs and 1998S are shown in an arbitrary temporal scale to well match respectively the 2012a and 2012b eruptive events of SN 2009ip.

(Credit: Pastorello, arxiv:1210.3568)

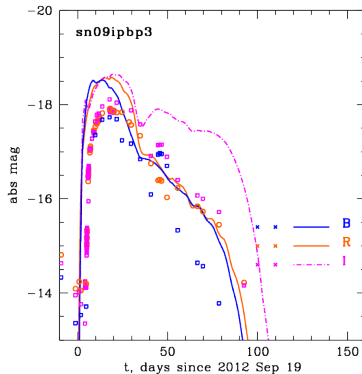
DSM: our simulations, model sn09ipbp3

The model presupernova star had $R_{env} = 700R_{\odot}$, $M_{env} = 1.3M_{\odot}$,
 $E_{burst} = 10^{51} \text{ erg}$

Density and composition



The light curves

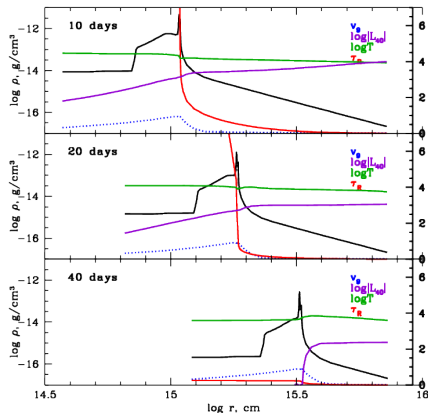


DSM: the formation of the Dense Shell (DS)

Shock wave

- ▶ The DS is moving along radius (density-black)
- ▶ The photosphere is glued to the DS (optical depth-red)
- ▶ Temperature is approximately constant (temperature-green)
- ▶ Thus Baade-Wesselink method can be applied at these conditions.

Evolution of model sn09ipbp3



SN IIn and Dense Shell Method (DSM): short introduction

The method of measuring cosmological distances based on supernovae of type IIn.

Sn IIn

- ▶ SNe IIn are one of the type of supernovae, which indicates the presence of narrow emission lines in the spectra.
- ▶ SNe IIn are one of the most powerful light sources in the Universe.
- ▶ SNe IIn have very bright the light curves for months.
- ▶ SNe IIn may be used as primary distance indicators.

Baade-Wesselink's idea

v_{ph} — Doppler shift

$$\Delta R_{ph} = \int_{t_1}^{t_2} v_{ph} dt$$

$$\theta = \frac{R_{ph}}{d_L} = \sqrt{\frac{F_\nu(d_L)}{F_\nu(R_{ph})}}.$$

Simple version of the DSM:

$$\begin{aligned} R(t_2) - R(t_1) &= v_{ph}(t_2 - t_1) \\ F_\nu(d_L) &= \pi \zeta^2 B_\nu(T_{color}) \end{aligned}$$

Papers

The method has been tested at the two famous supernova with the known distances to the host galaxies.

SN 2006gy

$$D_{host} = 71 Mpc$$

Our result:

$$D_{DSM} \approx 68_{-15}^{+19} Mpc$$

Blinnikov S., Potashov M.,
Baklanov P., Dolgov A.
*Direct determination of the
hubble parameter using type
IIa supernovae*
JETP, [arXiv: 1207.6914](#)

SN 2009ip

$$D_{host} = 20.4 Mpc$$

Our result:

$$D_{DSM} \approx 20.1 \pm 0.8 Mpc$$

Potashov M., Blinnikov S.,
Baklanov P., Dolgov A.
*Direct distance measurements
to SN 2009ip*
MNRAS, [arXiv: 1212.6893](#)

Nonequilibrium radiation field

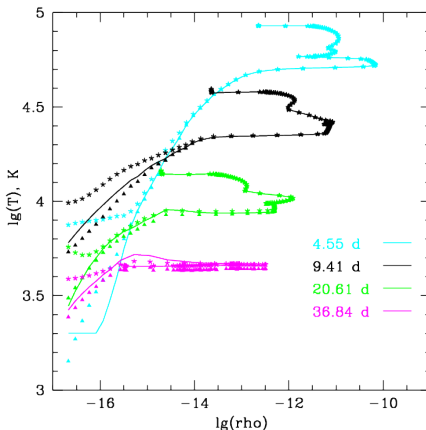
The conditions in the envelope

- Density: $\rho < 10^{-12} \text{ g/sm}^{-3}$
- Temperature: $T \approx 10^4 \text{ K}$
- $T_J < T < T_{color}$
($\sigma T_J^4 = \pi J \rightarrow \blacktriangle$,
 T_{color} – bb fit of $J_\nu \rightarrow *$)

We have the hot diluted radiation in the cold matter.

LTE conditions are not satisfied.

Model evolution: $\lg(T) - \lg(\rho)$



Equation of state

Using code Levels by Marat Potashov, we compute two variants of plasma state WITH/WITHOUT the collisional processes for the same initial conditions on density, chemical composition and temperature.

Non-LTE approach

Under these conditions the role of collisional processes can be neglected.

Ion populations $N_{ijk} [\text{cm}^{-3}]$, with collisional / no collisional	
H	
1.01	1.7161e+08 / 1.7735e+09
1.02	5.6416e+03 / 5.6815e+03
2.01	1.8353e+11 / 1.8193e+11
He	
1.01	1.0393e+11 / 1.0392e+11
2.01	2.5296e+07 / 2.5517e+07
C	
1.01	3.4388e+04 / 3.4085e+04
1.02	3.4781e+03 / 3.4475e+03
2.01	1.5254e+08 / 1.5254e+08
2.02	2.4570e+05 / 2.4570e+05
3.01	4.2105e+03 / 4.2474e+03
Fe	
1.01	1.8969e+00 / 1.8682e+00
2.01	1.7754e+06 / 1.7636e+06
2.02	1.1765e+06 / 1.1687e+06
3.01	1.1634e+07 / 1.1658e+07

Equation of state: Non-LTE approach

Modified nebular approximation, Lucy (1999)

Adopted excitation formula:

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

Adopted ionization formula:

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

T_e - electron temperature

$$T_{rad} = \frac{h\langle\nu\rangle}{kx}$$

$T_J^4 = \frac{\pi J}{\sigma}$ - effective temperature

$W = \frac{\pi J}{\sigma T_{rad}^4}$ - dilution factor

$$\langle\nu\rangle \equiv \int_0^\infty \nu J_\nu d\nu / J, \quad J \equiv \int_0^\infty J_\nu d\nu$$

$$\eta = \zeta + W(1 - \zeta)$$

ζ - fraction of recombinations going directly to the ground state

$$x \approx 3.8324$$

Model sn09ipbp3: Non-LTE calculation

Influence of Non-LTE

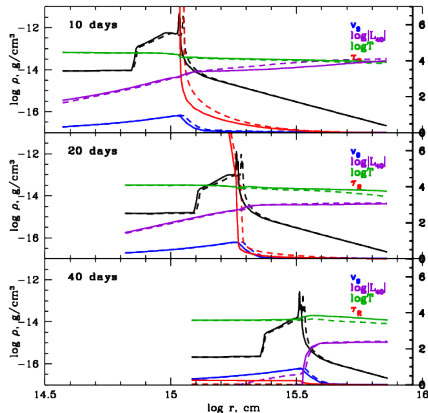
- ▶ The higher ionization makes it less transparent. τ shows more rapid growth.
- ▶ The higher opacity increases the radiative corrections in the equation for v .
- ▶ Velocity v has raised a little.
- ▶ The DS is shifted along the radius.

Stability of DSM

- ▶ Important dR , not absolute value R
- ▶ Temperature T , Luminosity L have not changed significantly

So DSM method works well with the simple assumptions.

LTE(solid) VS Non-LTE(dashed)



SN 2010jl: discovery

- ▶ Newton and Puckett discovered SN 2010jl on 2010 November 3.
- ▶ It exploded in the irregular galaxy UGC 5189A at a distance of **50 Mpc**
- ▶ Spectra on 2010 Nov 5 show that it is a Type **II_n** event [Benetti et al. 2010]
- ▶ Chandra have provided the first X-ray evidence of a supernova shock wave.
- ▶ The total V-band extinction was estimated to be $A_V = 0.084^m$ [Ofek et al. 2013]

SN 2010jl: A Supernova Cocoon Breakthrough



Chandra

<http://chandra.harvard.edu/photo/2012/sn2010>

SN 2010jl: optical light curves [fig.1 Ofek 2013]

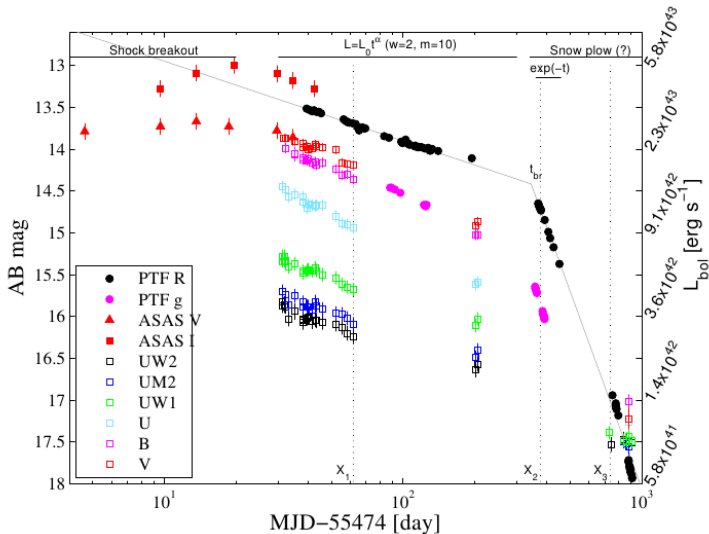


FIG. 1.— Optical light curves of SN 2010jl. The black filled circles and magenta filled circles represent the PTF measurements, which are based on image subtraction. In this case the uncertainties include the Poisson error and a 0.015 mag systematic error added in quadrature (Ofek et al. 2012a, 2012b). See the legend for ASAS and *Swift*-UVOT measurements. The gray lines show the best-fit broken power law to the PTF *R*-band data. The power-law index before (after) the break is -0.38 (-3.14). The power-law break is at day 344 (with respect to MJD 55474). The epochs of the *Chandra* and *NuSTAR*+*XMM* observations are marked by vertical dotted lines. The right-hand ordinate axis shows the bolometric luminosity for the PTF *R*-band data, assuming the bolometric correction is 0.27 mag. This is measured ~ 20 days prior to *I*-band maximum light. The three physical stages are indicated at the top of the plot. These are the shock breakout phase, the early power-law decay, and the snow-plow phase (see Fig. 1). Also shown is the section of the light curve which is fitted well by an exponential

SN 2010jl: DSM

The parameters of the observations
[Smith et al. 2010, Ofek et al. 2013]

- ▶ $t_1 = 10^d$ $F_V(t_1) = 13.7^m$ [fig. 1 Ofek]
- ▶ $t_2 = 14^d$ $F_V(t_2) = 13.6^m$ [fig. 1 Ofek]
- ▶ $T = 7000$ K [fig. 3 Ofek, fig. 2 Smith]
- ▶ $v_{ph} = 5.5 \times 10^8$ sm/c [fig. 12 Ofek]

DSM: blackbody approximation

Simple version of the DSM:

$$R(t_2) - R(t_1) = v_{ph}(t_2 - t_1)$$

$$F_\nu(d_L) = \pi B_\nu(T_{color})$$

$$\theta = \frac{R_{ph}}{d_L} = \sqrt{\frac{F_\nu(d_L)}{F_\nu(R_{ph})}}.$$

Result (preliminarily)

$$D_{DSM} = 49 \text{ Mpc (studies is underway)}$$

$$(D_{host} = 50 \text{ Mpc})$$

Fluorescence: prospects

In STELLA's radiation equations we use the invariant photon distribution function $f_\nu(r, \mu)$:

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

Total opacity:

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

and we use emission as

$$\eta_\nu = \chi_\nu^{\text{abs}} B_\nu(T) + \chi_\nu^{\text{scat}} J_\nu$$

No fluorescence, no re-emission in other frequency bands

Fluorescence

Replace $\nu \rightarrow k$ - number frequency group

$$\eta_k = \chi_k^{\text{abs}} B_{\nu_k} + \chi_k^{\text{scat}} J_{\nu_k} + \sum_{k'} \chi_{\text{fluor}}^{k',k} J_{\nu_{k'}}$$

$\chi_{\text{fluor}}^{k',k}$ - an analogue of the cascade matrix, it's show which part absorbed energy in k-group would be emitted in k'-group (see Pinto, Eastman (2000)).

Fluorescence: $\chi_{\text{fluor}}^{k',k}$

Summing all atomic transitions over the frequency bins we get $\chi_{\text{fluor}}^{k',k}$:

$$\chi_{\text{fluor}}^{k',k} = \frac{\nu}{\Delta\nu} \frac{\partial\beta}{\partial r} \sum_{(\forall\{u,l\} \in (\Delta\nu))} \left[(1 - e^{-\tau_{u,l}}) (1 - \epsilon_{u,l}) \sum_{(\forall\{u,l'\} \in (\nu'_k, \nu'_k + \Delta\nu))} b_{u,l'} \right]$$

Where: next slide

Fluorescence: $\chi_{\text{fluor}}^{k',k}$

$$\tau_{u,l} = \frac{hc (n_l B_{l,u} - n_u B_{u,l})}{4\pi |\partial v / \partial r|}$$

– Sobolev optical depth

$$p_{ul} = \frac{1 - e^{-\tau_{ul}}}{\tau_{ul}}$$

– escape probability for a photon emitted

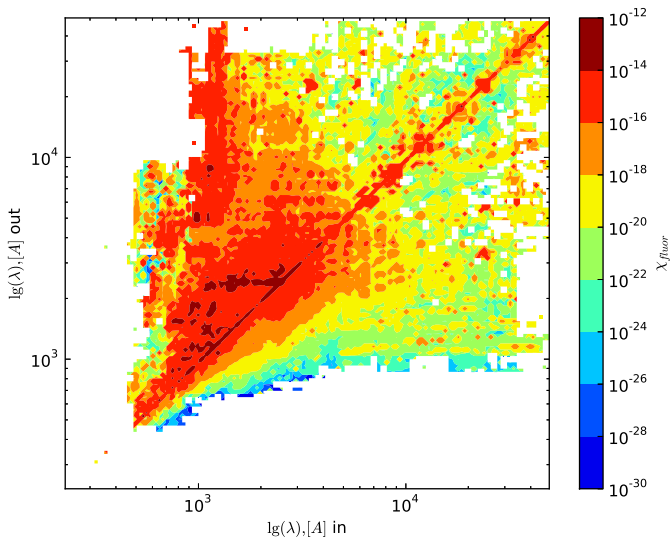
$$\epsilon_{u,l} = \frac{n_e \sum_l C_{u,l}}{n_e \sum_l C_{u,l} + \sum_l p_{u,l} A_{u,l}}$$

– the probability of de-excitation by electron impact

$$b_{u,l} = \frac{p_{u,l} A_{u,l}}{\sum_l p_{u,l} A_{u,l}}$$

– photon-emission probability

Fluorescence: $\chi_{\text{fluor}}^{k',k}$



Fluorescence: self-testing

For self-testing fluorescence can be computed under LTE.

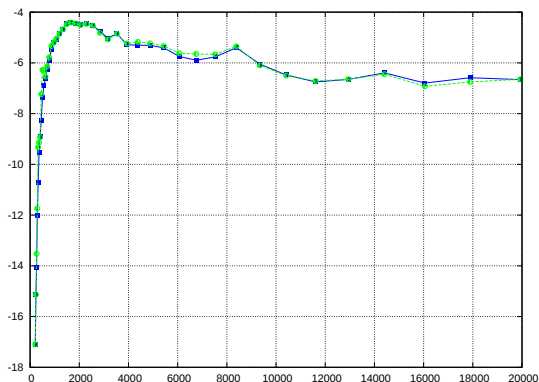
When:

$$-\chi_{\text{tot}} B_{\nu_k} + \chi_{\text{abs}} B_{\nu_k} + \sum_{k'} \chi_{\text{fluor}}^{k',k} B_{\nu_{k'}} = 0$$

Then, for each k must be equal the following sums:

$$B_{\nu_k} \sum_{k'} \chi_{\text{fluor}}^{k,k'} = \sum_{k'} \chi_{\text{fluor}}^{k',k} B_{\nu_{k'}}$$

Fluorescence: self-testing



Blue line is $B_{\nu_k} \sum_{k'} \chi_{\text{fluor}}^{k,k'}$.

Green line is $\sum_{k'} \chi_{\text{fluor}}^{k',k} B_{\nu_{k'}}.$

Good agreement!

Заключение

- ▶ Сверхновые типа II можно использовать, как прямой способ измерения расстояний во Вселенной.
- ▶ SN II_p требует детального моделирования каждой сверхновой.
- ▶ Для оценки расстояния методом плотного слоя (DSM) возможно использование чернотельного приближения на ранней фазе кривой блеска (момент выхода UV).
- ▶ DSM был успешно опробован на 3 сверхновых: SN 2006gy, SN 2009ip and SN 2010jl.
- ▶ В условиях типичных для внешних слоев SN II_n в процессе эволюции радиационные процессы начинают доминировать над ударными, что позволяет использовать модифицированное небулярное приближение для расчета нелТР эффектов.
- ▶ В дальнейшем необходимо включить флуоресценцию в наше моделирование.
- ▶ Спасибо за внимание!