

超新星SHOCK BREAKOUT研究 の現状

鈴木昭宏(PD,京大宇宙)

-Introduction-

-SN shock breakout theory-

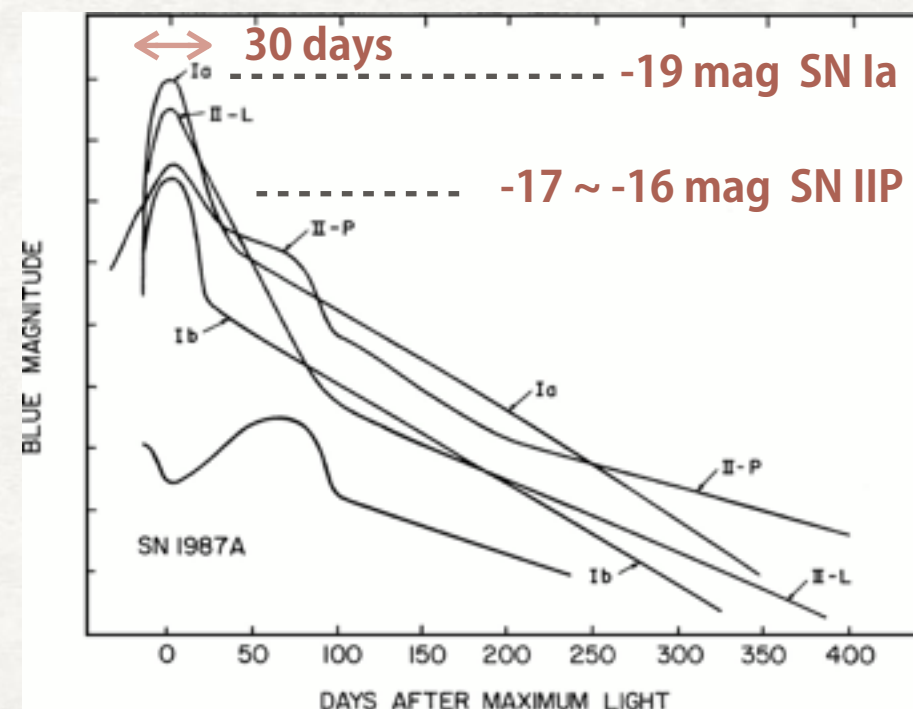
-Recent Works-

-Summary-

Introduction

Core-collapse Supernovae

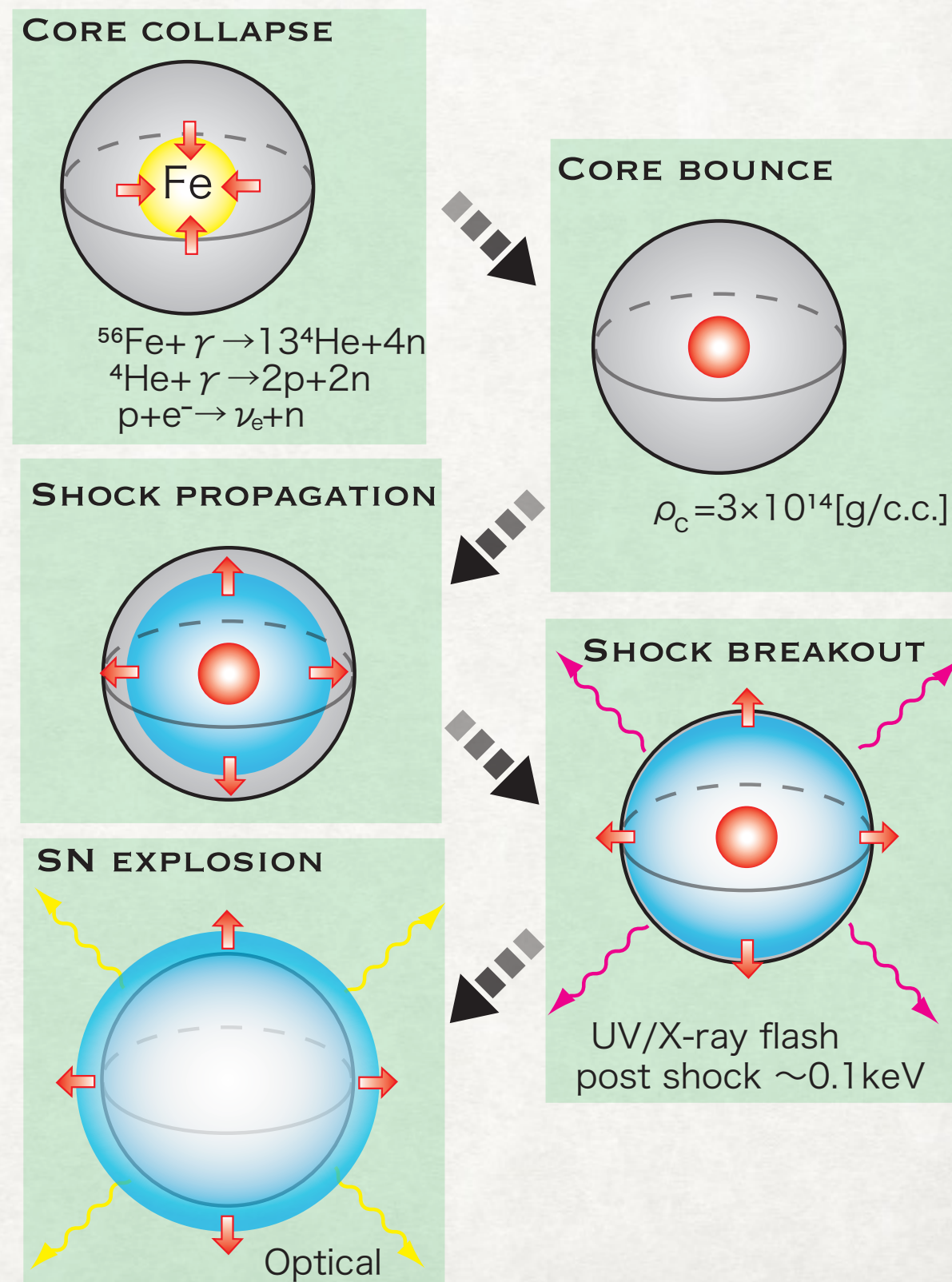
- 大質量星の進化の最終段階
- 光分解による鉄コアの重力崩壊
- バウンスによる衝撃波形成
- 衝撃波の星表面への到達 → UV/X-ray flash(**shock breakout**)
- 親星外層の放出 → 可視赤外放射, 電波放射など (supernovae)



Schematic Light curves of various SNe
(Filippenko 1997)

Core-collapse Supernovae

- 大質量星の進化の最終段階
- 光分解による鉄コアの重力崩壊
- バウンスによる衝撃波形成
- 衝撃波の星表面への到達 → UV/X-ray flash(**shock breakout**)
- 親星外層の放出 → 可視赤外放射, 電波放射など (supernovae)



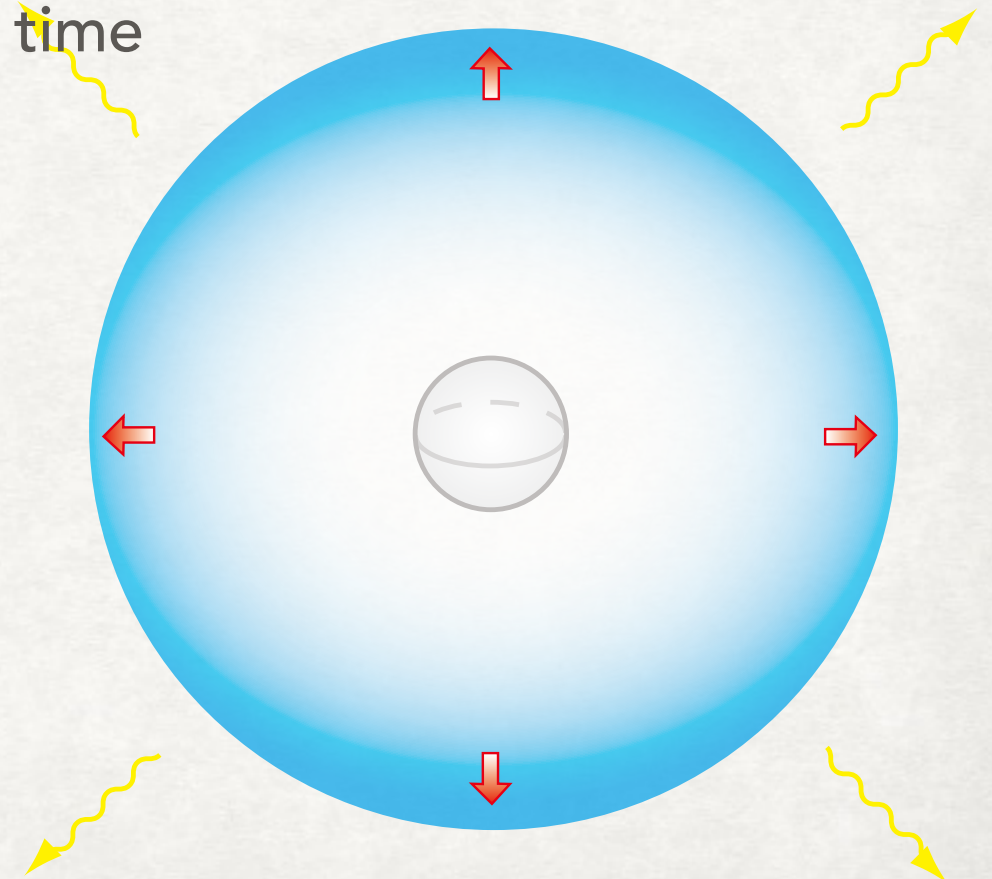
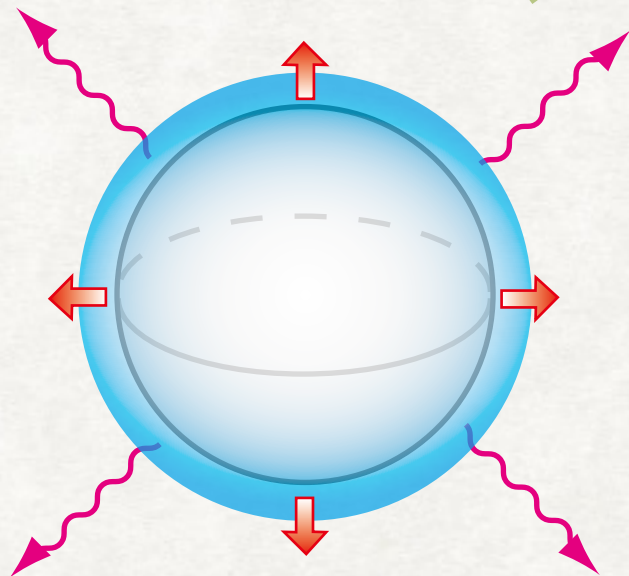
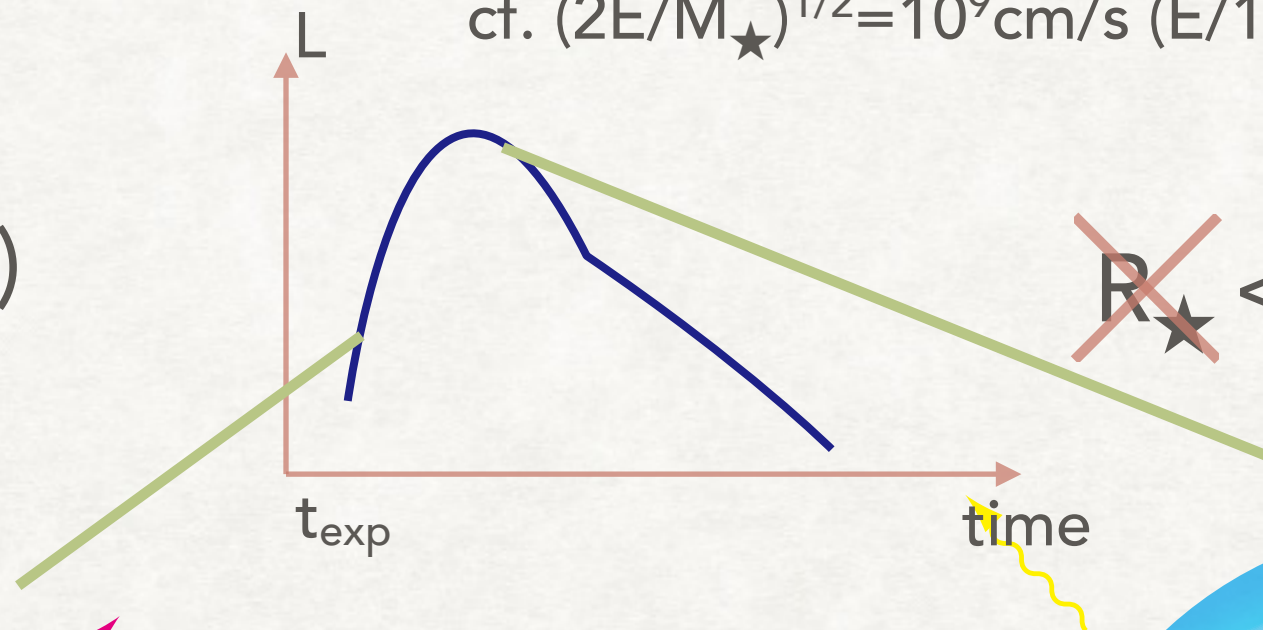
Core-collapse Supernovae

$$R = R_{\star} + v(t - t_{\text{exp}}) = R_{\star} + C(2E/M_{\star})^{1/2}(t - t_{\text{exp}})$$

$$\text{cf. } (2E/M_{\star})^{1/2} = 10^9 \text{ cm/s } (E/10^{51} \text{ erg})(M/1M_{\odot})^{-1}$$

$$R_{\star} \sim v(t - t_{\text{exp}})$$

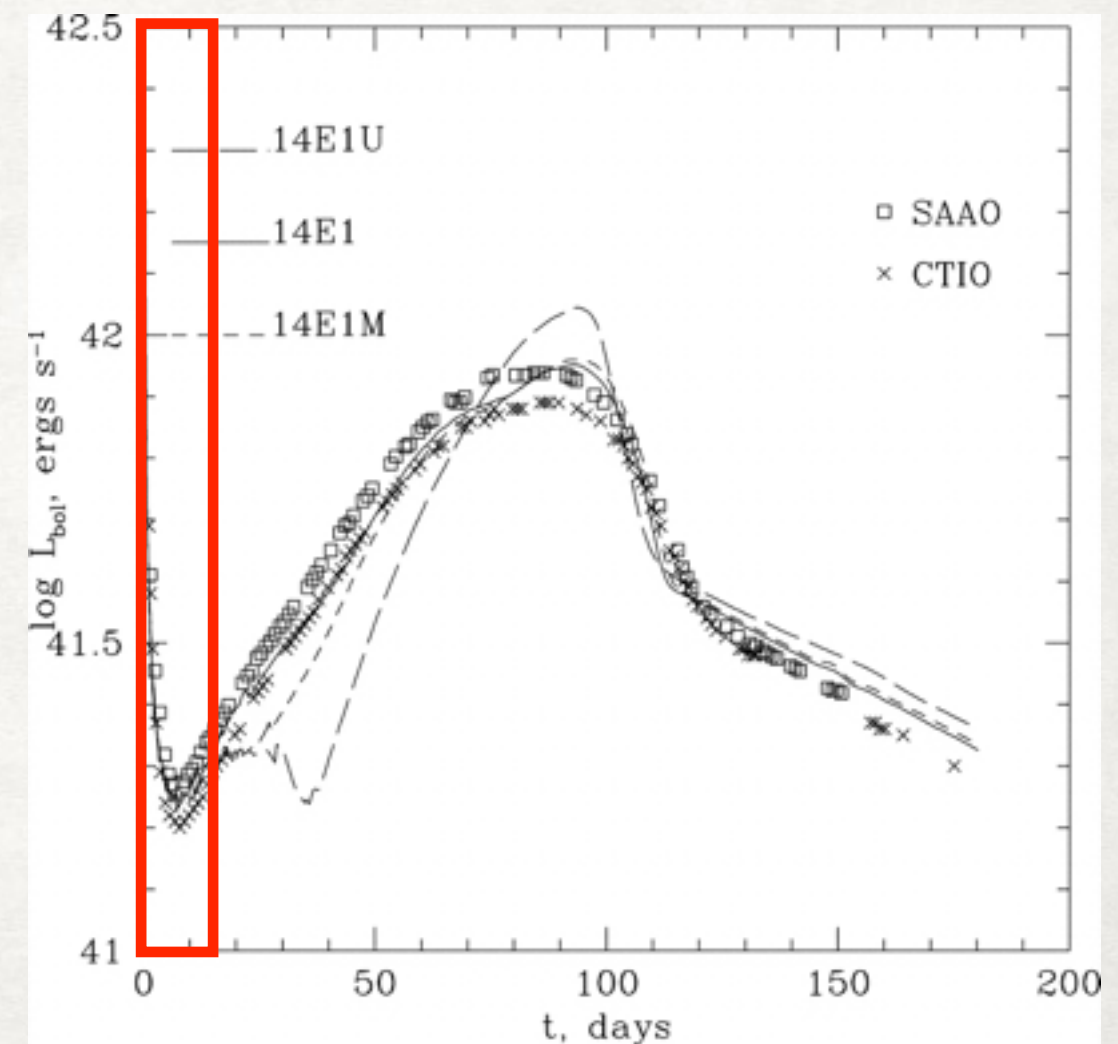
$$\cancel{R_{\star}} \ll v(t - t_{\text{exp}})$$



SN 1987A @Magellanic Cloud

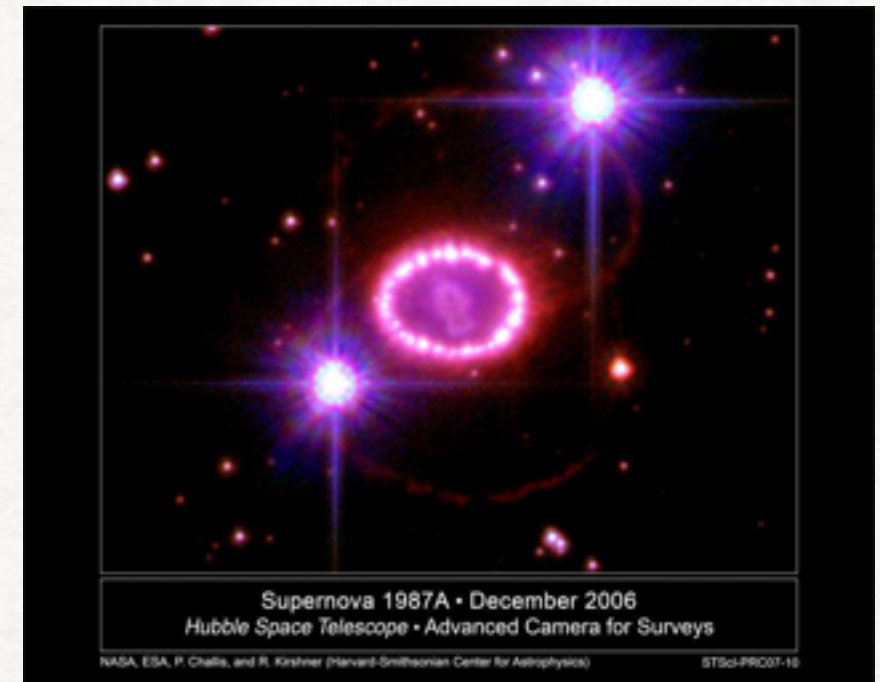
- peculiar SN @ Magellanic Cloud
- SN shock breakoutに続く cooling phaseが観測されている
- イオン化ポテンシャルが高いイオンからの recombination lines: UV flashによる光電離が必要

Blinnikov+(2000)

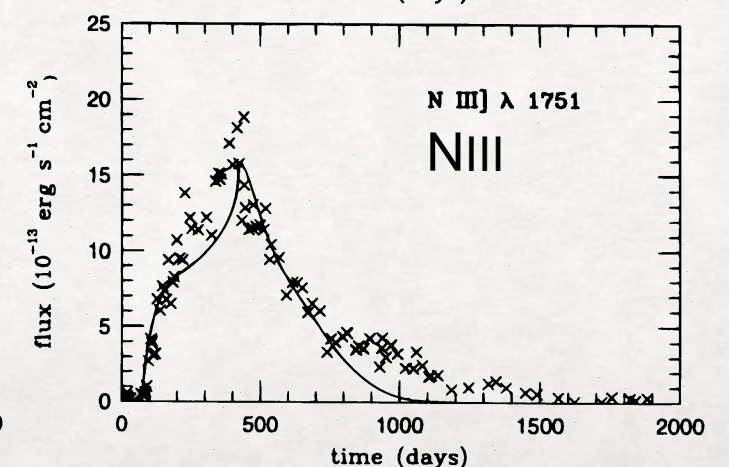
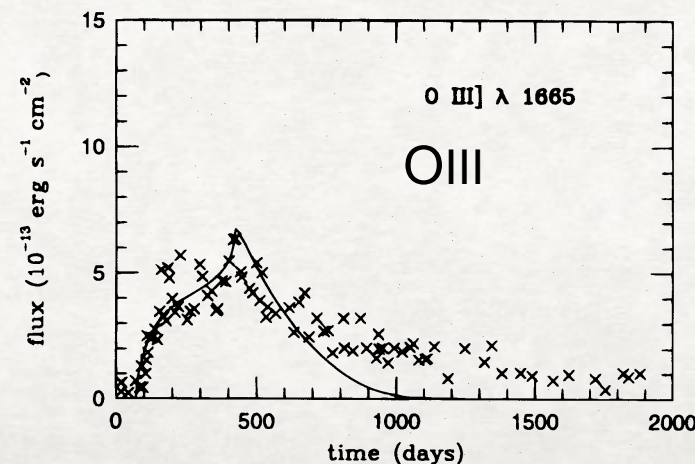
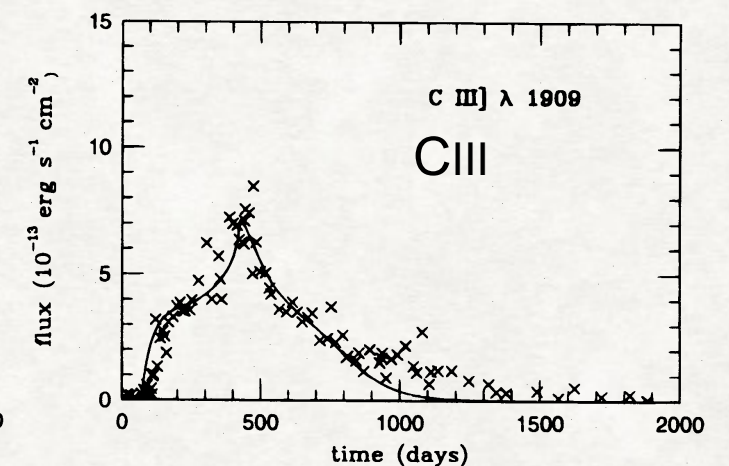
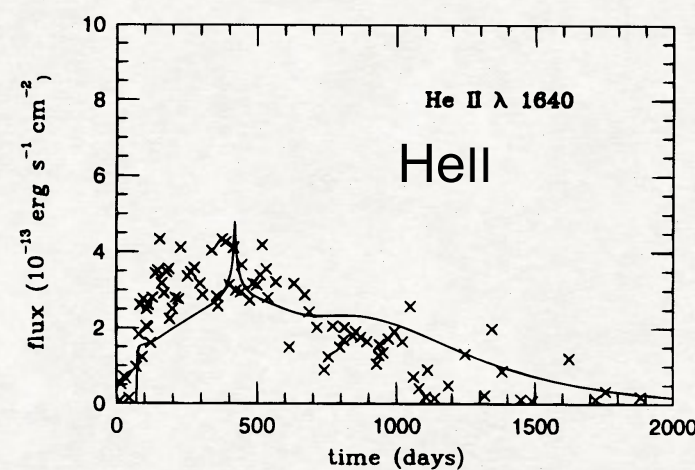


SN 1987A @Magellanic Cloud

- peculiar SN @ Magellanic Cloud
- SN shock breakoutに続く cooling phaseが観測されている
- イオン化ポテンシャルが高いイオンからの recombination lines: UV flashによる光電離が必要



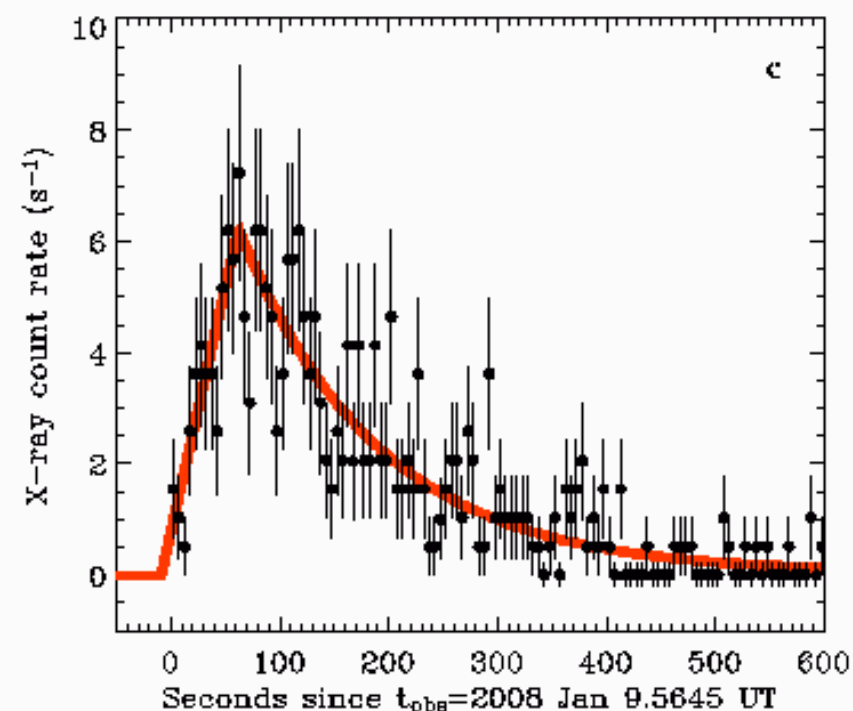
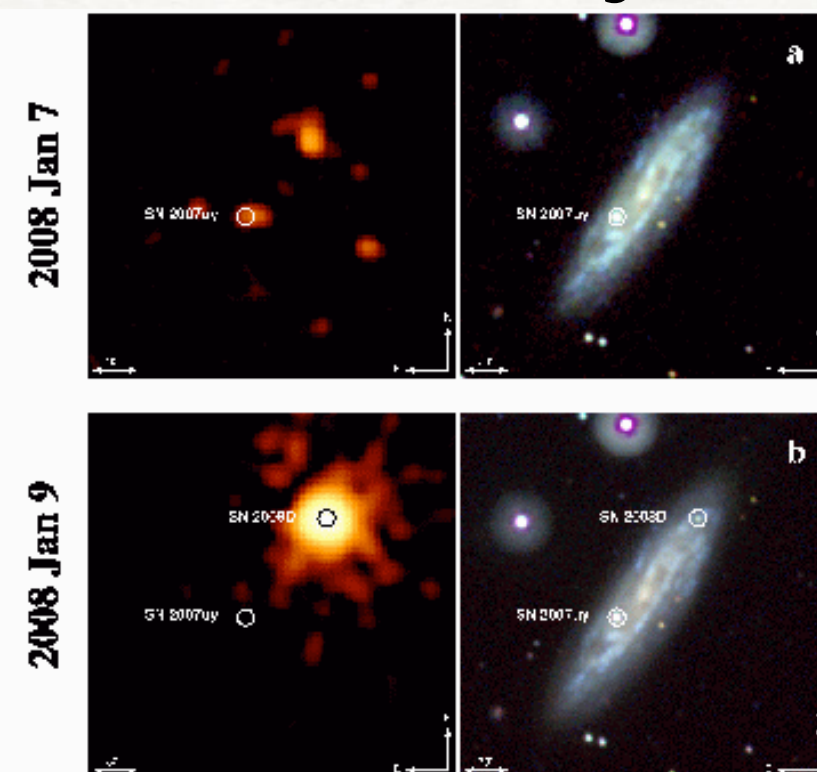
**narrow emission line from CSM
around SN 1987A
Lundqvist&Fransson(1996)**



SN 2008D/XRF 080109

- SN Ib @NGC2770 D=27Mpc
- Jan 9, 2008, Swift衛星が偶然にX線フラッシュを発見 → SN 2008Dに付随したものとわかる
- $L_x \sim \text{a few} \times 10^{43} \text{ erg/s}$, duration $\sim 200\text{-}300$ sec, $E_x \sim 10^{46} \text{ erg}$
- X線放射の起源についてはまだ議論がある
(光学的に厚いCSMに囲まれた星でのshock breakout?)

Soderberg+(2008)



SN shock breakout theory

Supernova Shock Breakout

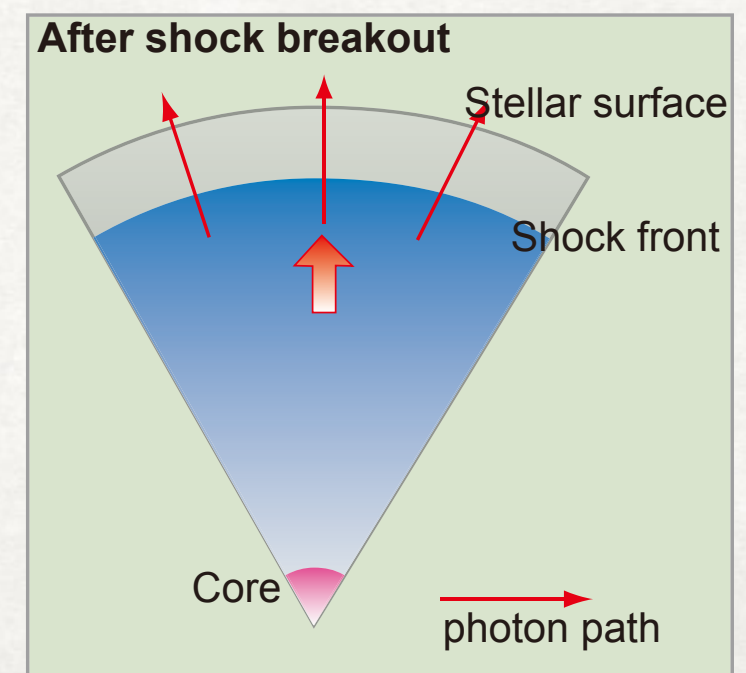
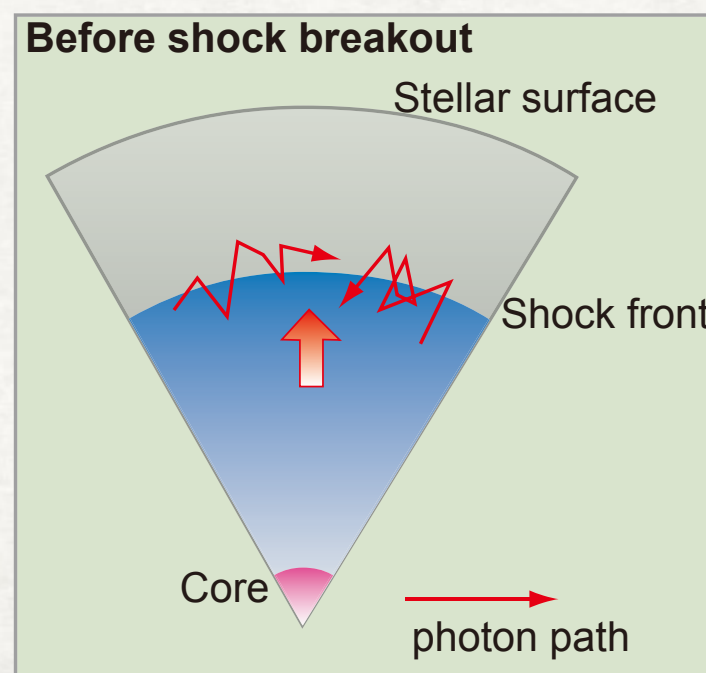
- ・ 衝撃波の表面への到達 → post-shock gas
が光学的に薄くなる

photon diffusion velocity $V_{\text{diff}} = c / \tau$

shock velocity V_s

breakout condition $c / \tau > V_s$

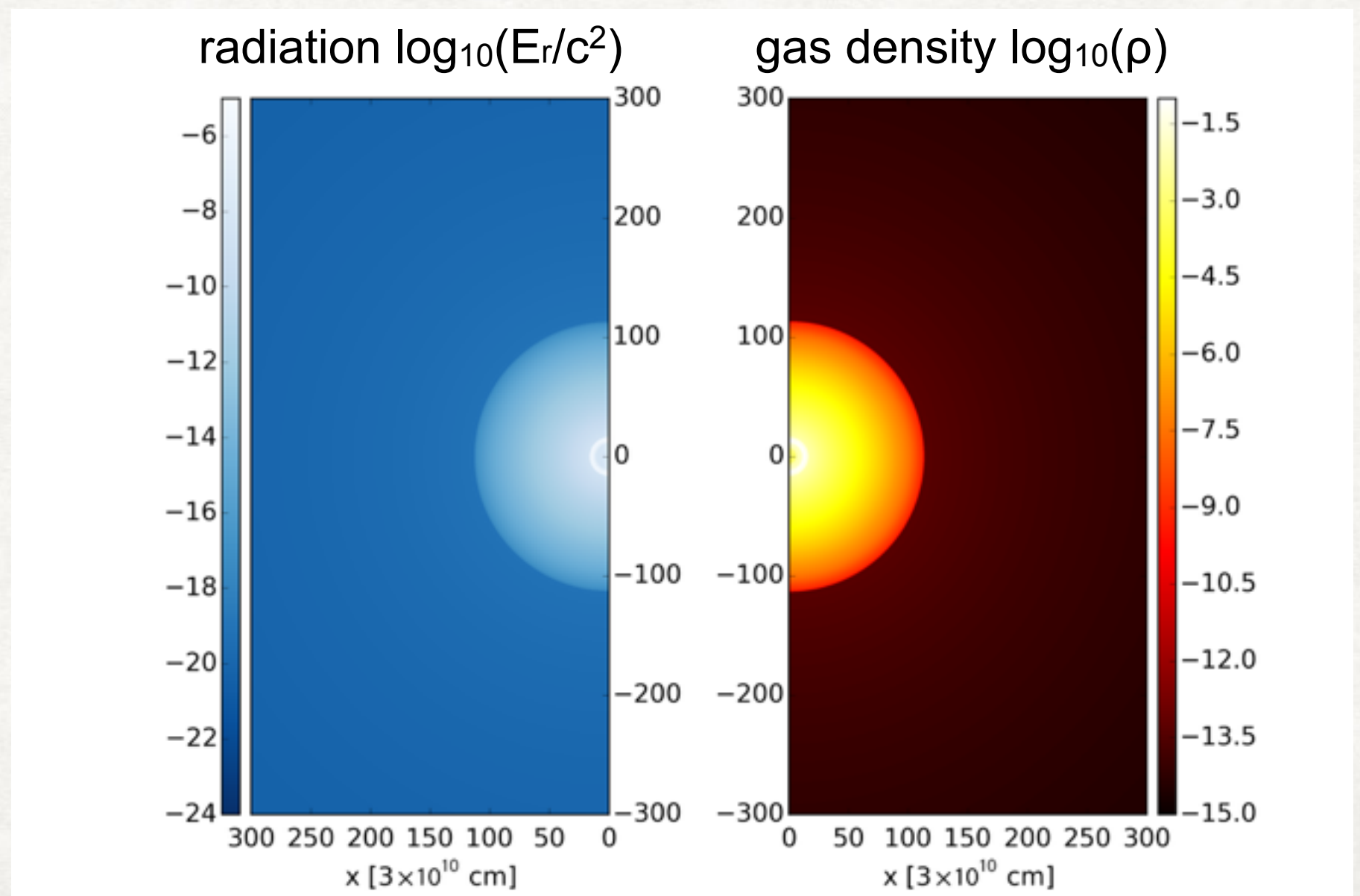
- ・ 星外層をphotonが拡散する速度 $\sim c / \tau$ temperature $T_{\text{br}} \sim 10^{5-6} [\text{K}] \sim 0.01-0.1 [\text{keV}]$
- ・ shock velocity V_s
- ・ $c / \tau > V_s$ で shock breakout



Supernova Shock Breakout

- 1987A progenitor: BSG with $R_{\star}=50R_{\odot}$, $M_{\star}=14.6M_{\odot}$
- 球対称爆発

$t=1000$ s
after core-collapse

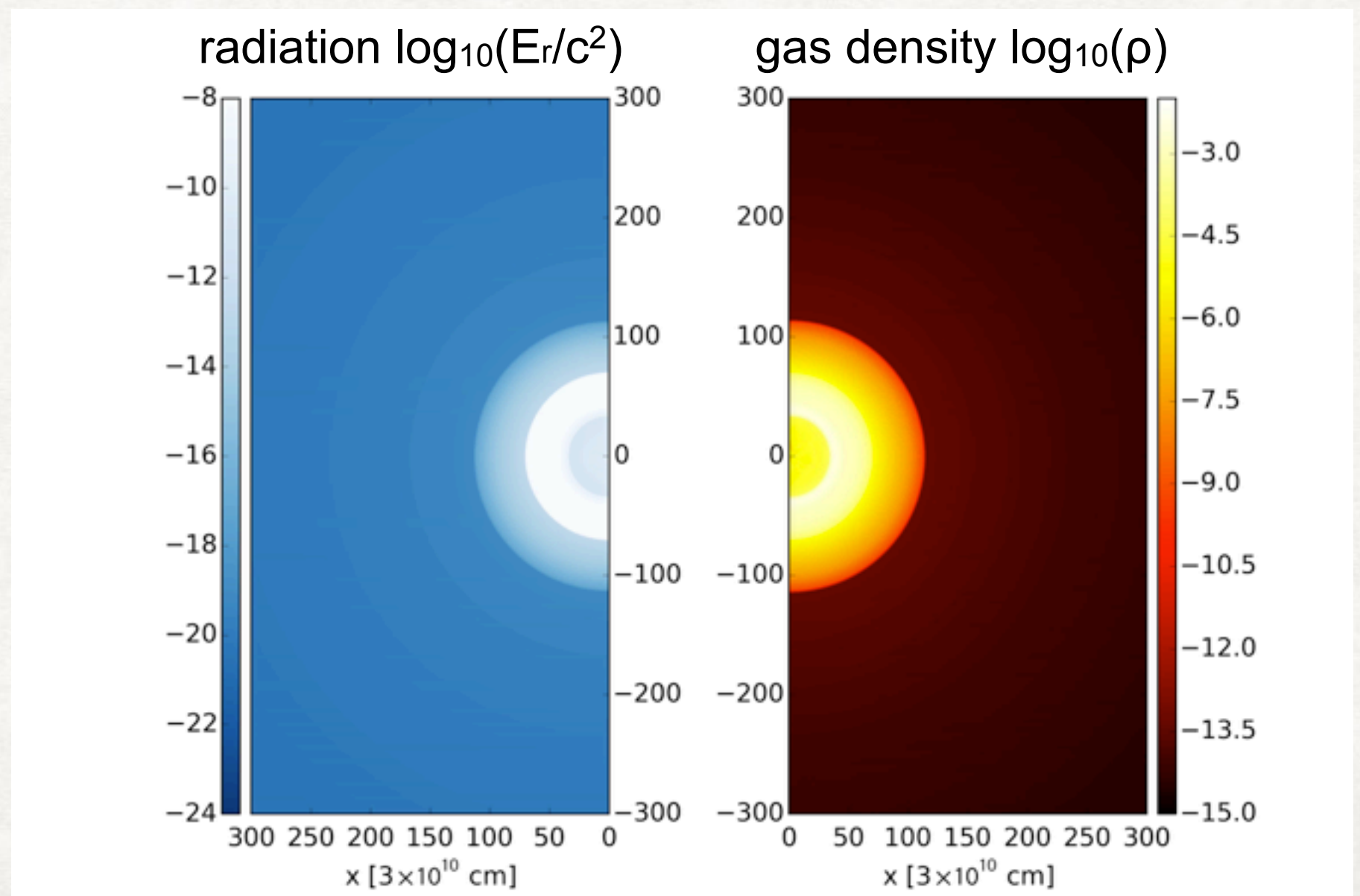


AS, Maeda, & Shigeyama (2016)

Supernova Shock Breakout

- 1987A progenitor: BSG with $R_{\star}=50R_{\odot}$, $M_{\star}=14.6M_{\odot}$
- 球対称爆発

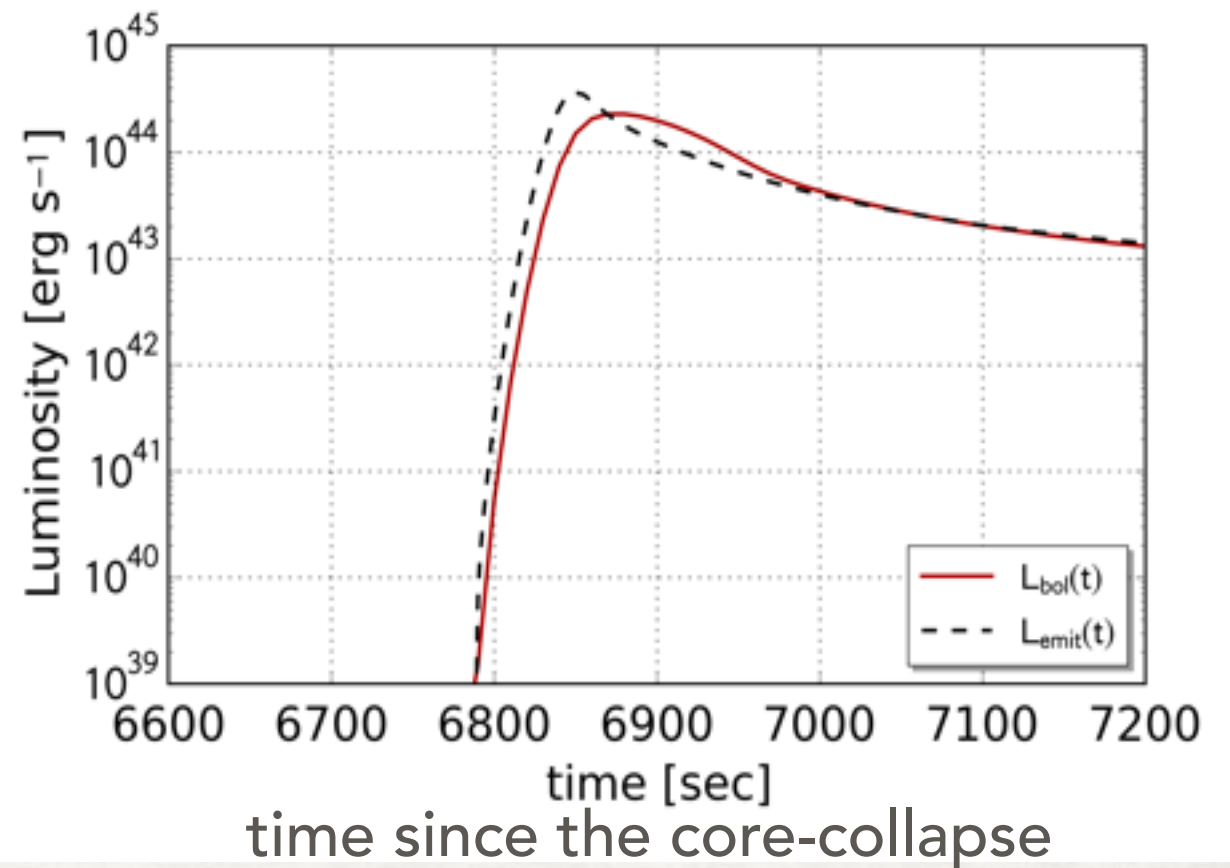
$t=1000$ s
after core-collapse



AS, Maeda, & Shigeyama (2016)

SN Shock Breakout Light Curves

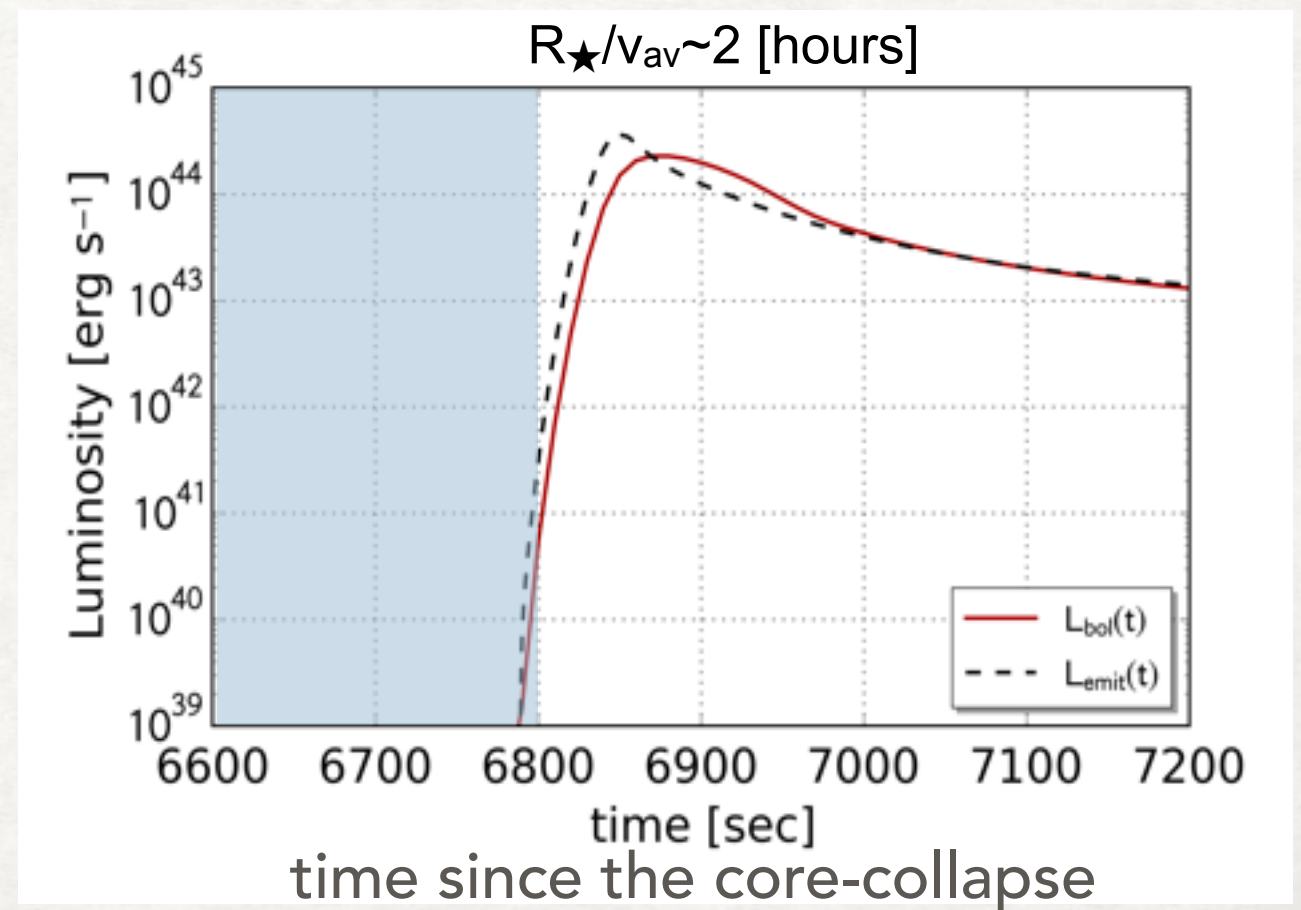
- SN shock breakoutの光度曲線やタイムスケールはどう決まるか?
- bolometric luminosity $\sim 10^{44}$ erg/s ~ -21 mag
- shock propagation ($\Delta t \sim R_{\star}/(E/M_{\star})^{1/2}$)
- shock breakout phase ($\Delta t \sim R_{\star}/c$)
- cooling envelope phase ($\Delta t \sim R_{\star}/v$)



AS, Maeda, & Shigeyama (2016)

SN Shock Breakout Light Curves

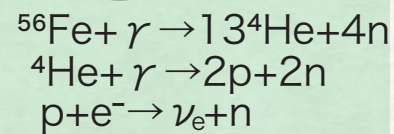
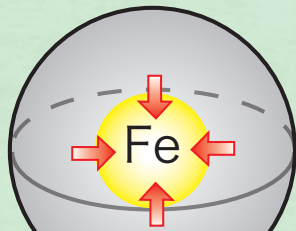
- SN shock breakoutの光度曲線やタイムスケールはどう決まるか?
- bolometric luminosity $\sim 10^{44}$ erg/s ~ -21 mag
- **shock propagation ($\Delta t \sim R_{\star}/(E/M_{\star})^{1/2}$)**
- shock breakout phase ($\Delta t \sim R_{\star}/c$)
- cooling envelope phase ($\Delta t \sim R_{\star}/v_{\max}$)



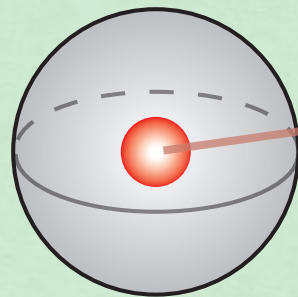
AS, Maeda, & Shigeyama (2016)

SN Shock Breakout Light Curves

CORE COLLAPSE

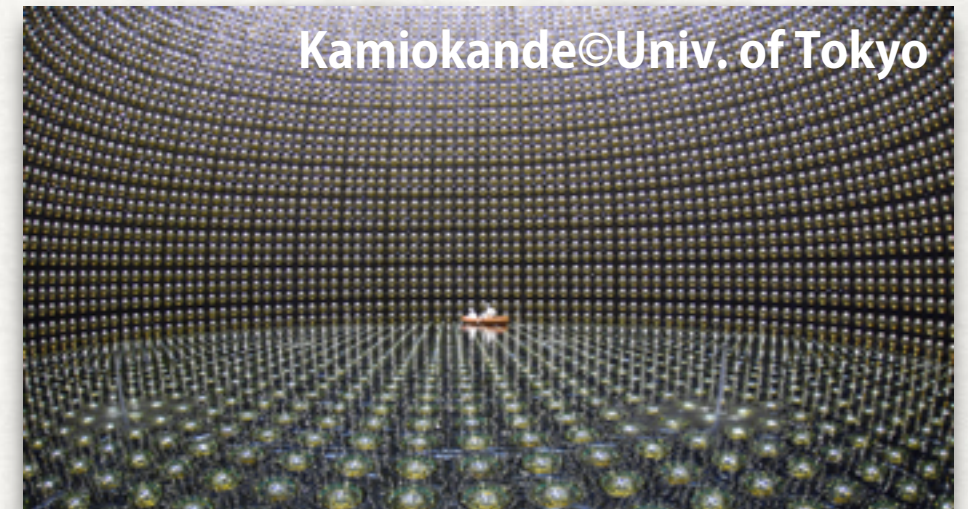


CORE BOUNCE

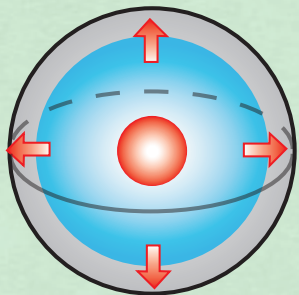


$$\rho_c = 3 \times 10^{14} [\text{g/cc}]$$

neutrino

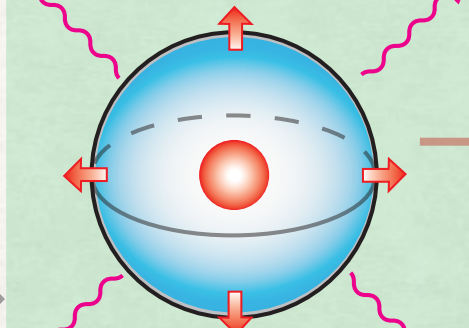


SHOCK PROPAGATION



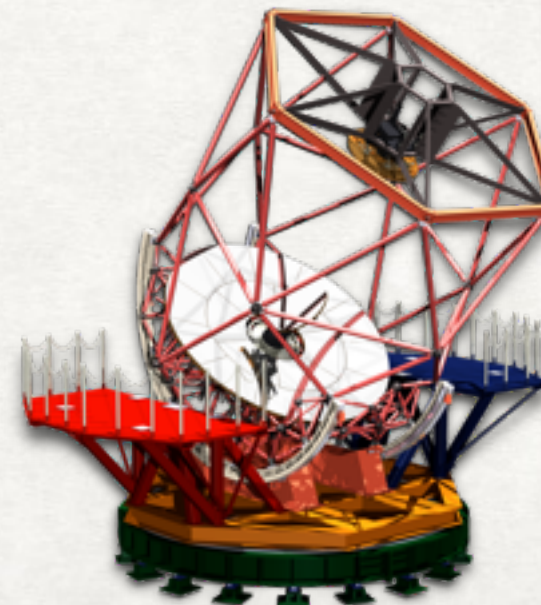
$$\Delta t \sim R_{\star} / (E/M_{\star})^{1/2}$$

SHOCK BREAKOUT

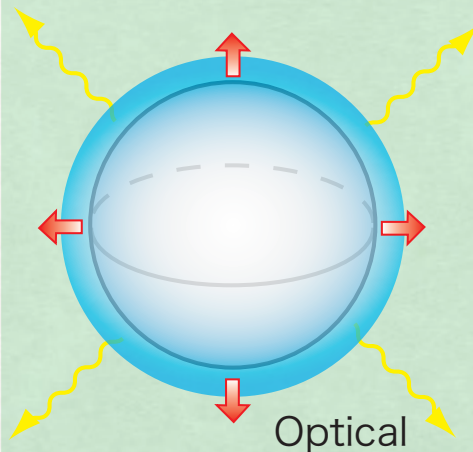


UV/X-ray flash
post shock $\sim 0.1 \text{ keV}$

photon

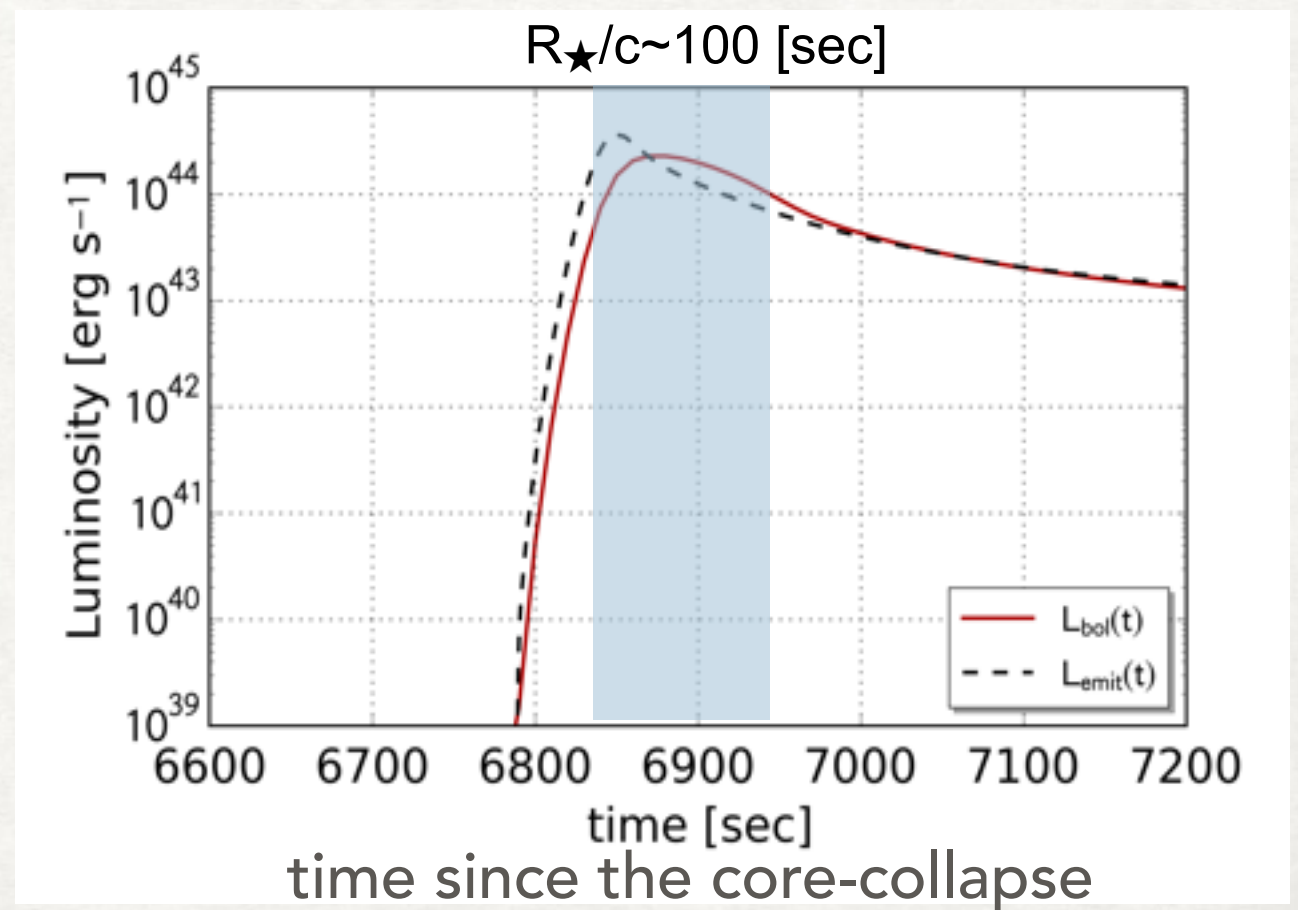


SN EXPLOSION



SN Shock Breakout Light Curves

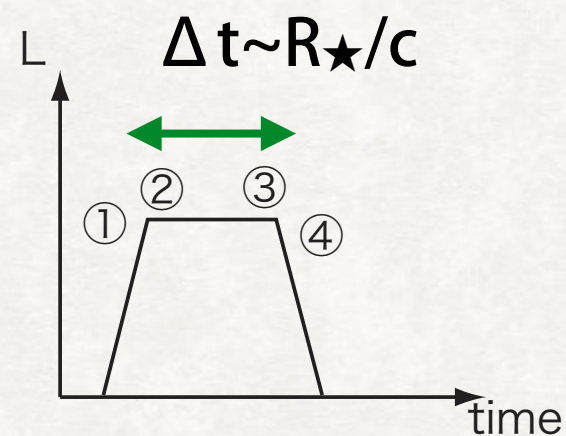
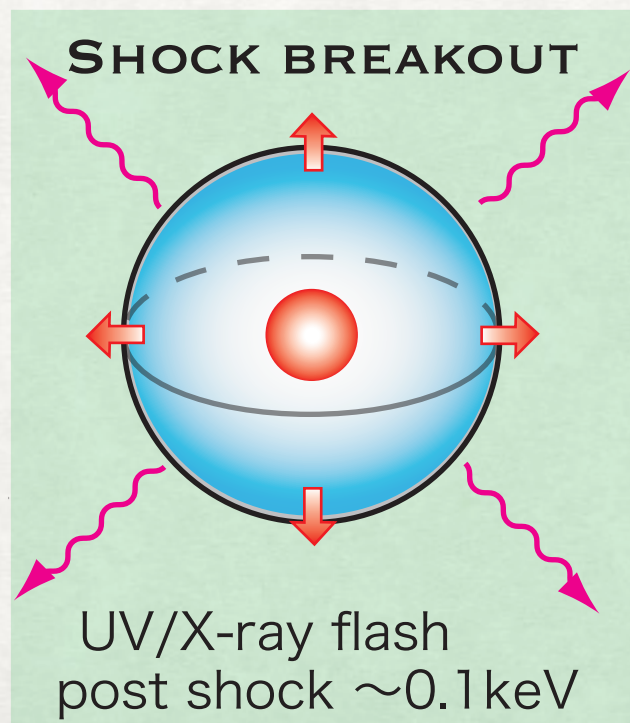
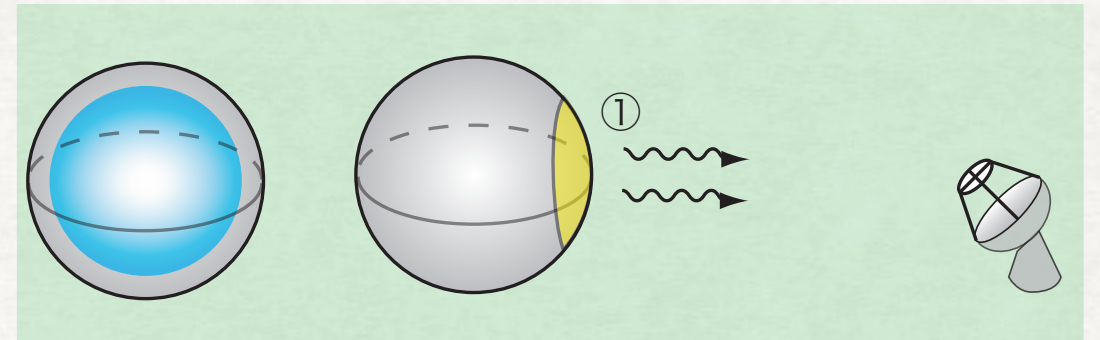
- SN shock breakoutの光度曲線やタイムスケールはどう決まるか?
- bolometric luminosity $\sim 10^{44}$ erg/s ~ -21 mag
- shock propagation ($\Delta t \sim R_{\star}/(E/M_{\star})^{1/2}$)
- **shock breakout phase ($\Delta t \sim R_{\star}/c$)**
- cooling envelope phase ($\Delta t \sim R_{\star}/v_{\max}$)



AS, Maeda, & Shigeyama (2016)

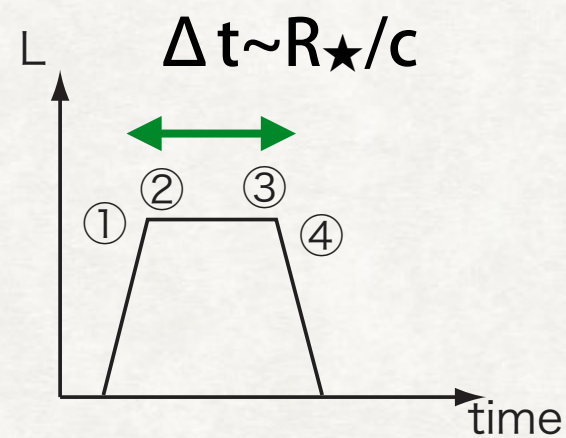
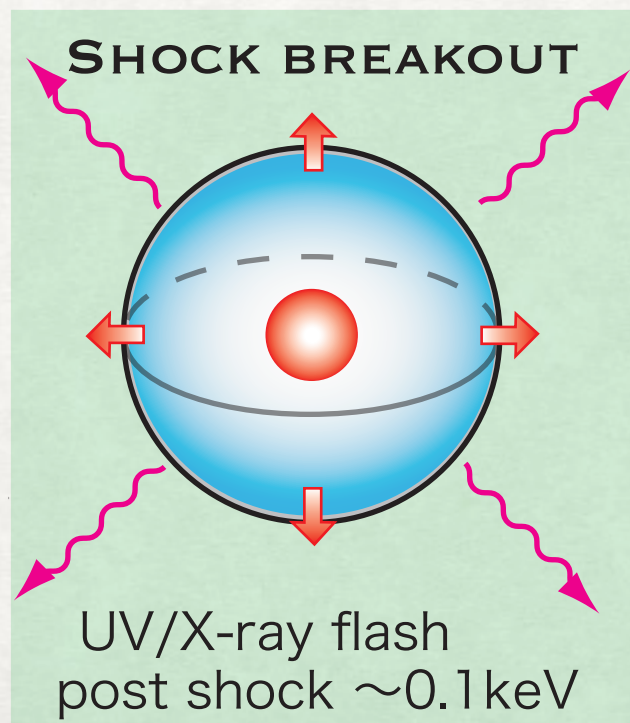
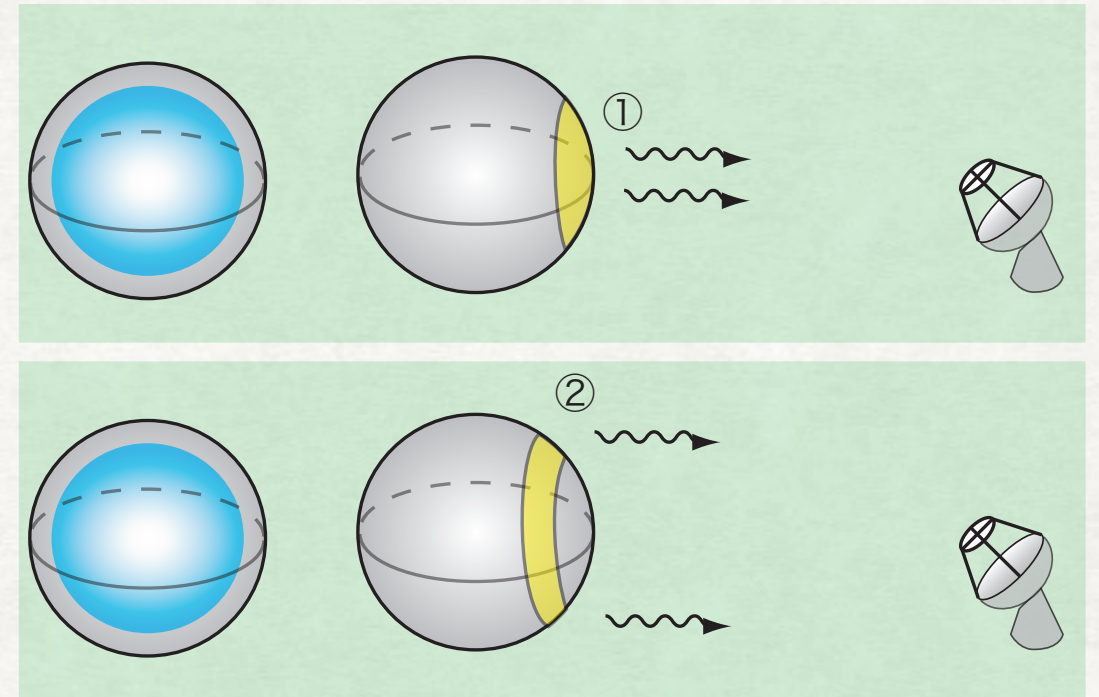
SN Shock Breakout Light Curves

- shock breakout phase ($\Delta t \sim R_{\star}/c$)
- instantaneous UV flash
- 星半径のlight crossing timeを反映する



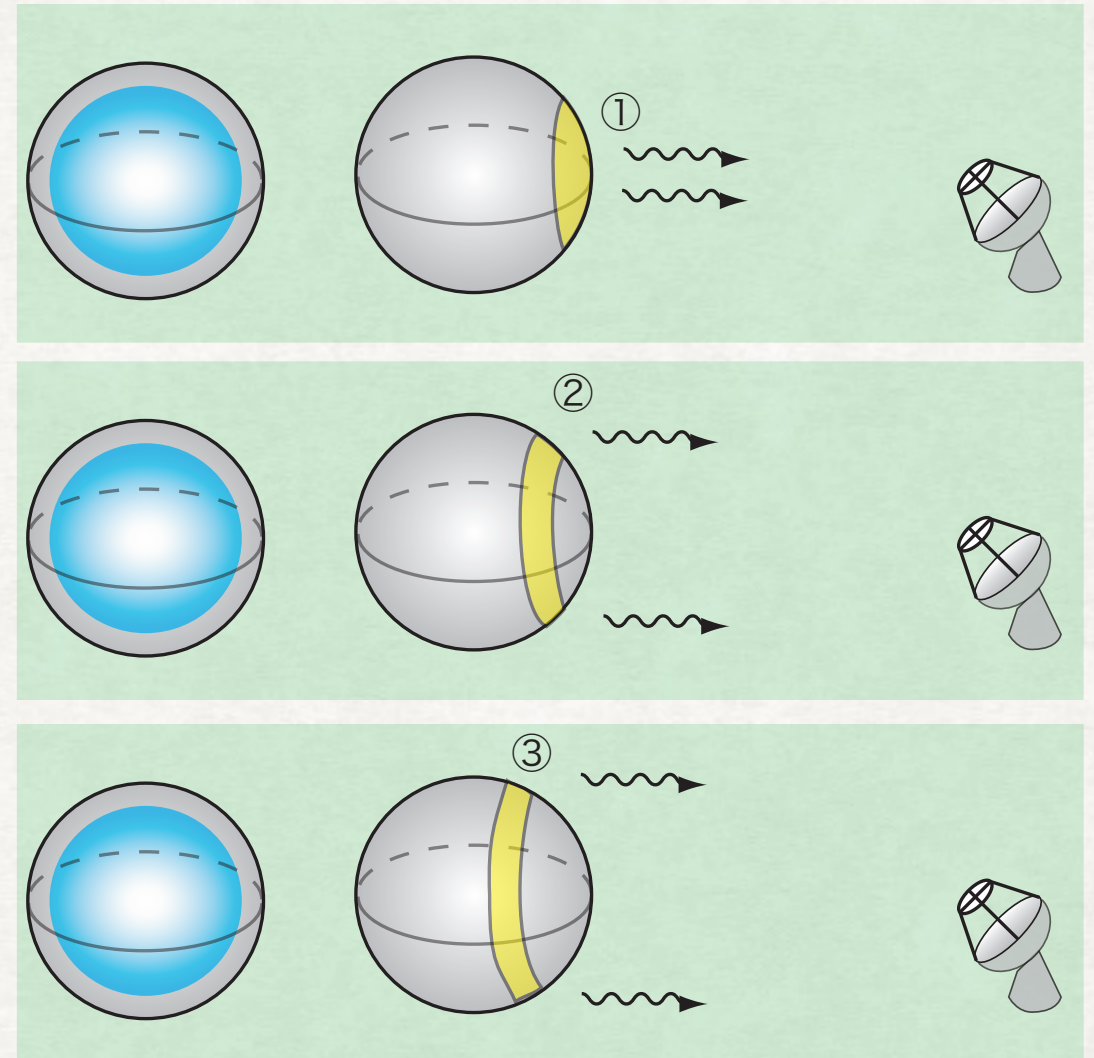
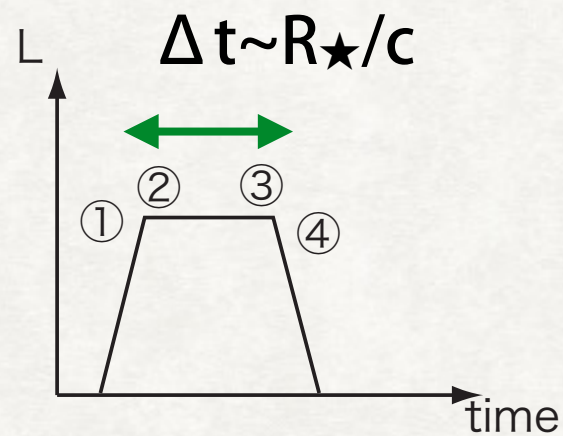
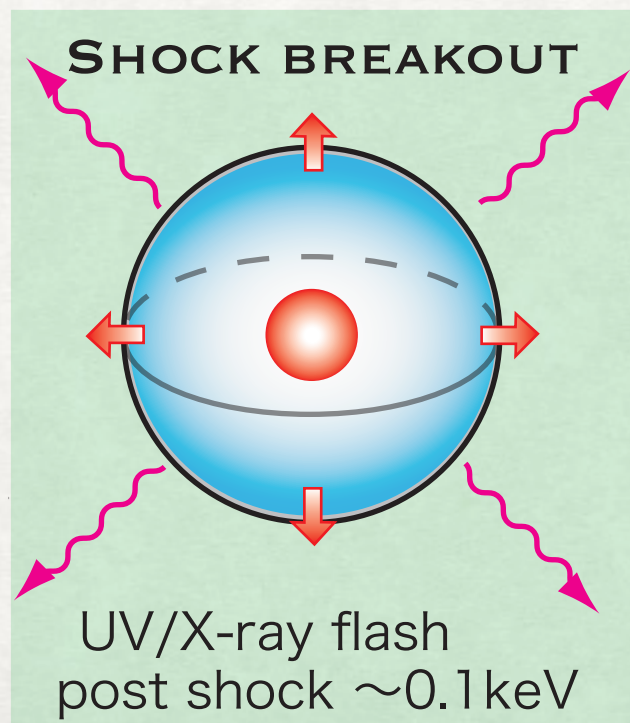
SN Shock Breakout Light Curves

- shock breakout phase ($\Delta t \sim R_{\star}/c$)
- instantaneous UV flash
- 星半径のlight crossing timeを反映する



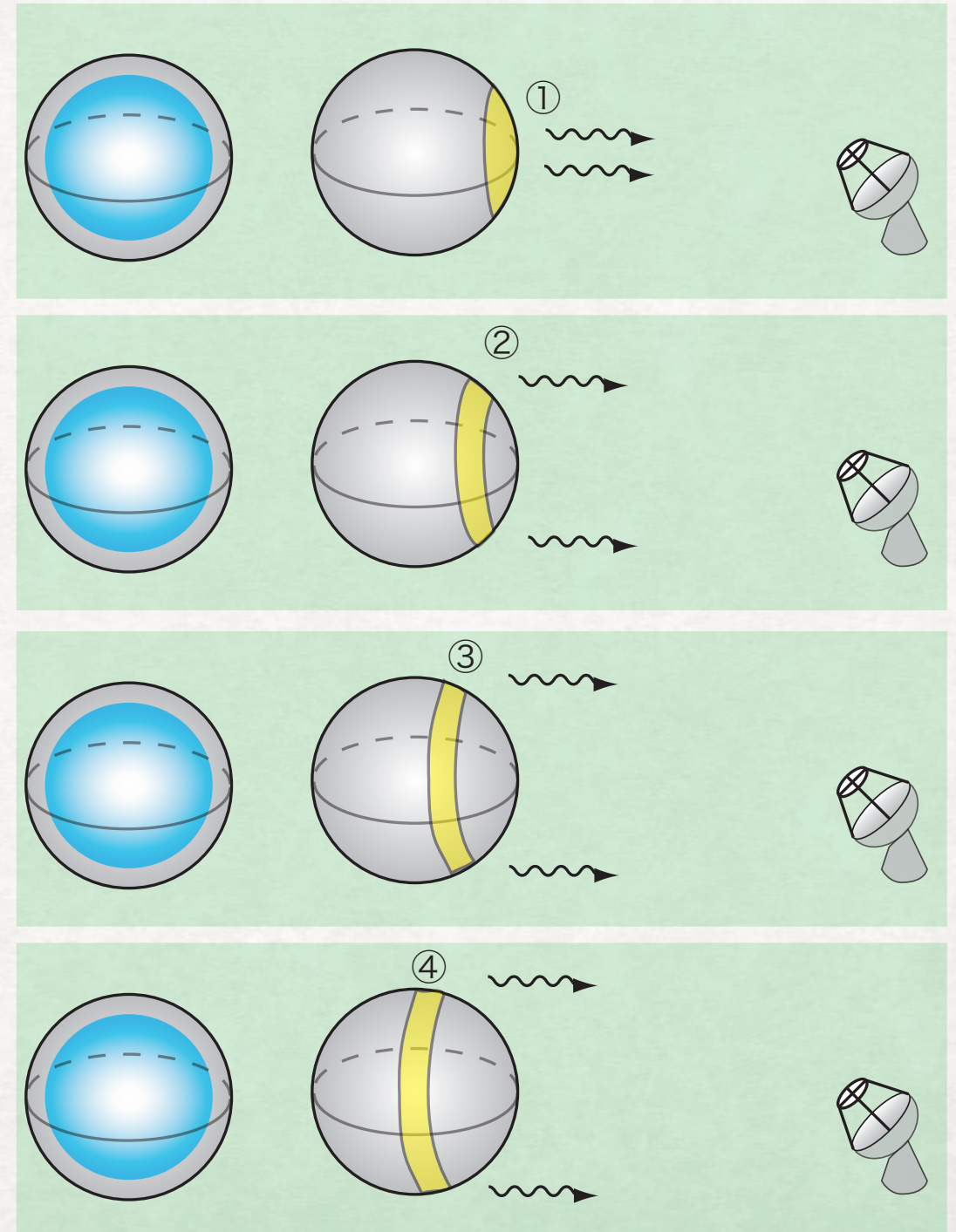
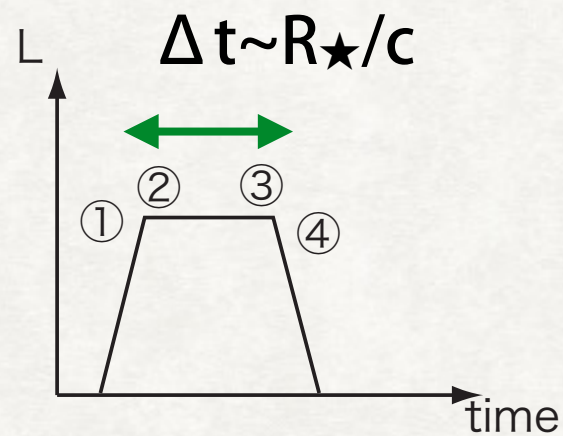
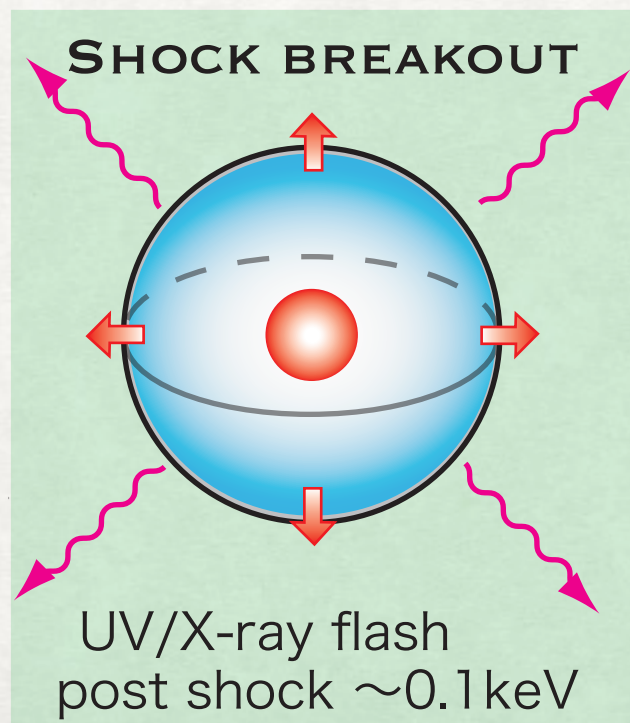
SN Shock Breakout Light Curves

- shock breakout phase ($\Delta t \sim R_{\star}/c$)
- instantaneous UV flash
- 星半径のlight crossing timeを反映する



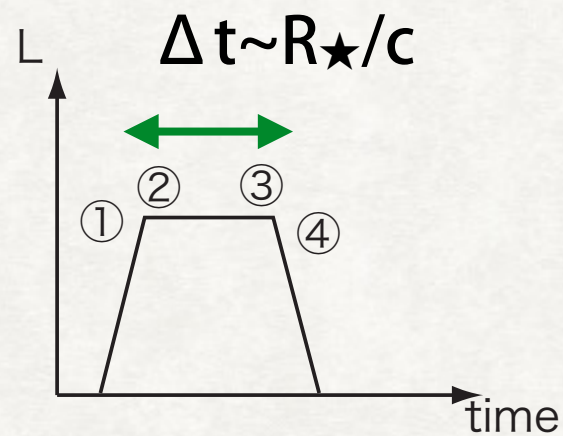
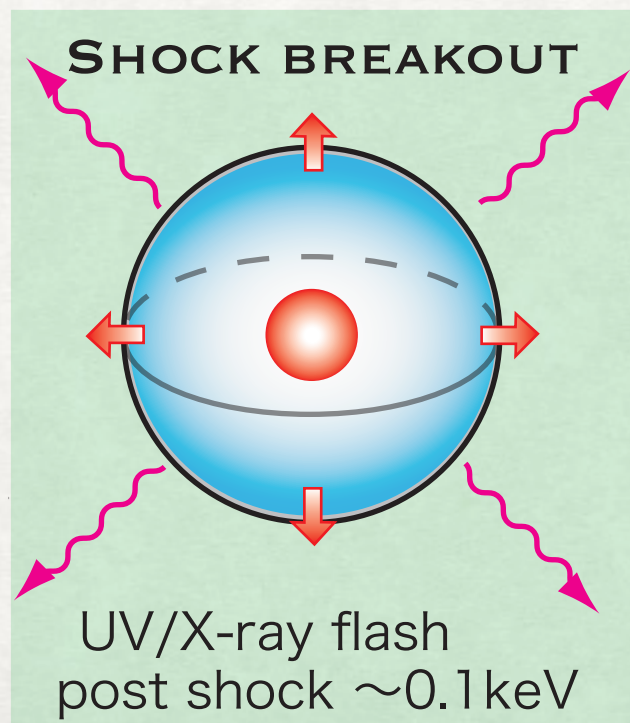
SN Shock Breakout Light Curves

- shock breakout phase ($\Delta t \sim R_{\star}/c$)
- instantaneous UV flash
- 星半径のlight crossing timeを反映する

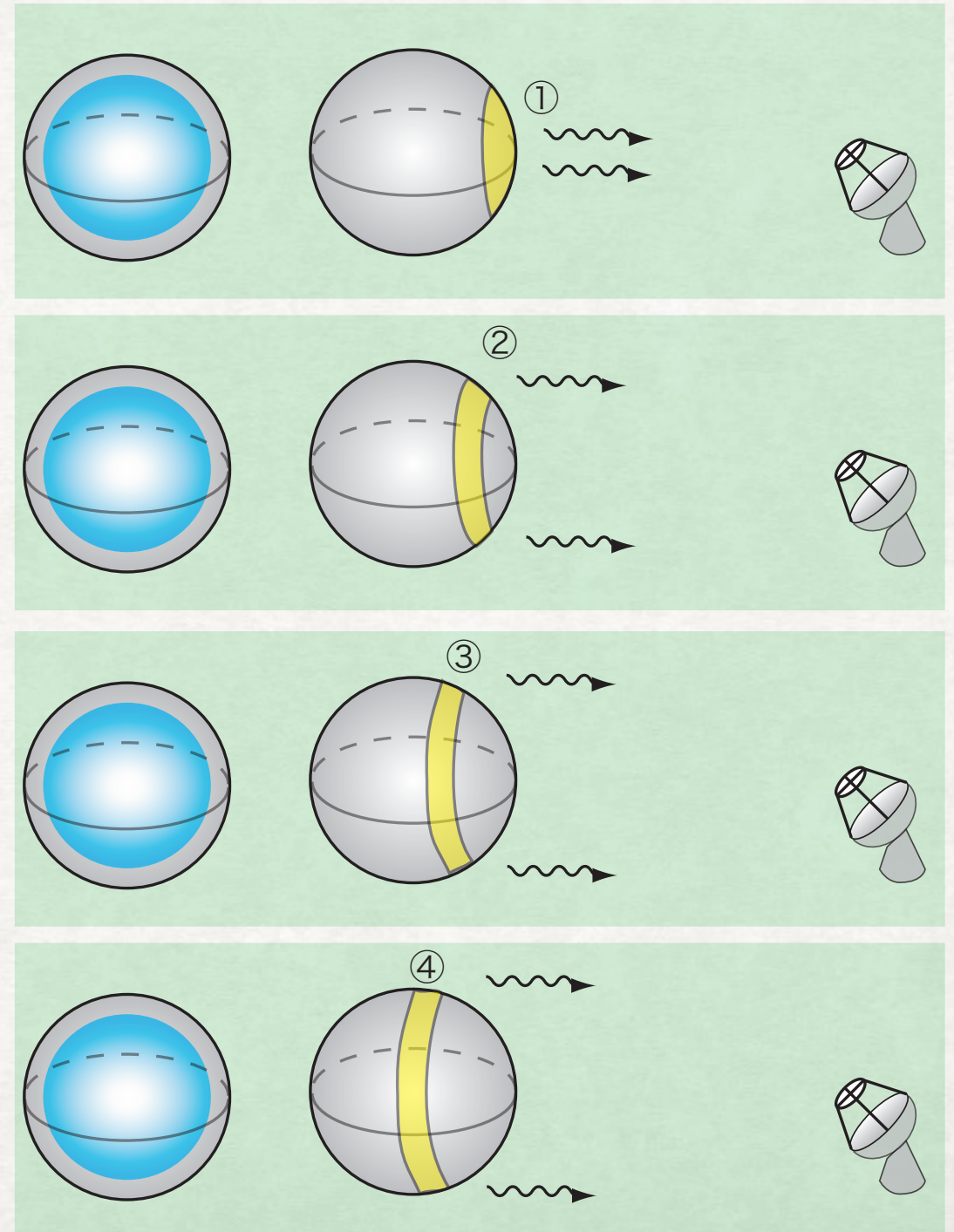


SN Shock Breakout Light Curves

- shock breakout phase ($\Delta t \sim R_{\star}/c$)
- instantaneous UV flash
- 星半径のlight crossing timeを反映する

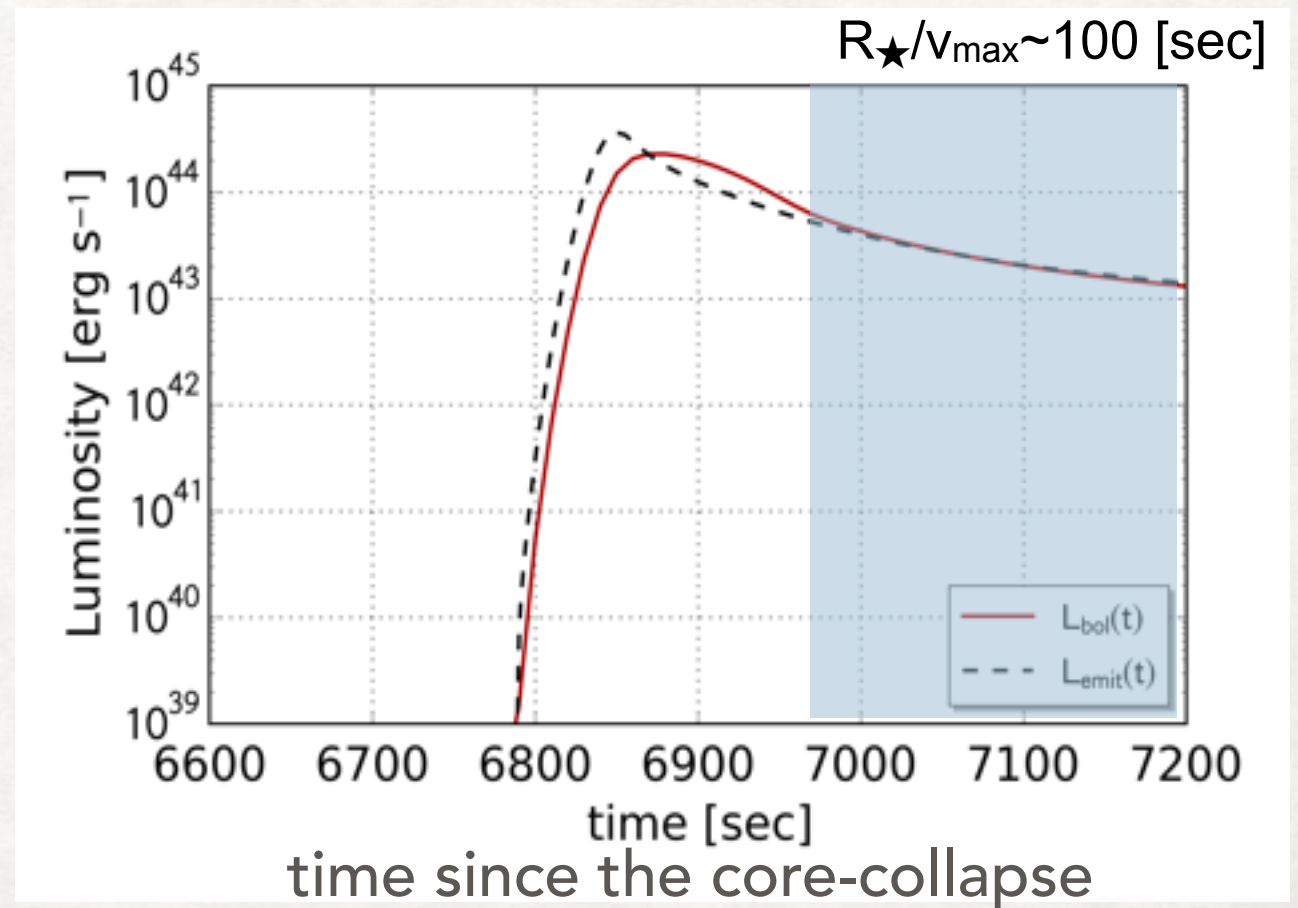


$$\Delta t \sim R_{\star}/c$$



SN Shock Breakout Light Curves

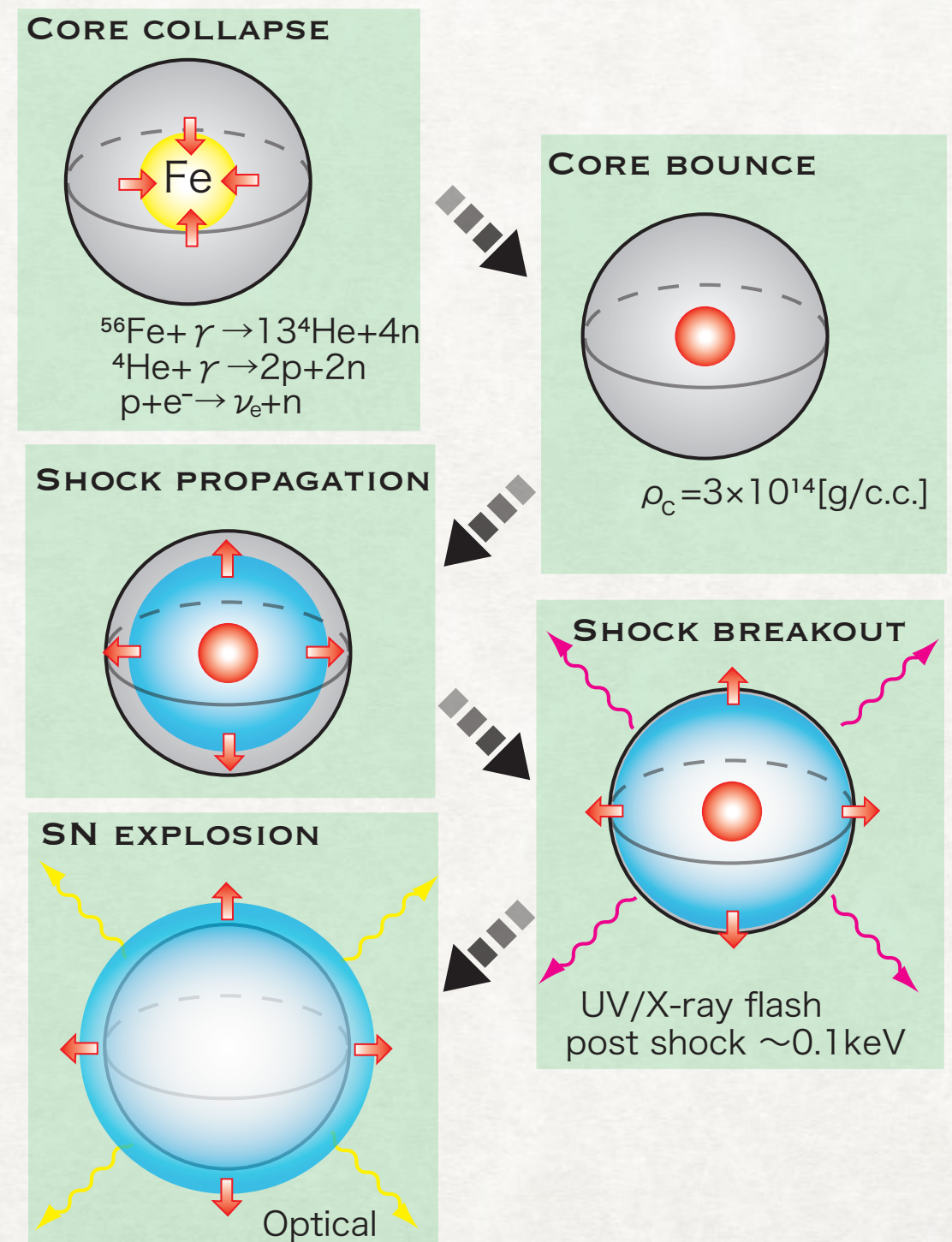
- SN shock breakoutの光度曲線やタイムスケールはどう決まるか?
- bolometric luminosity $\sim 10^{44}$ erg/s ~ -21 mag
- shock propagation ($\Delta t \sim R_{\star}/(E/M_{\star})^{1/2}$)
- shock breakout phase ($\Delta t \sim R_{\star}/c$)
- **cooling envelope phase ($\Delta t \sim R_{\star}/v_{\max}$)**



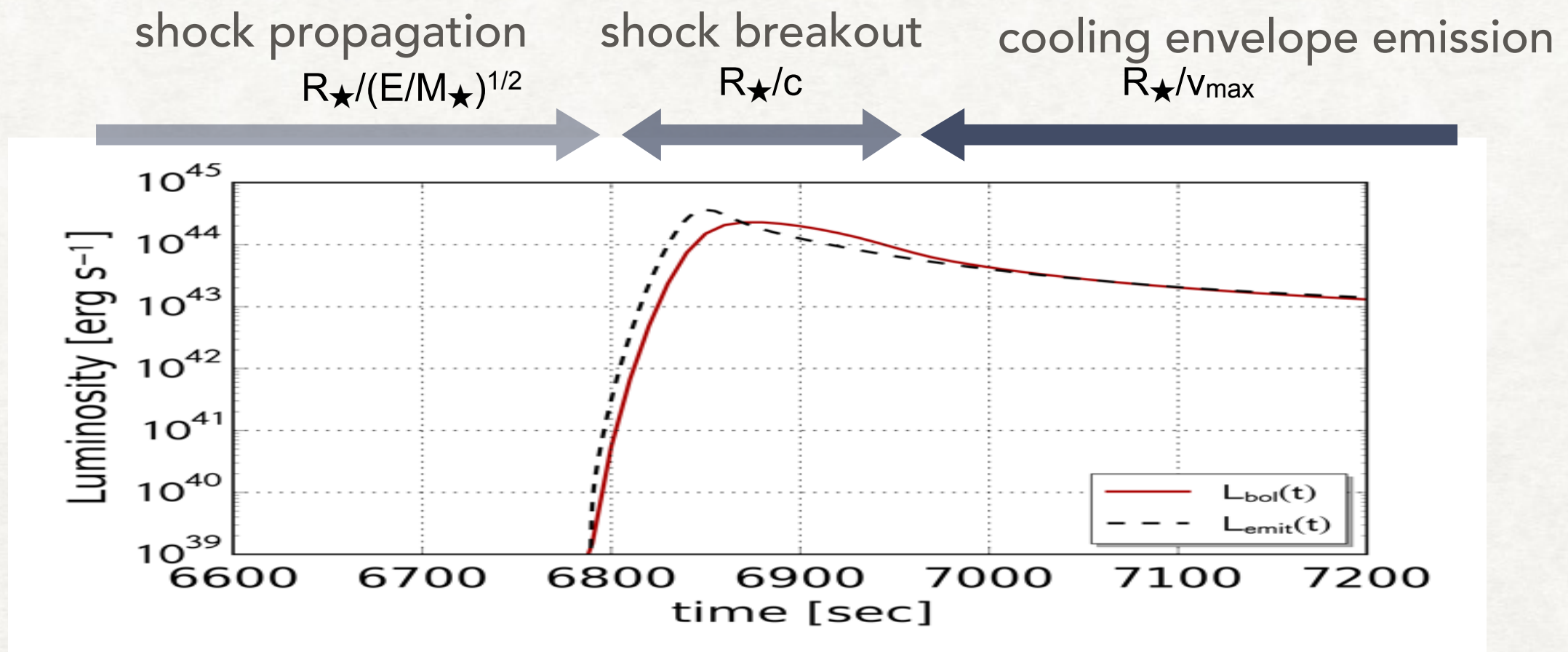
AS, Maeda, & Shigeyama (2016)

SN Shock Breakout Light Curves

- cooling envelope phase ($\Delta t \sim R_{\star}/v_{\max}$)
- spherically expanding fireball
- photospheric emission
- adiabatic cooling
- 半径2倍 \rightarrow 体積8倍 \rightarrow 温度1/2
(radiation dominant $aT^4/3=p$)
- ejectaの膨張率 \dot{V}/V がcooling rateを与える: R_{\star}/v_{\max}



SN Shock Breakout Light Curves



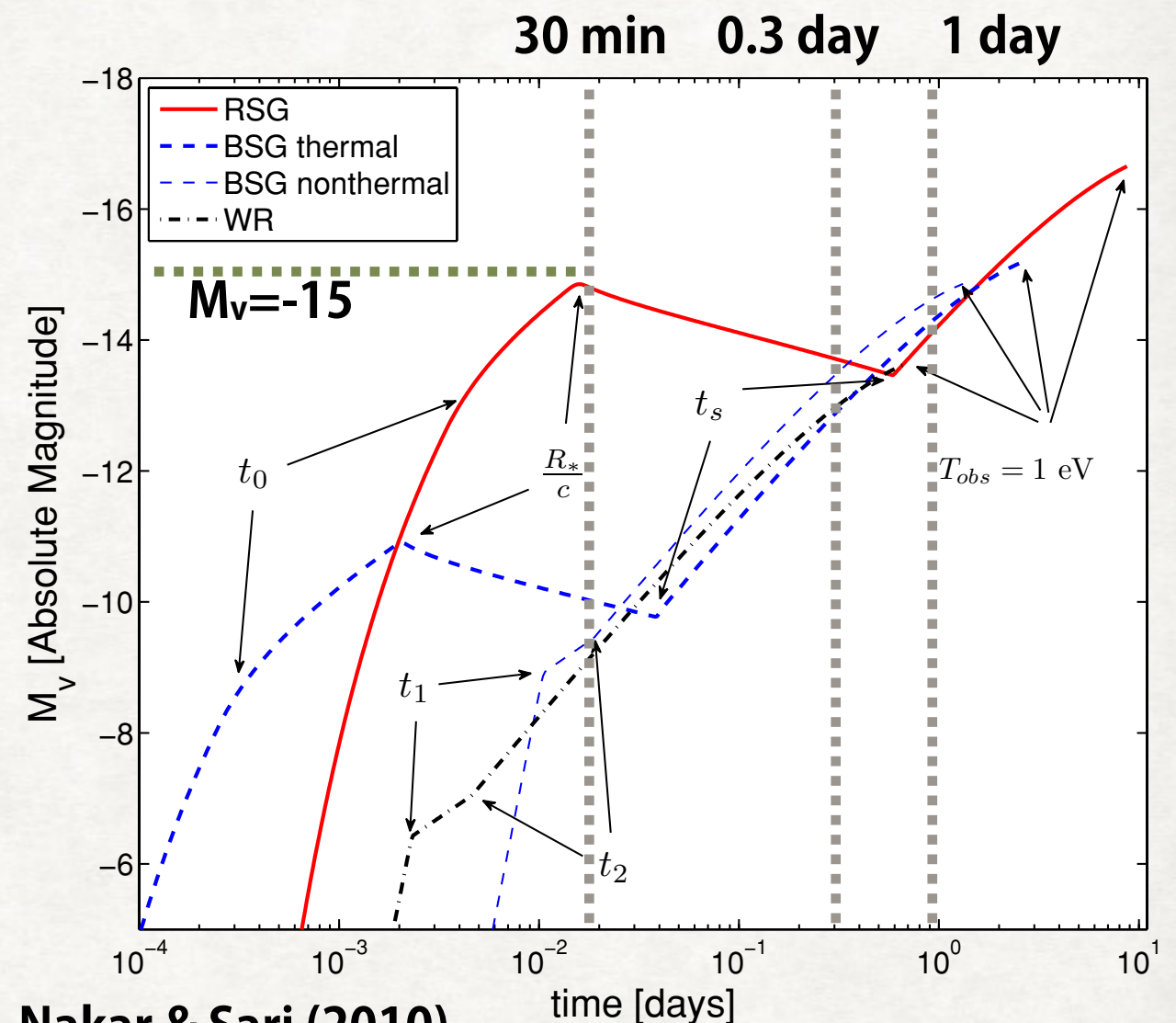
$M_{\text{presn}}=10M_{\odot}$, $E_{\text{exp}}=10^{51}$ ergを仮定した場合の各タイムスケール

	R_{\star}	$R_{\star}/(E/M_{\star})^{1/2}$	R_{\star}/c	R_{\star}/v_{\max}
WR (type Ibc)	$\sim 1R_{\odot}$	~ 200 sec	$\sim 2\text{-}3$ sec	<10 sec
BSG (1987A)	$\sim 50R_{\odot}$	$\sim 2\text{-}3$ hrs	~ 100 sec ~ 2 min	15-20 min
RSG (type II)	$\sim 500R_{\odot}$	~ 1 day	~ 15 min	~ 10 hr ~ 0.3 days

見積もりは Matzner & McKee (1999)参照

SB light curve in a fixed band

- あるバンドでの観測を考えると、もうすこし複雑になる
- Nakar&Sari (2010): analytic SB light curve model
- cooling envelope phase が 2nd peak をつくる



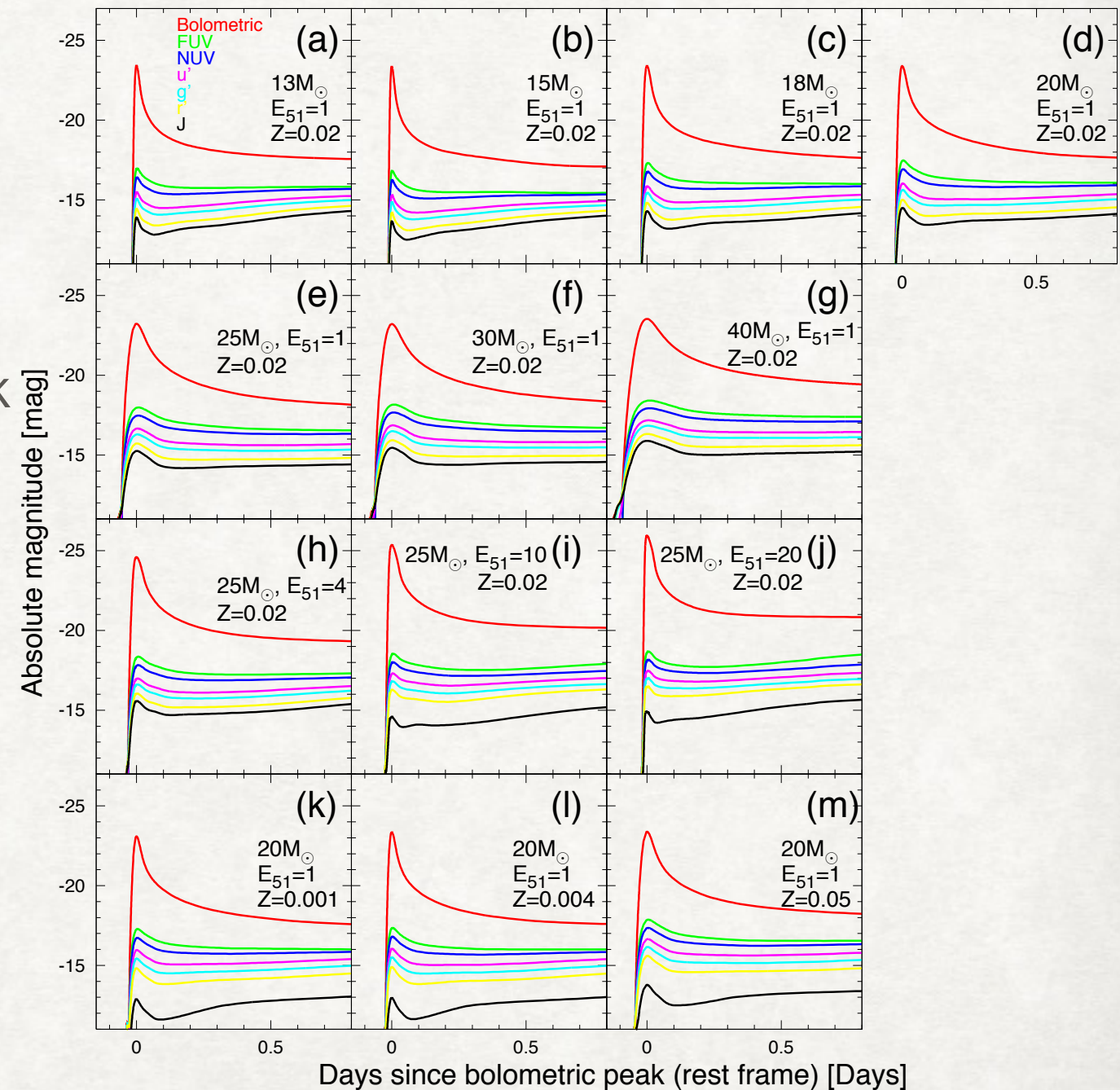
Nakar & Sari (2010)

$$L_{\text{RSG}} = \begin{cases} 10^{44} \text{ erg s}^{-1} M_{15}^{-0.37} R_{500}^{2.46} E_{51}^{0.3} t_{\text{hr}}^{-4/3} & t < t_s \\ 3 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1} M_{15}^{-0.87} R_{500} E_{51}^{0.96} t_d^{-0.17} & t > t_s, \end{cases}$$

$$T_{\text{RSG}} = \begin{cases} 10 \text{ eV} M_{15}^{-0.22} R_{500}^{0.12} E_{51}^{0.23} t_{\text{hr}}^{-0.36} & t < t_s \\ 3 \text{ eV} M_{15}^{-0.13} R_{500}^{0.38} E_{51}^{0.11} t_d^{-0.56} & t_s < t. \end{cases}$$

SB light curve in a fixed band

- あるバンドでの観測を考えると、もうすこし複雑になる
- Nakar&Sari (2010): analytic SB light curve model
- cooling envelope phase が 2nd peak をつくる

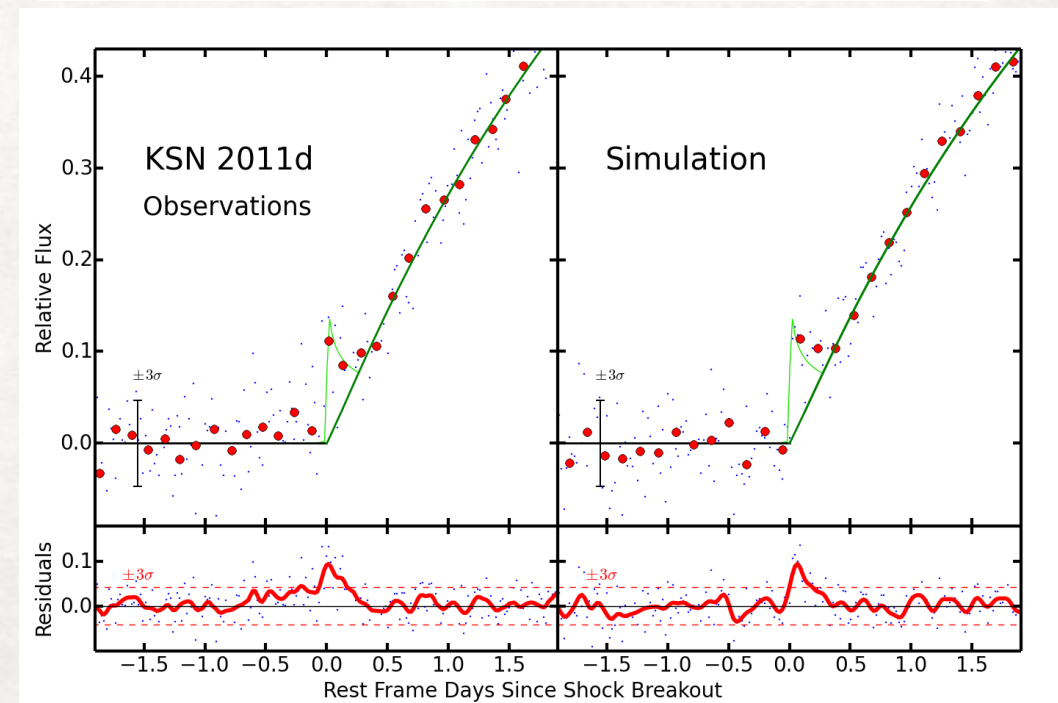
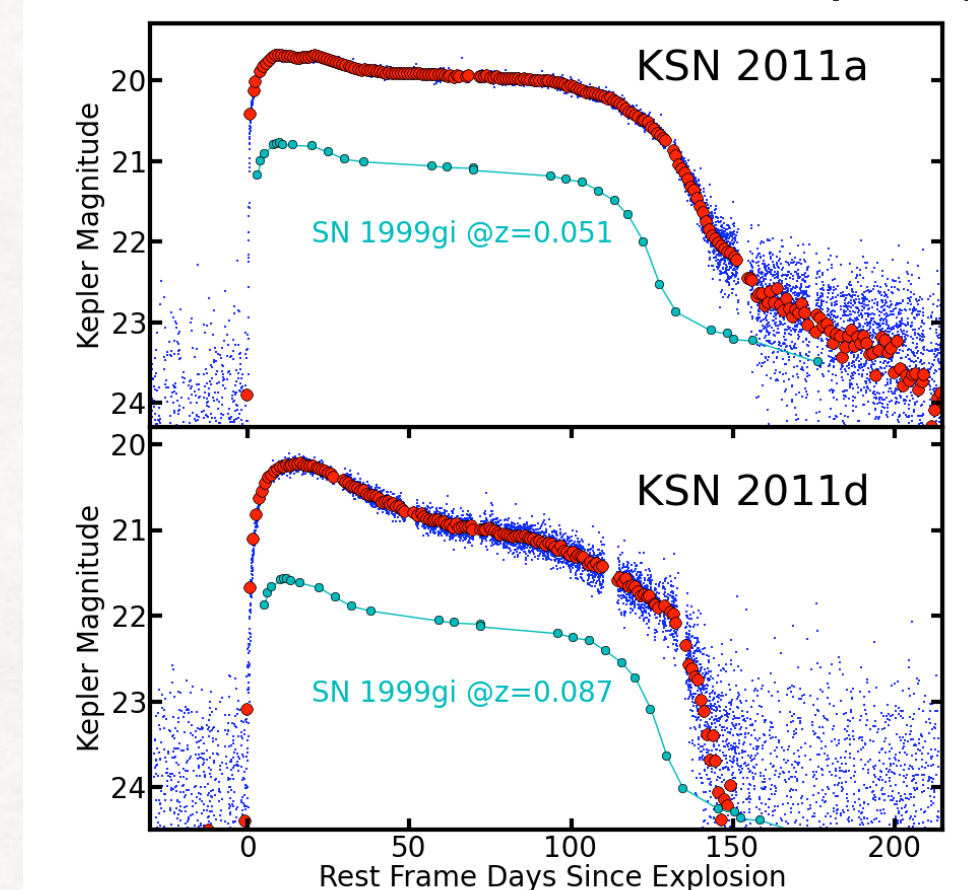


Recent Works

Kepler Observation: KSN 2010d

- Kepler宇宙望遠鏡での30 min cadenceでの観測(Garnavich+2016)
- photometry (430-890nm FWHM)
- 赤い側での観測なので、shock breakoutは比較的暗い
- 30 minごとのデータ点を2-3hoursでbinningし直している
- $280R_{\odot}$ for KSN 2011a, $490R_{\odot}$ for KSN 2011d

Garnavich+(2016)



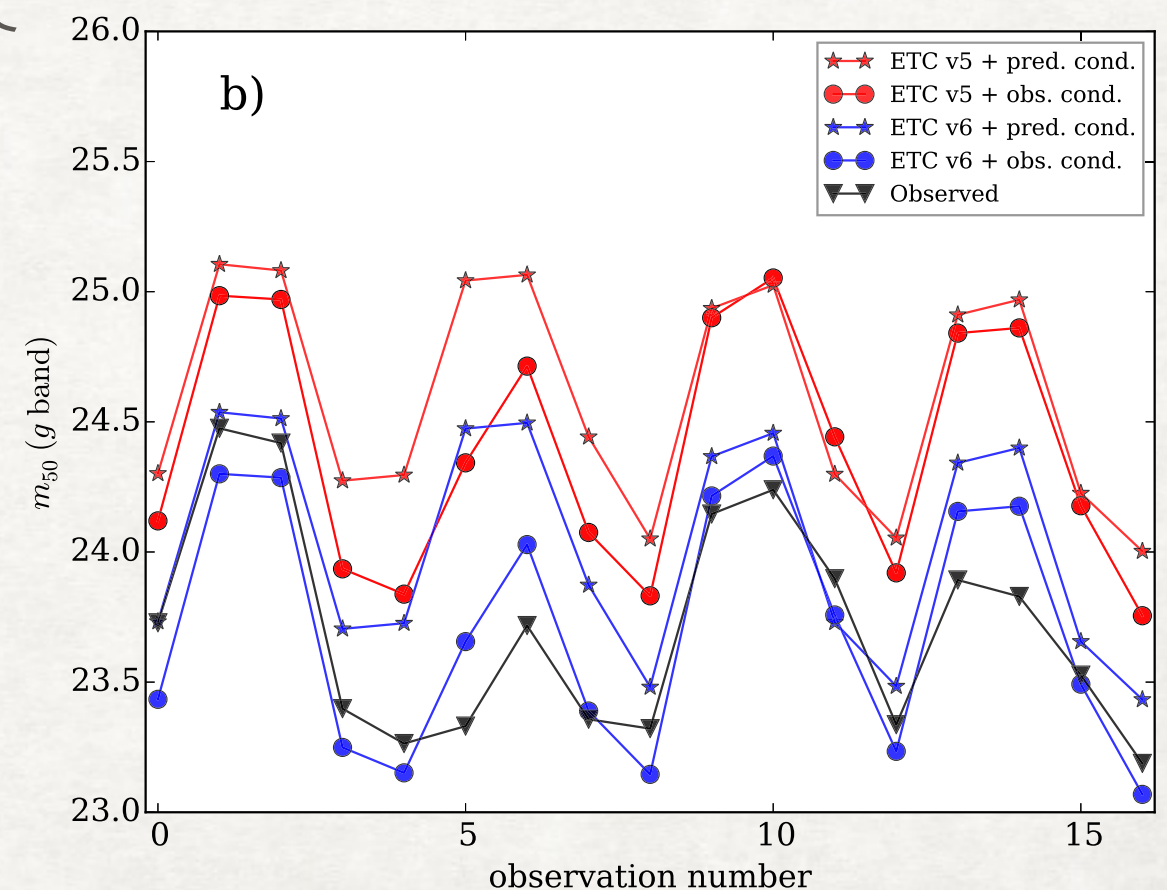
High Cadence Transient Survey (HiTS)

- Förster et al. (2016): Dark Energy Camera (DECam:4m)によるサーベイ (2hr cadence)
- SB non detection (2013-2015)
- 検出できなかったことから、光度曲線のモデルやRSGとして爆発する星への制限について議論できる

Table 1

Selection of Large-field-of-view (FOV) Optical Astronomical Cameras

Camera	Area (m ²)	Field of View (deg ²)	Etendue (m ² deg ²)	Pixels (Mpix)
<i>Kepler</i>	0.7	115	81.5	94.6 ^a
HSC ^b	52.8	1.5	79.2	870
DECam	11.3	3.0	33.9	520
PanSTARRS-1 ^c	2.5	7.0	17.5	1400
iPTF ^d	1.1	7.8	8.6	92
SkyMapper	1.4	5.7	8.2	256
KMTNet ^e	2.0	4.0	8.	340
QUEST ^f	0.8	8.3	6.5	40.3
LSST ^g	35.7	9.6	344.2	3200
ZTF ^h	1.1	47	51.7	576

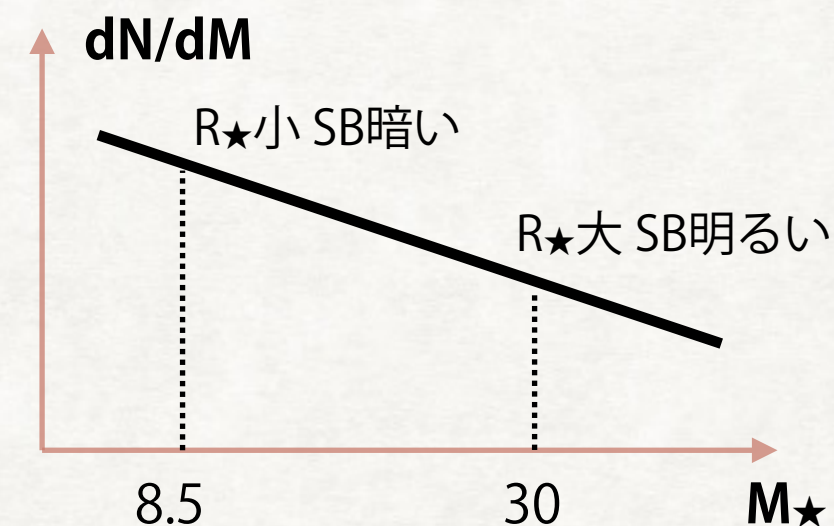


Förster+(2016)

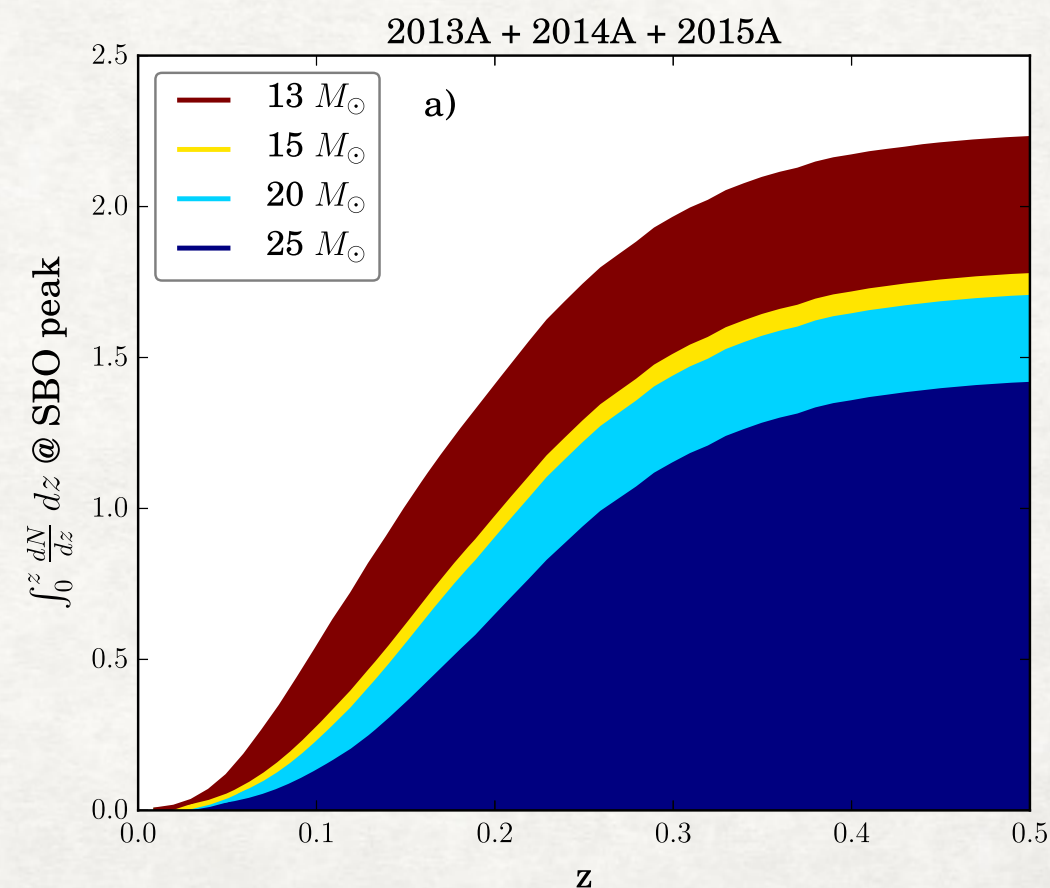
High Cadence Transient Survey (HiTS)

- Förster et al. (2016): Dark Energy Camera (DECam:4m)によるサーベイ (2hr cadence)
- SB non detection (2013-2015)
- 検出できなかったことから、光度曲線のモデルやRSGとして爆発する星への制限について議論できる

SBO Models IMF dist.	Tominaga et al. (2011)		Nakar & Sari (2010)	
	min	max	min	max
M16.5	0.40	0.60	0.003	0.04
M30	0.05	0.21	10^{-7}	10^{-4}
RSG _{MW}	0.01	0.16	10^{-11}	10^{-5}
RSG _{MC}	0.03	0.09	10^{-9}	10^{-6}
13 M_{\odot}	0.15	0.36	0.01	0.06
15 M_{\odot}	0.34	0.54	0.03	0.14
20 M_{\odot}	0.01	0.06	10^{-12}	10^{-7}
25 M_{\odot}	10^{-14}	10^{-8}	10^{-36}	10^{-19}



8.5-30 M_{\odot} stars+ Tominaga model

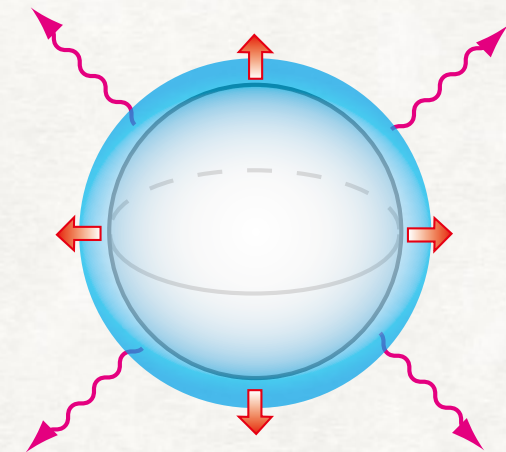


Förster+(2016)

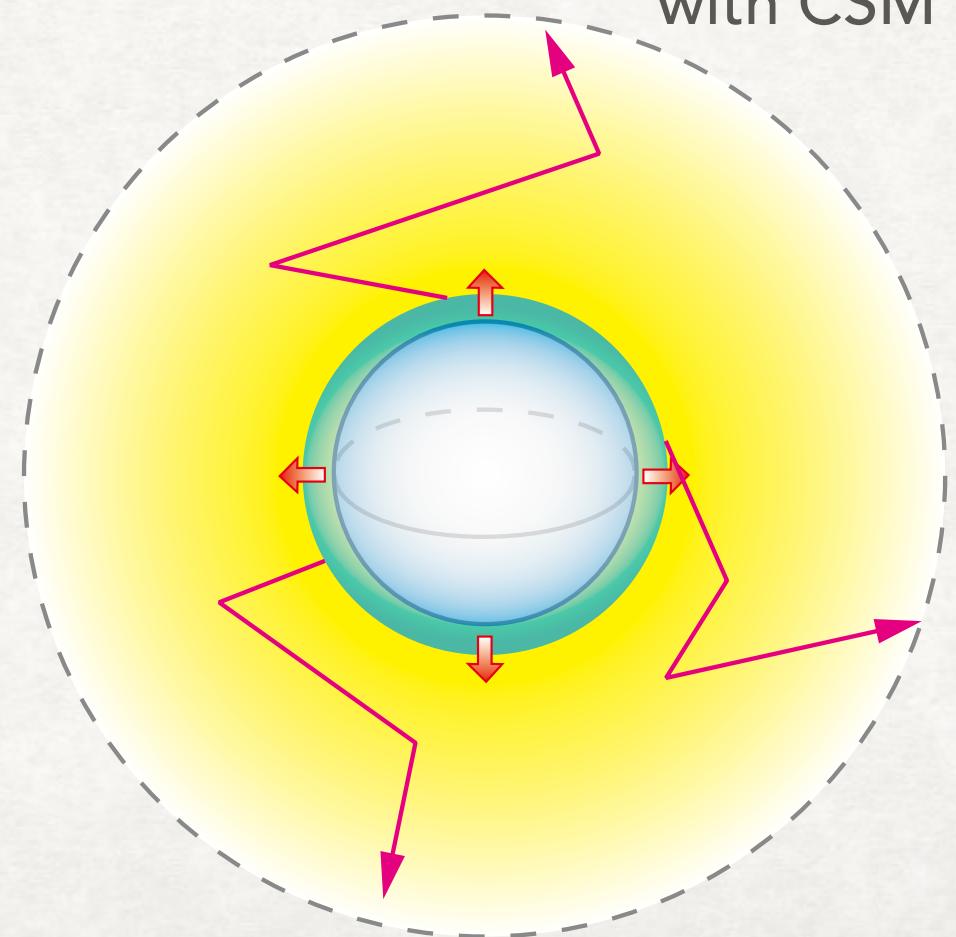
Shock breakout in a thick wind?

- 星の表面とは?
- 爆発直前にoptically thickなwindに囲まれている可能性
- photonがCSM中で余分に散乱される → SBの継続時間が長くなる
- +SN ejectaのkinetic energyの一部がCSMとの衝突でradiationに変わる → 明るくなる
- 爆発直前の星周囲の状況は理論的にも観測的にもほとんど分かっていない

without CSM

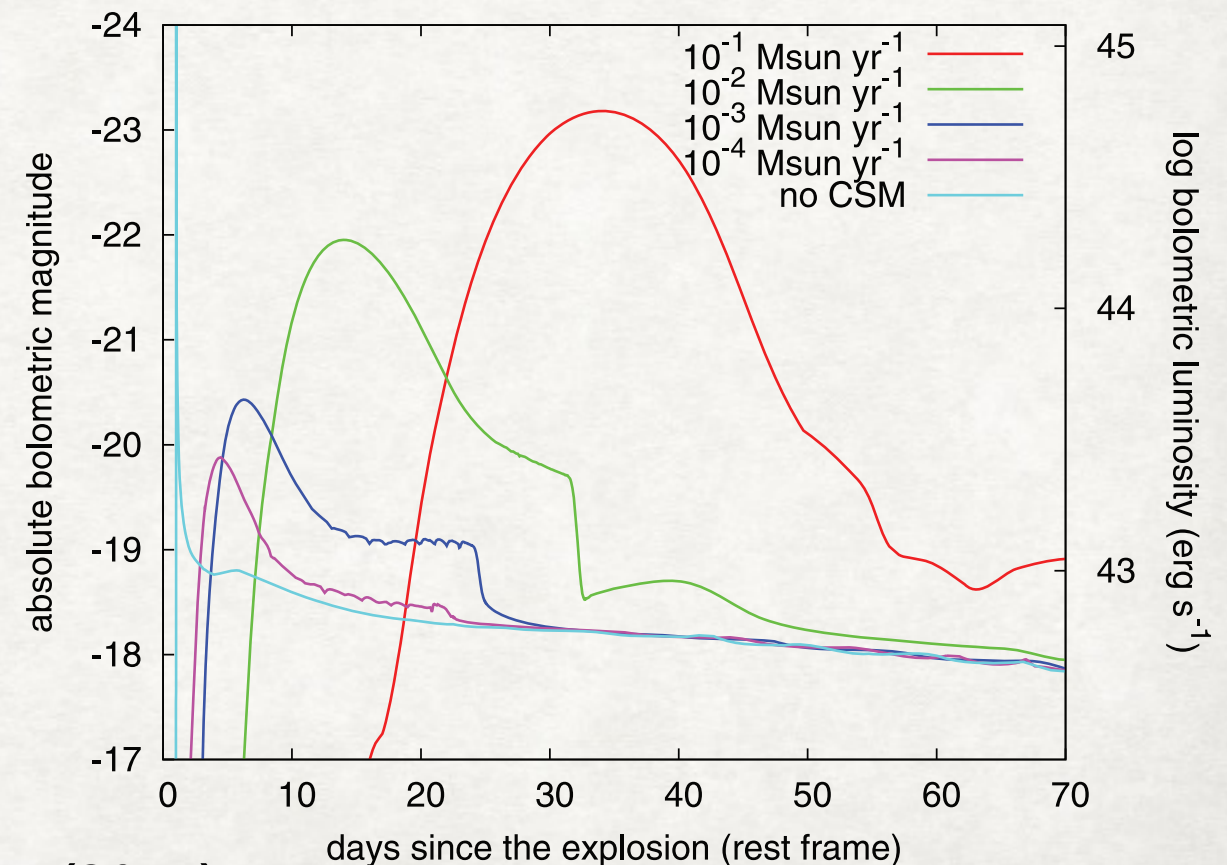
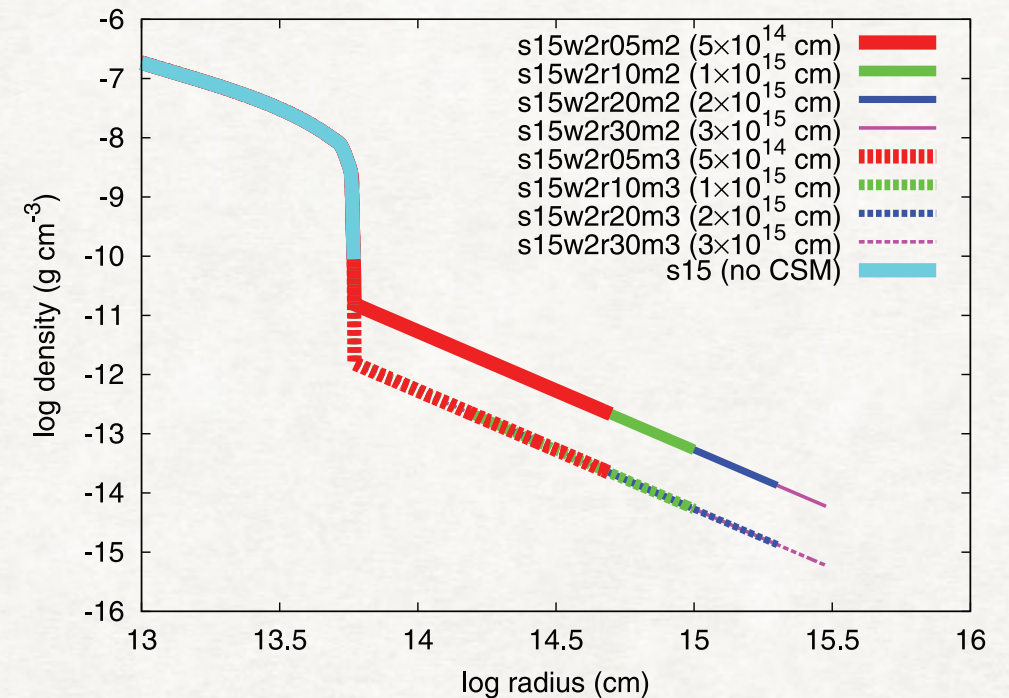


with CSM



Shock breakout in a thick wind?

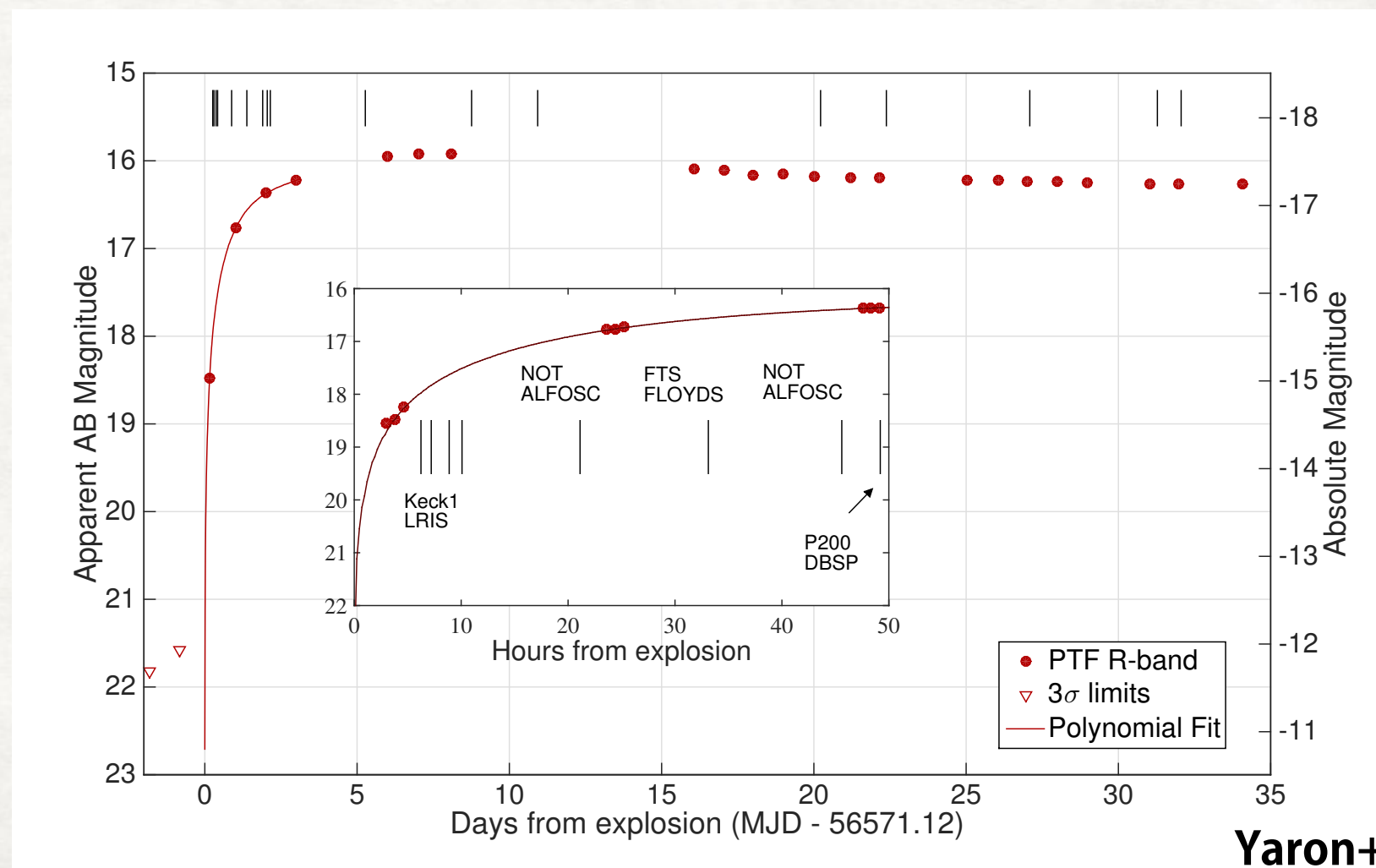
- 星の表面とは?
- 爆発直前にoptically thickなwindに囲まれている可能性
- photonがCSM中で余分に散乱される → SBの継続時間が長くなる
- +SN ejectaのkinetic energyの一部がCSMとの衝突でradiationに変わる → 明るくなる
- 爆発直前の星周囲の状況は理論的にも観測的にもほとんど分かっていない



Moriya+(2011)

Flash spectroscopy

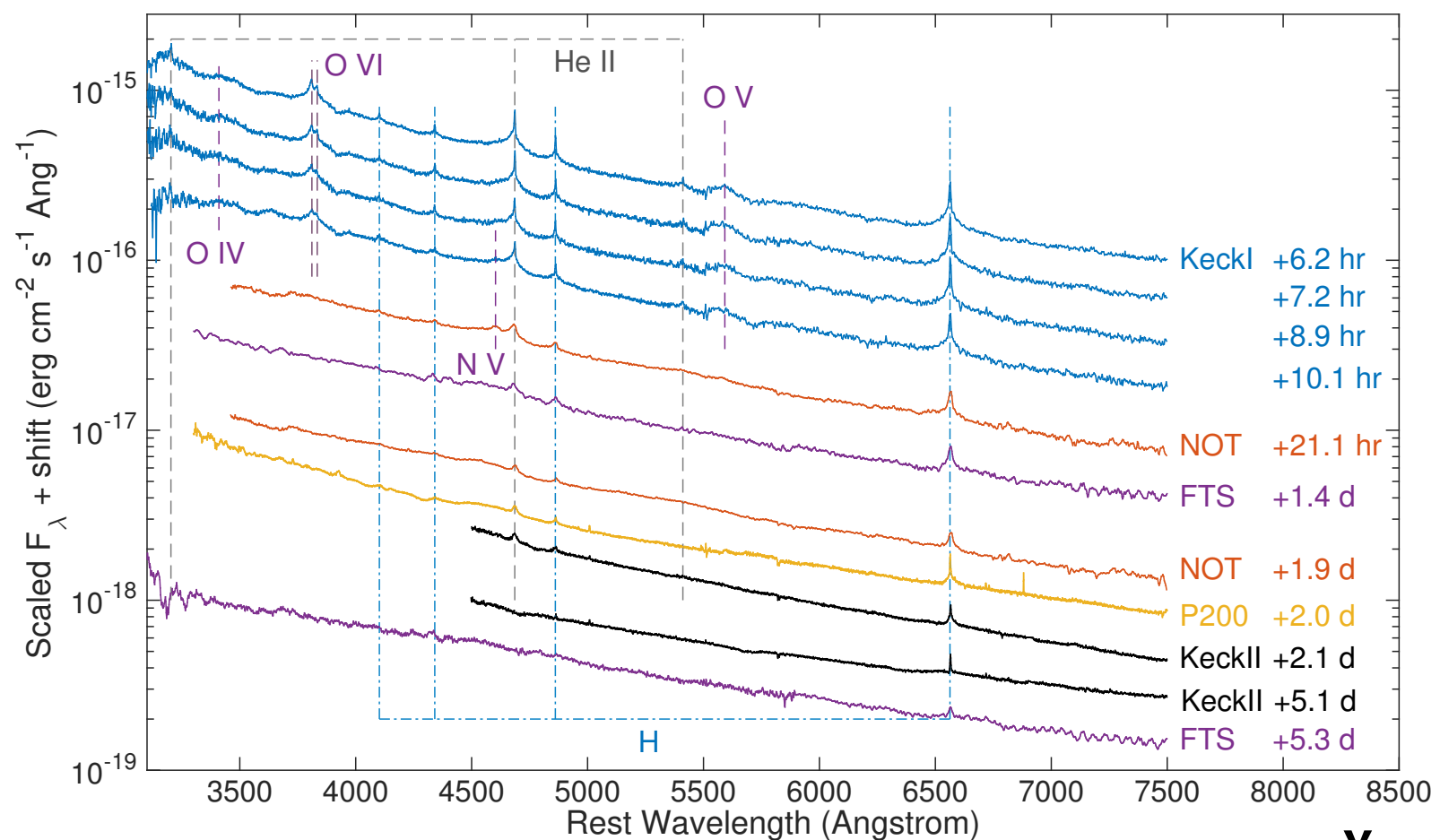
- Gal-yam et al. (2014), Yaron et al.(2017): 超新星発見から<10-20 hoursで spectroscopy
- SB photonsによってphoto-ionizeされたCSMからのemission
- typicalなtype II-P SN 2013fsに、 $10^{-3}M_{\odot}/\text{yr}$ のdense CSMが付随していることを発見(Yaron+)



Yaron+(2017)

Flash spectroscopy

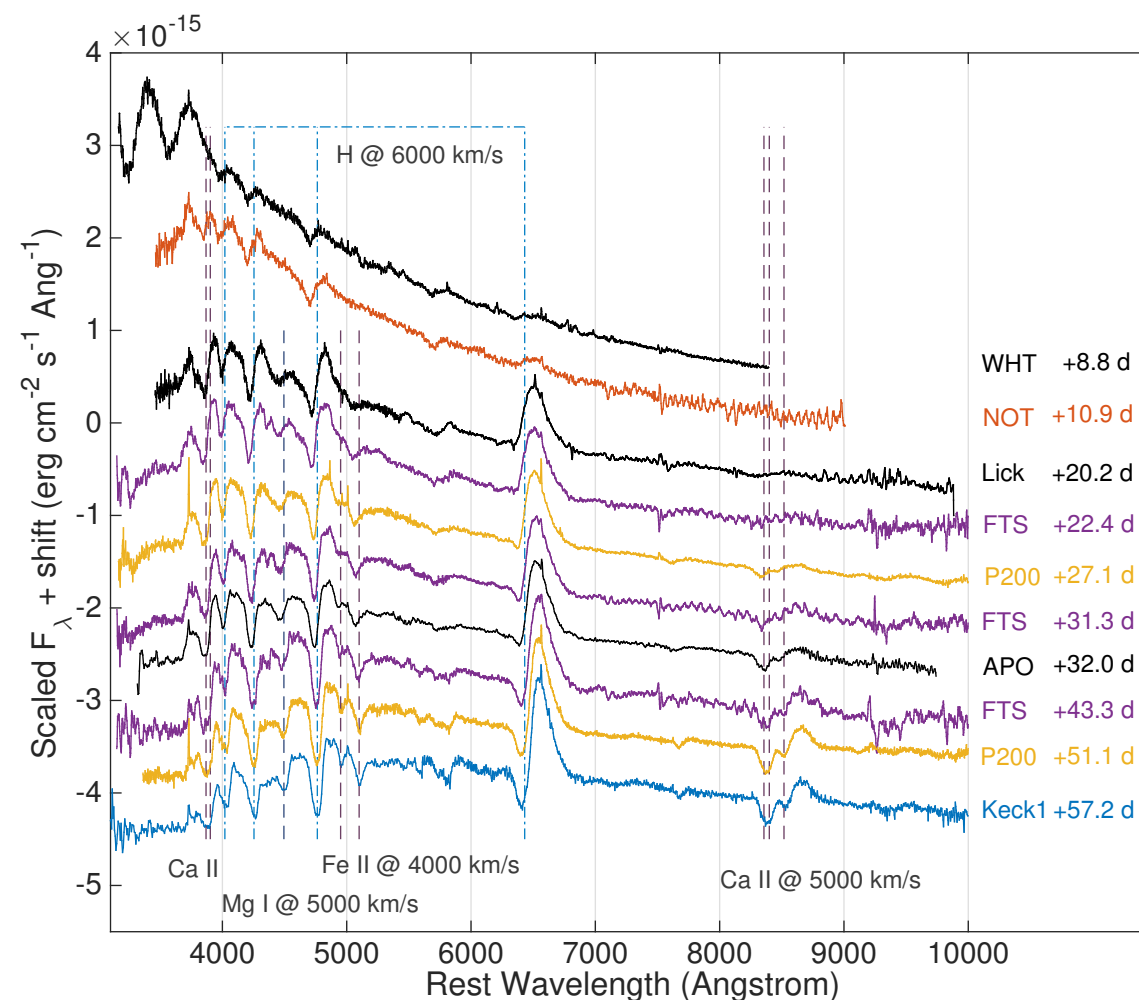
- Gal-yam et al. (2014), Yaron et al.(2017): 超新星発見から<10-20 hoursで spectroscopy
- SB photonsによってphoto-ionizeされたCSMからのemission
- typicalなtype II-P SN 2013fsに、 $10^{-3}M_{\odot}/\text{yr}$ のdense CSMが付随していることを発見(Yaron+)



Yaron+(2017)

Flash spectroscopy

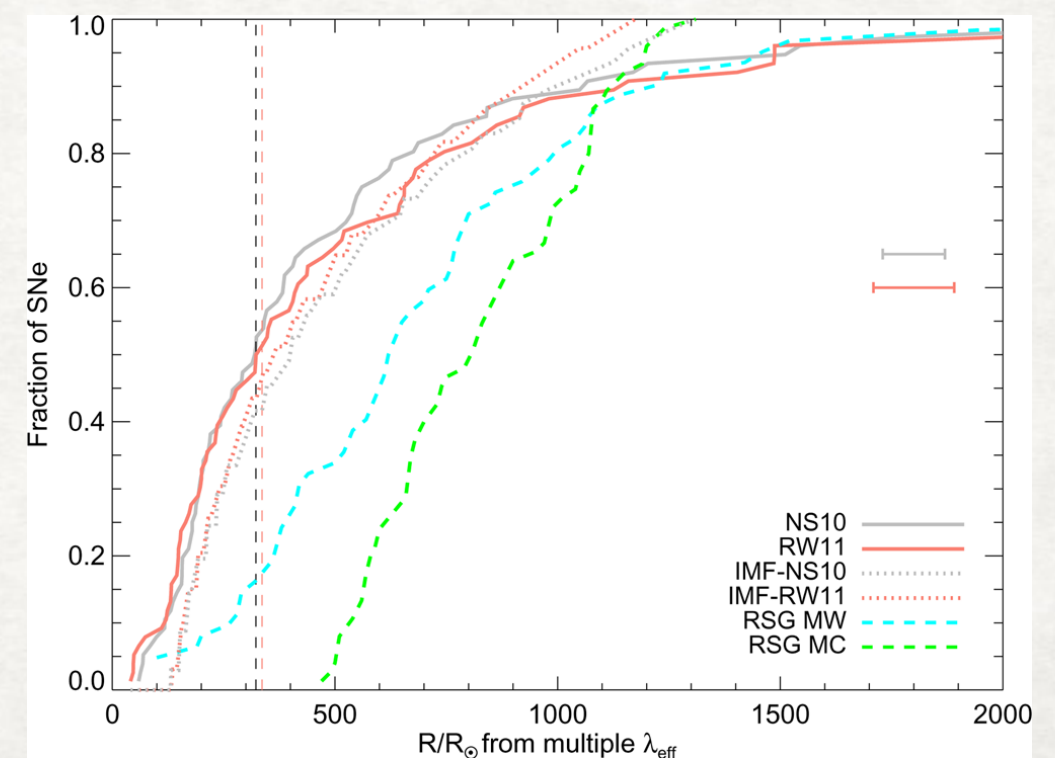
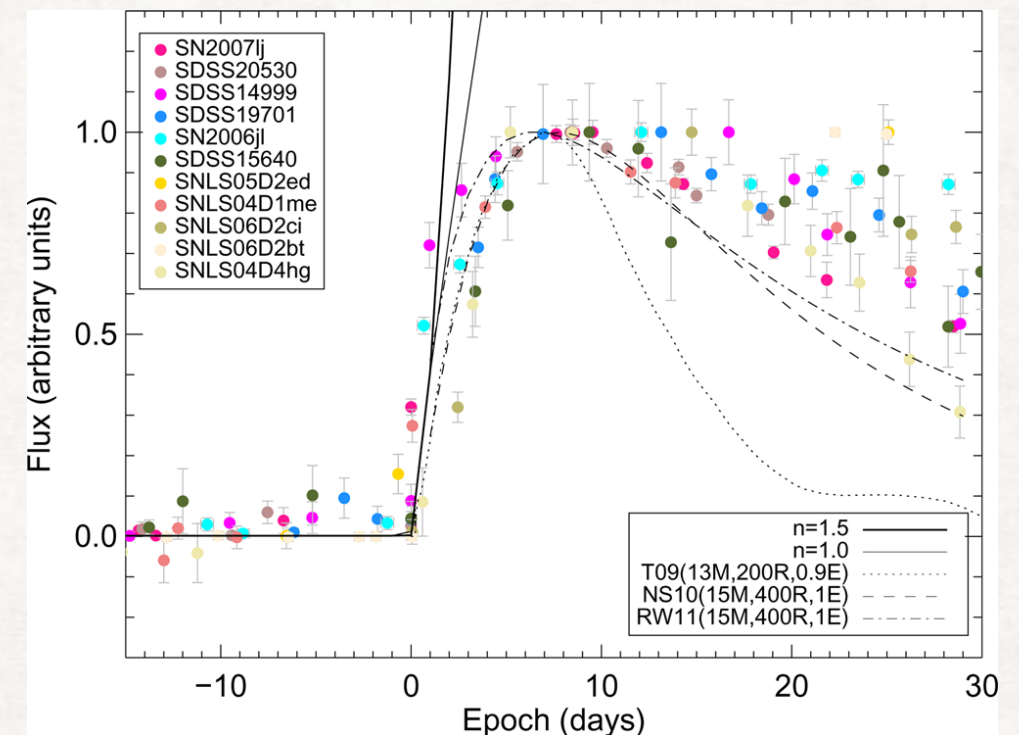
- Gal-yam et al. (2014), Yaron et al.(2017): 超新星発見から<10-20 hoursで spectroscopy
- SB photonsによってphoto-ionizeされたCSMからのemission
- typicalなtype II-P SN 2013fsに、 $10^{-3}M_{\odot}/\text{yr}$ のdense CSMが付随していることを 発見(Yaron+)



Yaron+(2017)

Rise-time of type IIP SNe

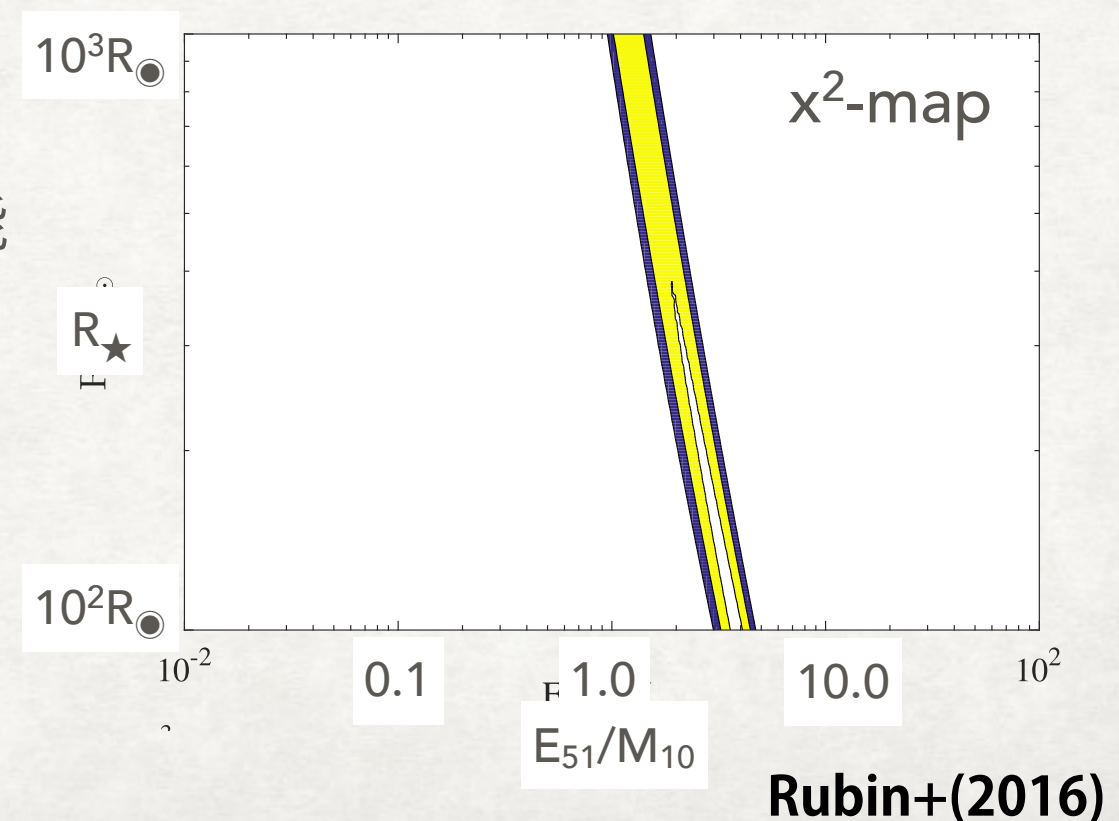
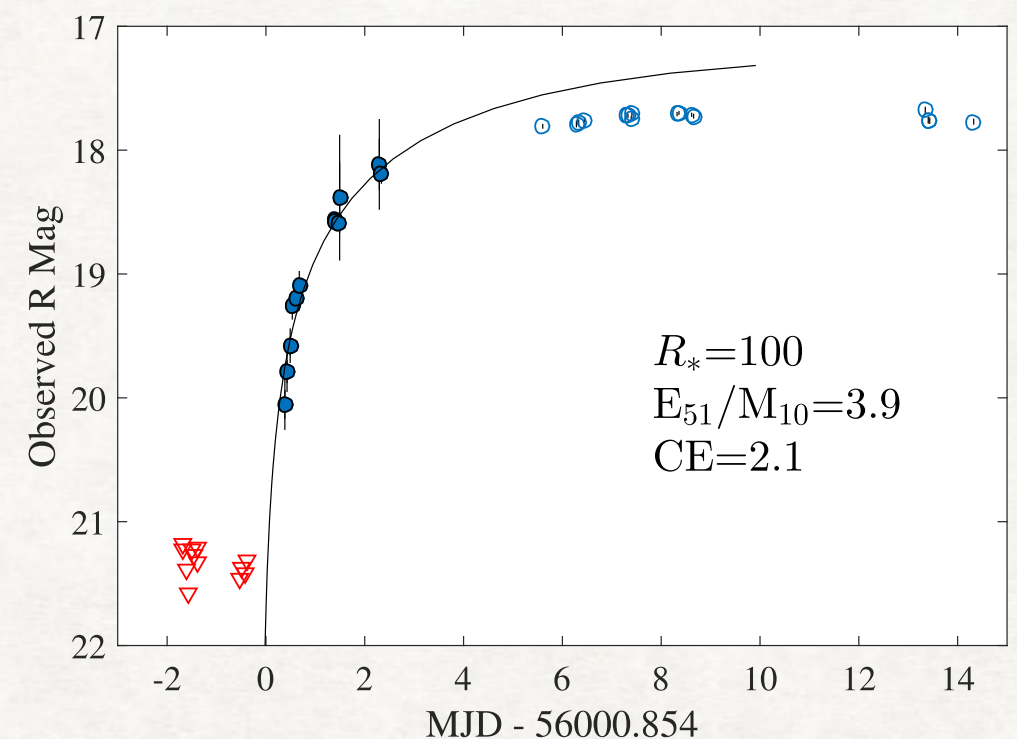
- Gall et al. (2015), Gonzalez-Gaitan et al. (2015), Rubin et al. (2016): type II SNeの rising partの系統的な解析
- cooling envelope emissionを仮定して見積もった半径(median < $400 R_{\odot}$)が、Galactic RSGよりも系統的に小さい (Gonzalez-Gaitan+)
- r-bandだけだと R_{\star} がうまく決まらない可能性 (Rubin+)
- また、 $t > 4\text{days}$ のデータを使うと半径を過小評価する可能性 (Rubin+)



Gonzalez-Gaitan+(2015)

Rise-time of type IIP SNe

- Gall et al. (2015), Gonzalez-Gaitan et al. (2015), Rubin et al. (2016): type II SNeの rising partの系統的な解析
- cooling envelope emissionを仮定して見積もった半径(median < $400 R_{\odot}$)が、Galactic RSGよりも系統的に小さい (Gonzalez-Gaitan+)
- r-bandだけだと R_{\star} がうまく決まらない可能性 (Rubin+)
- また、 $t > 4$ daysのデータを使うと半径を過小評価する可能性 (Rubin+)



Summary