

# 大質量星の回転と 突発天体

榎山和己（東大RESCEU）

# 今日の内容

- 導入
- ブラックホール形成と突発天体
- 中性子星形成と突発天体
- まとめ

導入

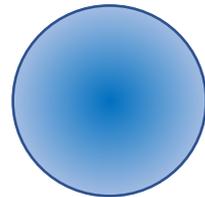
# 考えること

- どのような星がどのようなコンパクト天体を形成？
- 連星系の場合、どのようなコンパクト連星？
- 大質量星の回転(進化)は鍵になるだろう.

# どういふ星がどういふコンパクト天体を形成？

Supernova shock is stalled or not?  
How much material fallback on proto-NS?

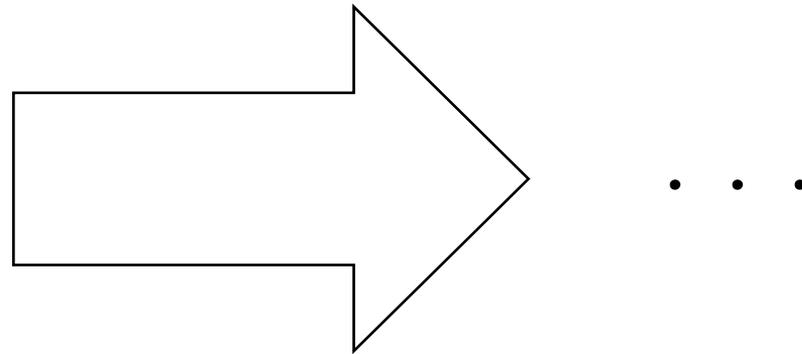
Red supergiant  
(RSG)



Blue supergiant  
(BSG)



Wolf-Rayet star  
(WR)



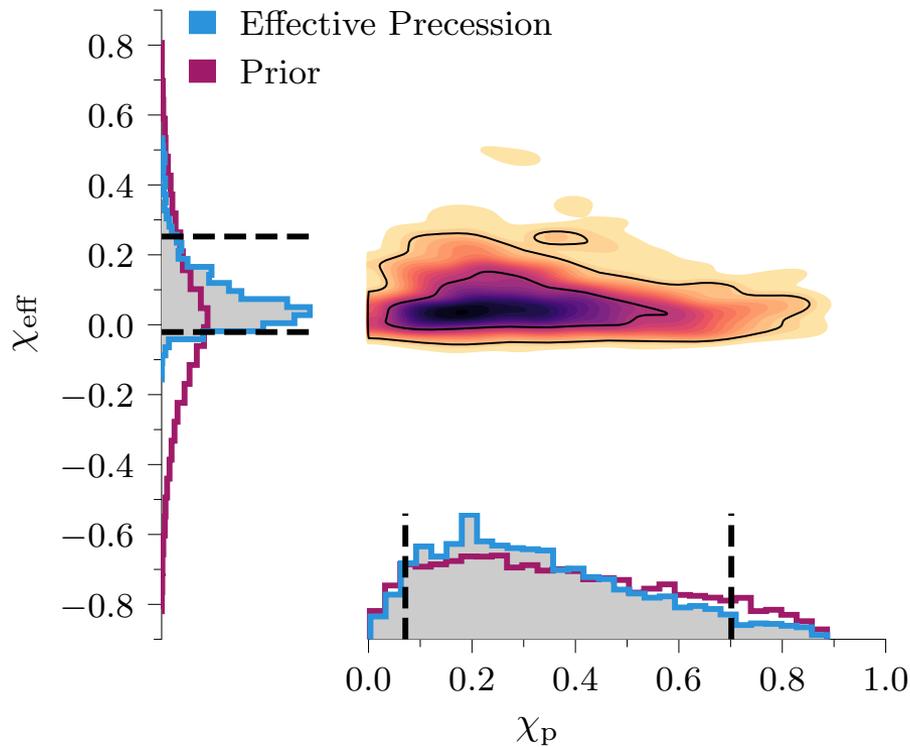
The key will be inner density structure within

$$r \sim 1000 \text{ km}, M_r \sim 2-3 M_{\odot}$$

O'Connor & Ott 2011; Ugliano et al. 2012;  
Horiuchi et al. 2014; Pejcha & Thompson 2015;  
Sukhbold et al. 17

# ブラックホールのスピン – 観測

e.g., GW 170608 (adLIGO 17)

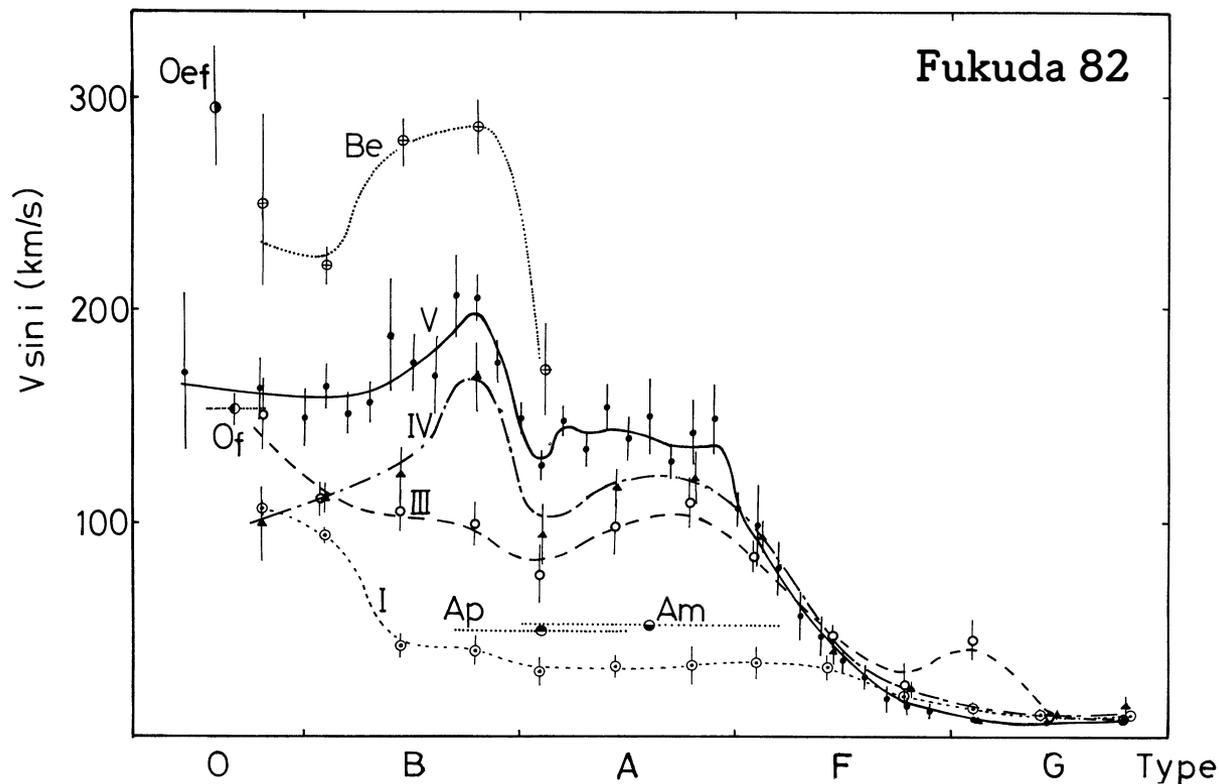


これまでに見つかったものは全部、  
両方のブラックホールがブンブン  
回っている感じではなさそう。

電磁波を使う方法もあるけれど  
(鉄輝線、潮汐破壊、シャドー etc)  
まだモデルの不定性が大きそう。

# 大質量星のスピンの観測

- 測られているのは主に近傍のOB星.
- だいたいみんな結構速く(ケプラーの>10%)回っている.



# 大質量星→BHのスピンの理論

- 大質量星とそのスピンの進化
  - 星風によるloss
  - 連星系の場合、連星相互作用によるloss & gainが不定性の温床。また、
  - 星内部の角運動量輸送もよくわからない…。
- 重力崩壊時の角運動量プロファイルがわかれば、BHのスピンの理論は“大雑把には”わかる。
  - 吹っ飛ぶ角運動量を正確に見積もるのは難しい。

# Ex) Stellar evolution calculations of single massive stars with MESA

$$V_{\text{surf, ini}} = 200 \text{ km/s}$$

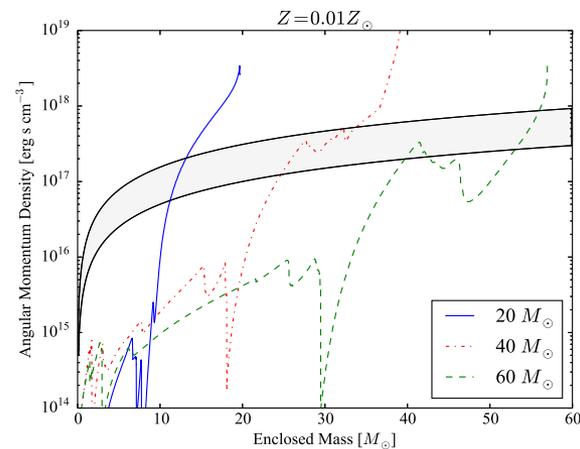
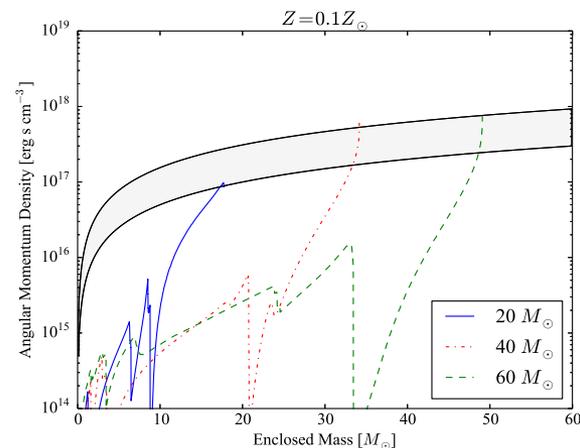
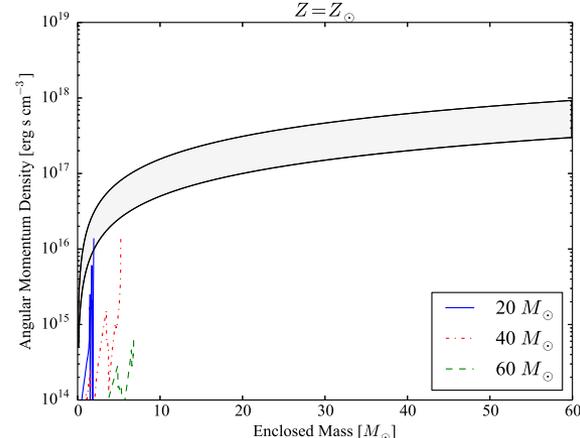
$$M_{\text{ZAMS}} = 20, 40, 60 M_{\text{sun}}$$

$$Z = 1, 0.1, 0.01 Z_{\text{sun}}$$

金属量が多い → 死ぬときにはゆっくり回っている。  
 右の場合、 $Z = Z_{\text{sun}}$ はみんなWR星として死ぬ。

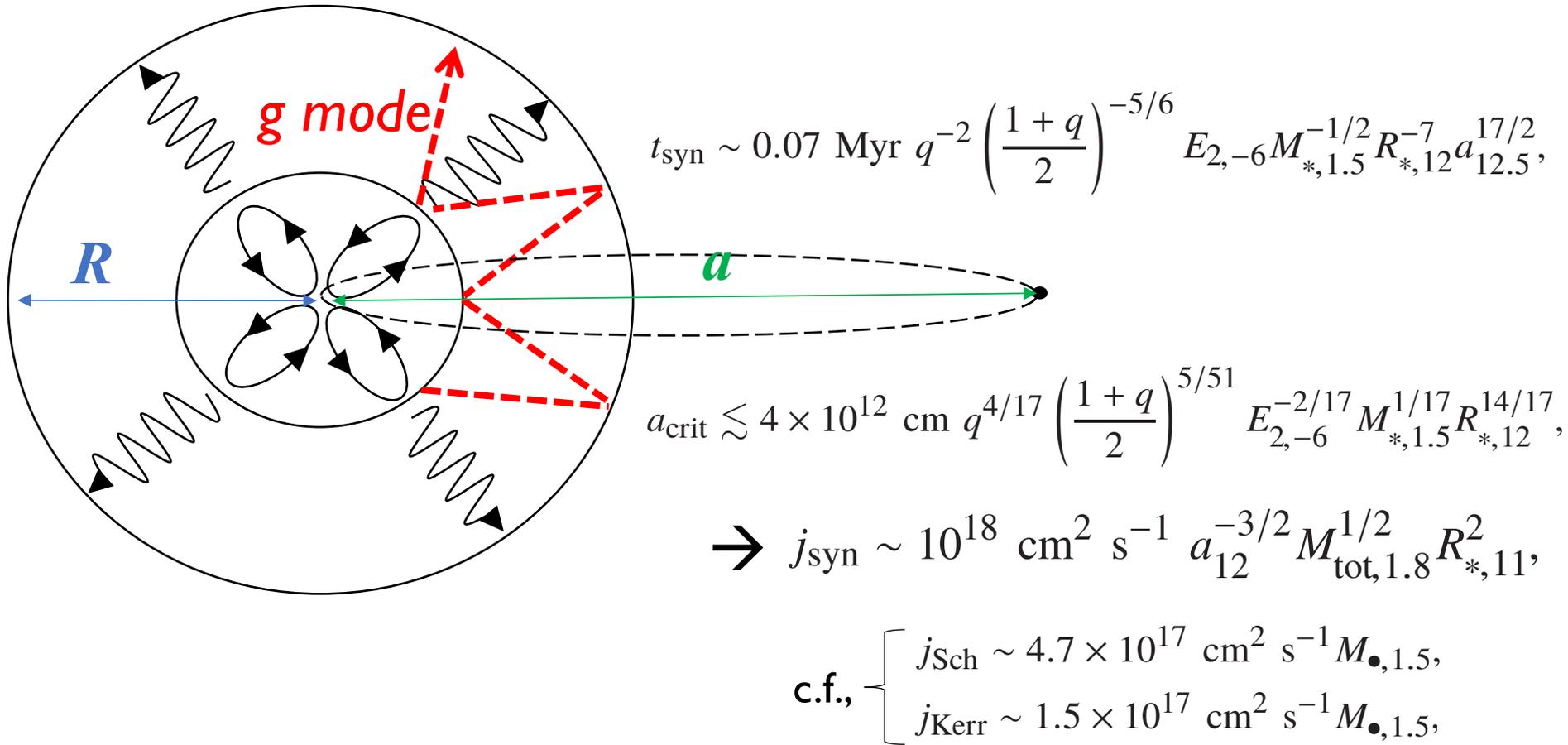
金属量が少ない → 死ぬときも割と速く回っている。  
 右の場合、 $Z < 0.1 Z_{\text{sun}}$ は青色、赤色巨星として死ぬ。  
 そのほとんどで（全部落ちたとすると） $a_{\text{BH}} \sim 1$ 。  
 外層から～太陽質量の降着円盤ができる。

(注) 回転星のwind mass lossは不定性がでかい。  
 定量的な議論は … .



# Tidal interaction

The convective core + rad. envelope can be locked by the dynamical tide (Zahn 83).



Note: g mode dumping is non-trivial, especially when including the wind mass loss.

# 大質量星→BHのスピンの理論

- 大質量星とそのスピンの進化
  - 星風によるloss
  - 連星系の場合、連星相互作用によるloss & gainが不定性の温床. また、
  - 星内部の角運動量輸送もよくわからない….
- 重力崩壊時の角運動量プロファイルがわかれば、BHのスピンの大雑把にはわかる.
  - 吹っ飛ぶ角運動量を正確に見積もるのは難しい.

# 考えること

- どういう星がどういふコンパクト天体を形成？  
形成時にどういふ突発天体を伴う？
- 連星系の場合、どういふコンパクト連星？  
合体時にどういふ突発天体を伴う？
- 大質量星の回転(進化)が鍵だろう。

ブラックホール形成と突発天体

# ブラックホール形成と突発天体

- 回転が
  - 遅い場合
  - まあまあ速い場合
  - 速い場合

暗いけど多い？

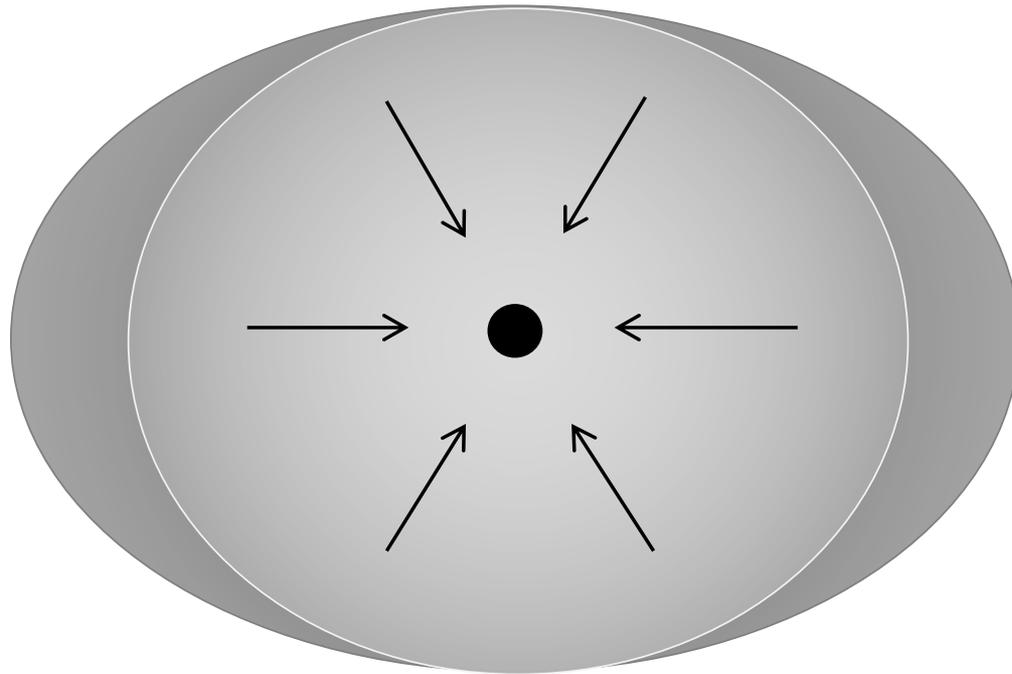


明るいけど少ない？

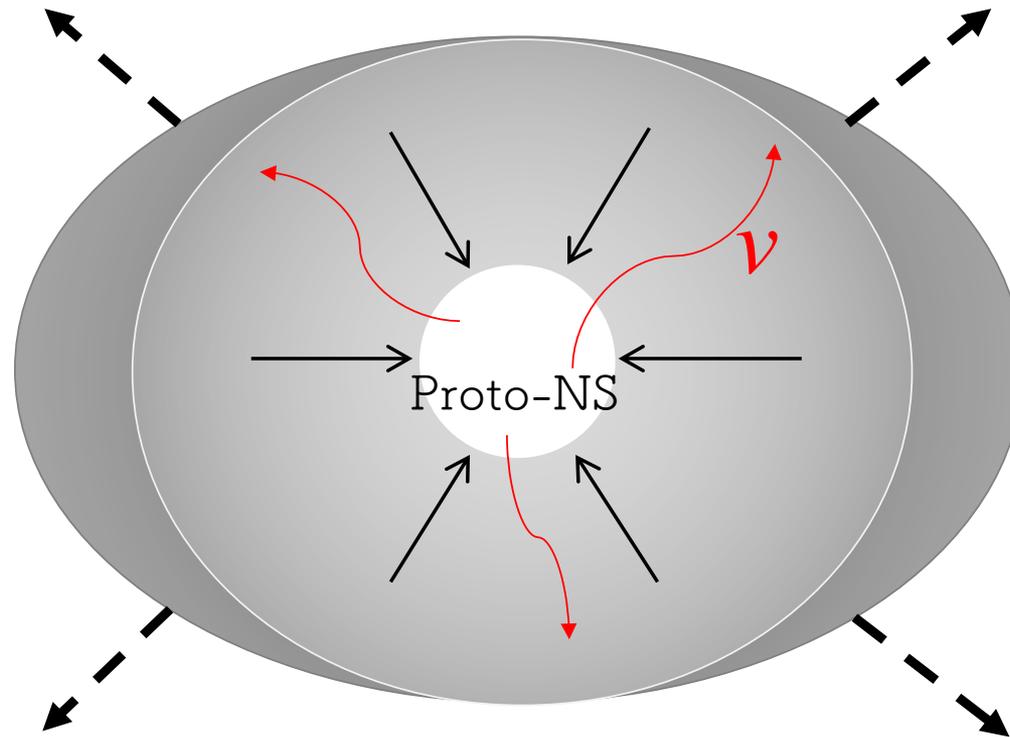
# ブラックホール形成と突発天体

- 回転が
  - 遅い場合
  - まあまあ速い場合
  - 速い場合

Always just vanishing?

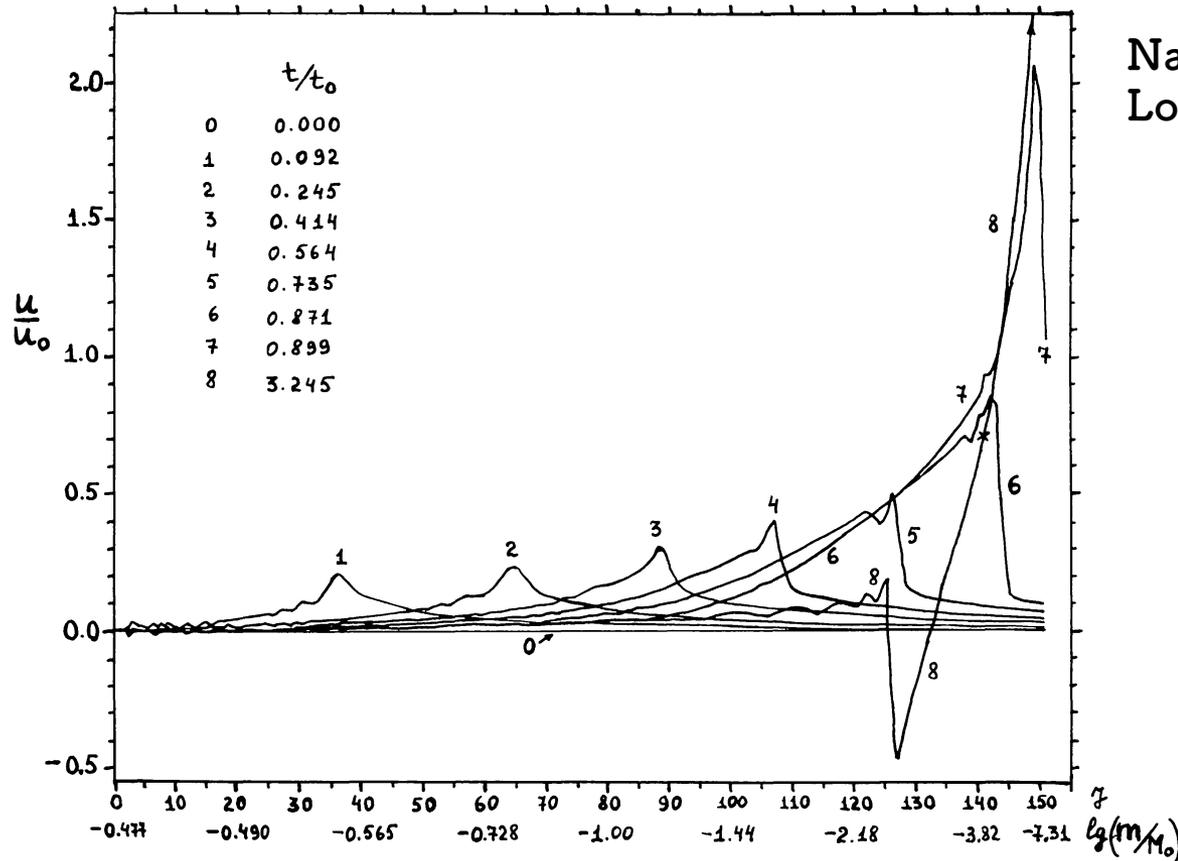


Probably not.



A fraction of outer envelope can be ejected due to a gravitational mass loss of the core through neutrino emission in the proto-NS phase.

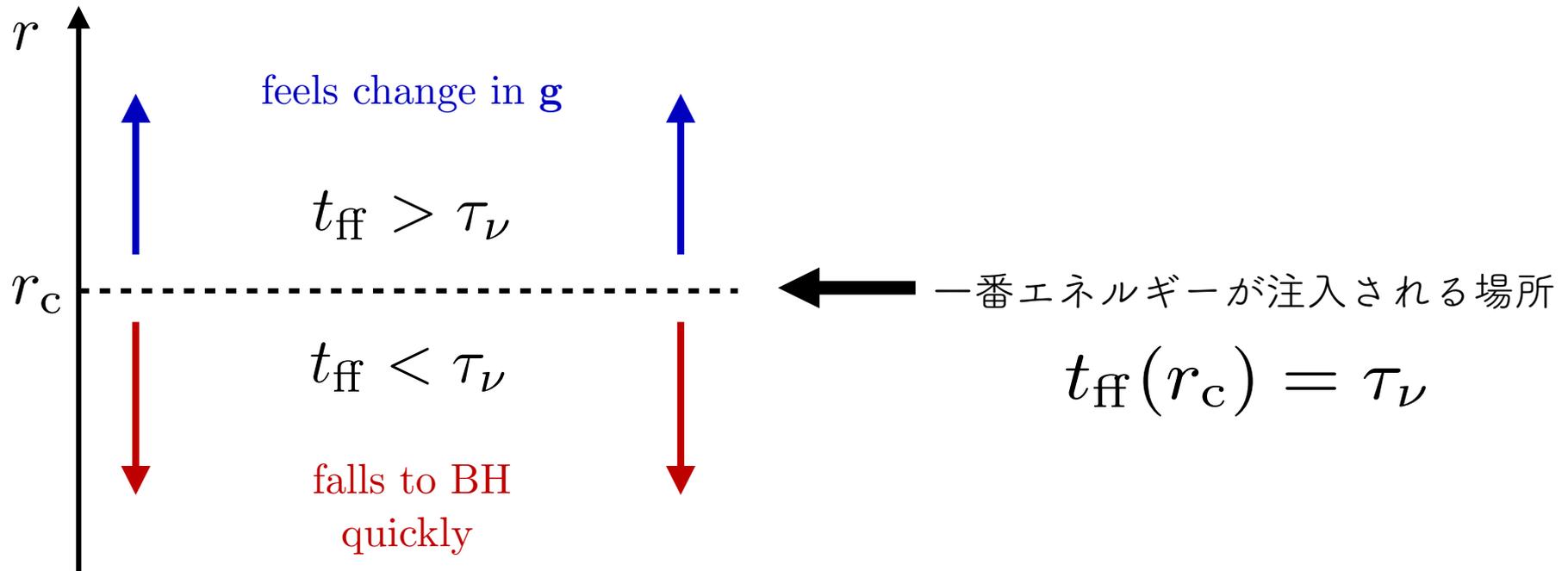
# The Nadyozhin effect



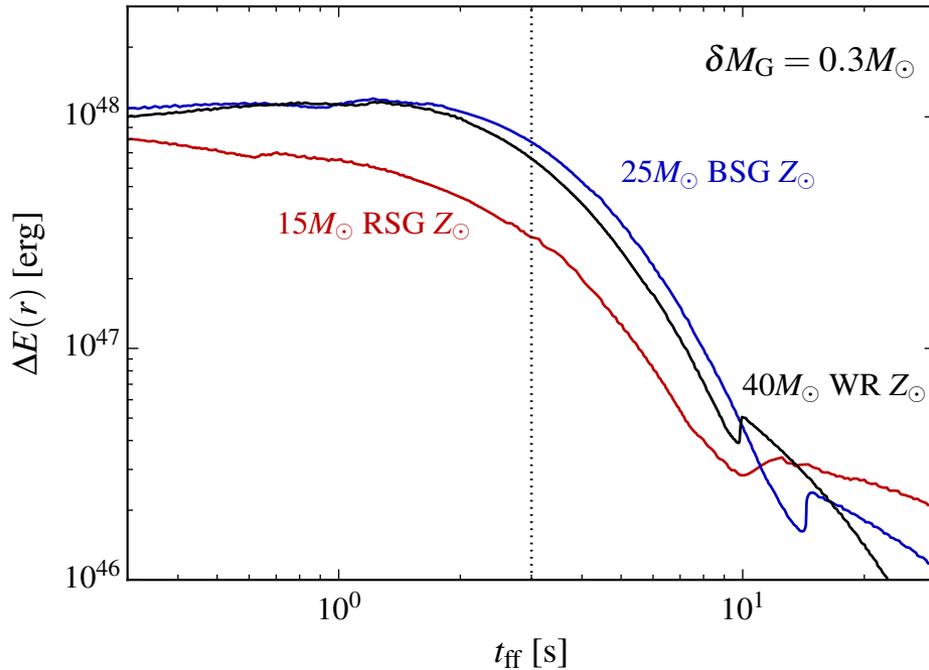
Nadyozhin 80  
Lovegrove & Woosely 13

A fraction of outer envelope can be ejected due to a gravitational mass loss of the core through neutrino emission in the proto-NS phase.

# Estimate on the “explosion” energy



# Estimate on the “explosion” energy



Mass shellに働く外向きの加速度

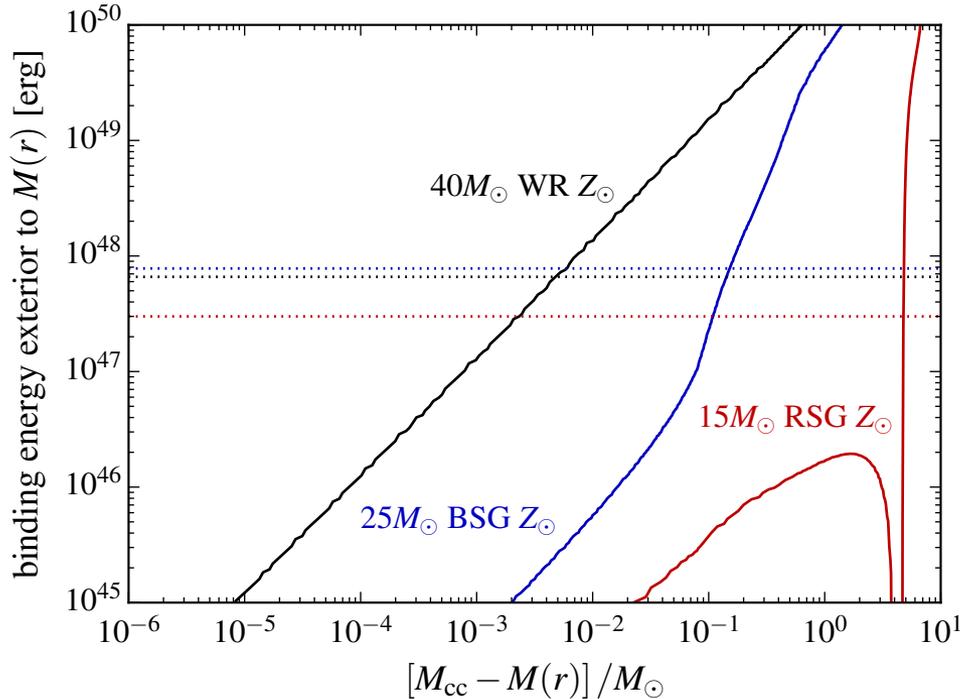
$$a = \frac{G\delta M_G}{r^2}.$$

結果生じる外向きの速度

$$v = a t_{\text{ff}} = \sqrt{\frac{GM(r)}{r} \frac{\delta M_G}{M(r)}}$$

$$\begin{aligned} \Delta E(r) &\simeq \frac{1}{2} M_{\text{shell}} v^2 \simeq \alpha \frac{G\delta M_G^2}{2r} \frac{H}{r} \\ &\simeq 5 \times 10^{47} \left( \frac{\alpha}{0.2} \right) \left( \frac{H/r}{0.4} \right) \left( \frac{\delta M_G}{0.3 M_\odot} \right)^2 \left( \frac{2 \times 10^9 \text{ cm}}{r} \right) \text{ erg} \end{aligned}$$

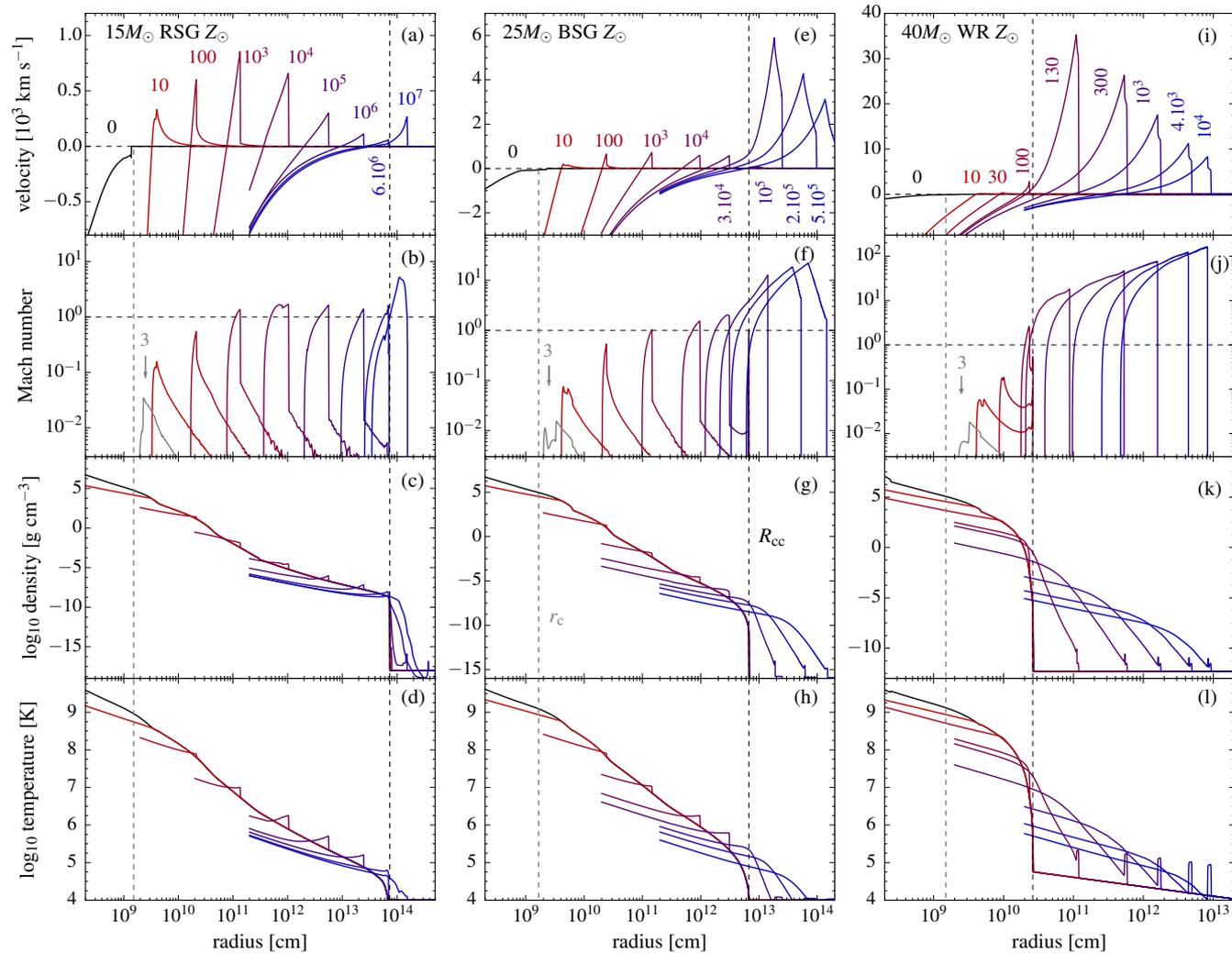
# Mass ejection in failed supernovae



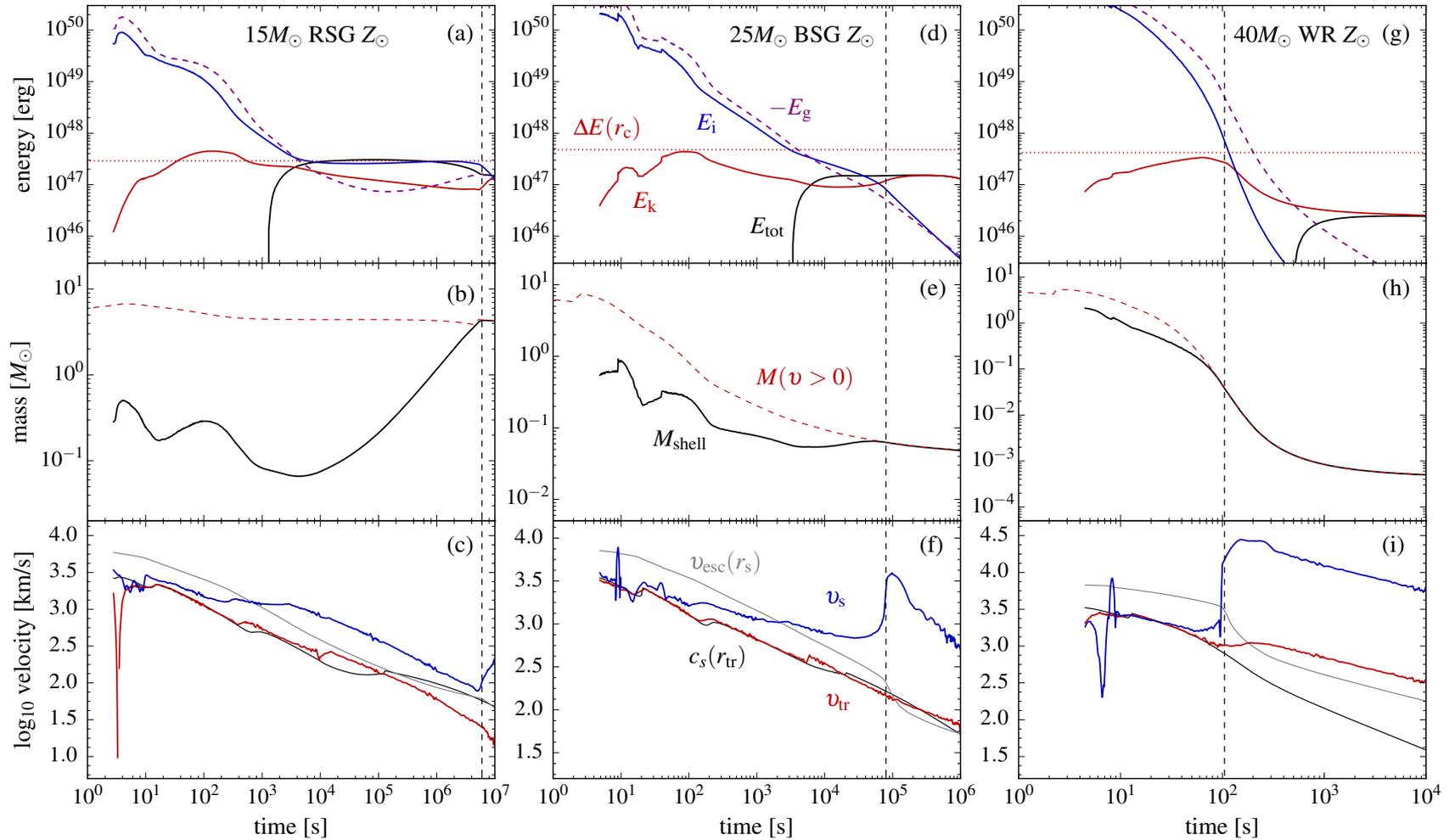
吹っ飛ぶ質量は外側の構造で決まる。

$$\Delta E(r_c) = \int_{M_{cc} - \Delta M}^{M_{cc}} (-e_{\text{tot}}) dM$$

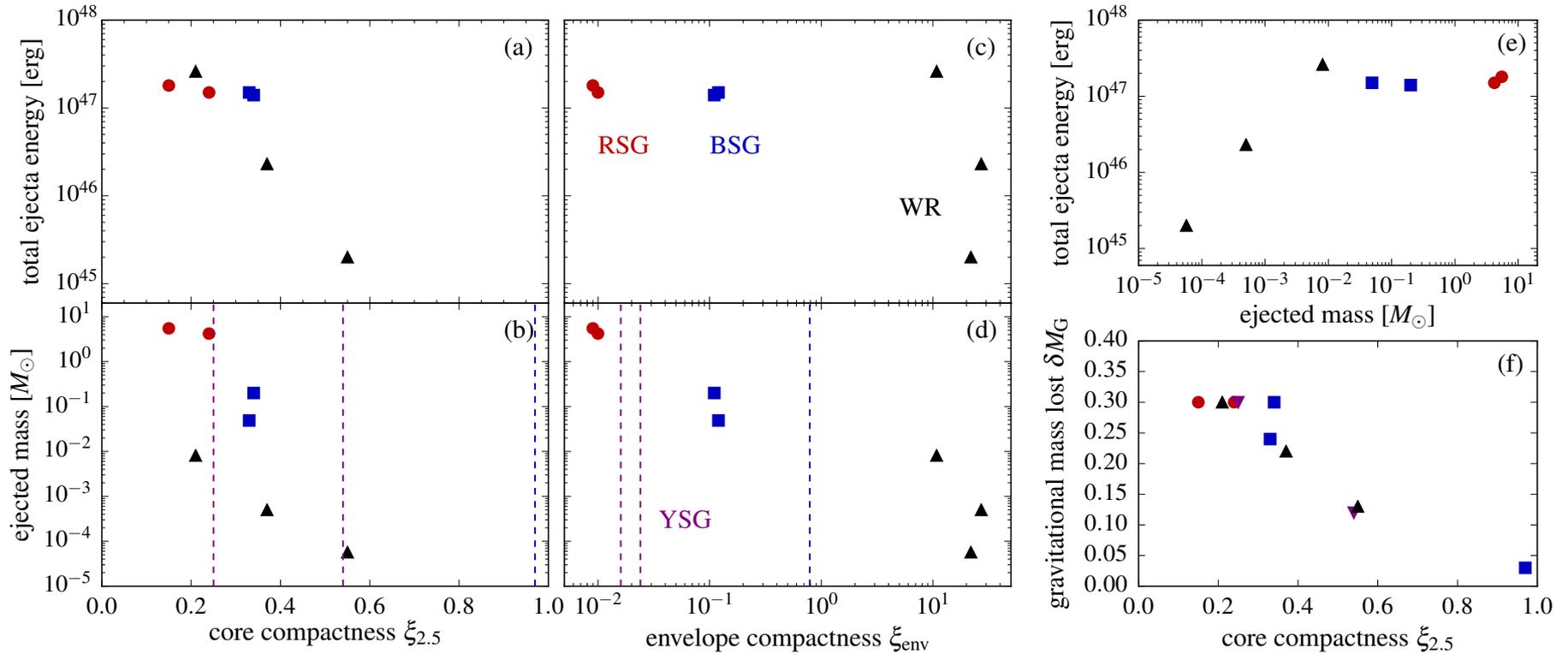
# Hydro sims. of mass ejection in failed SNe



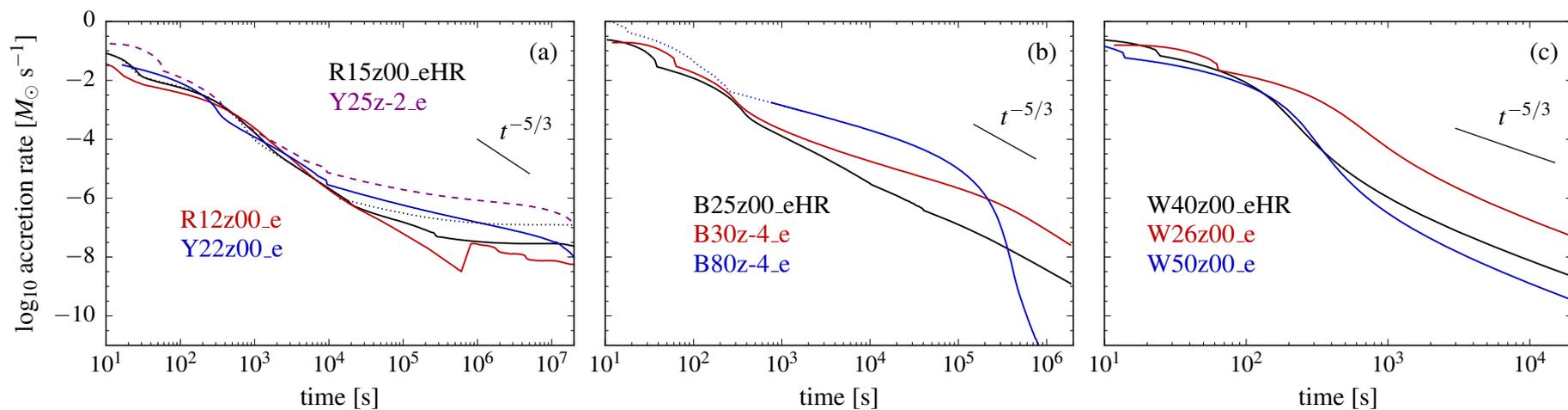
# Mass ejection in failed supernovae



# Mass ejection in failed supernovae



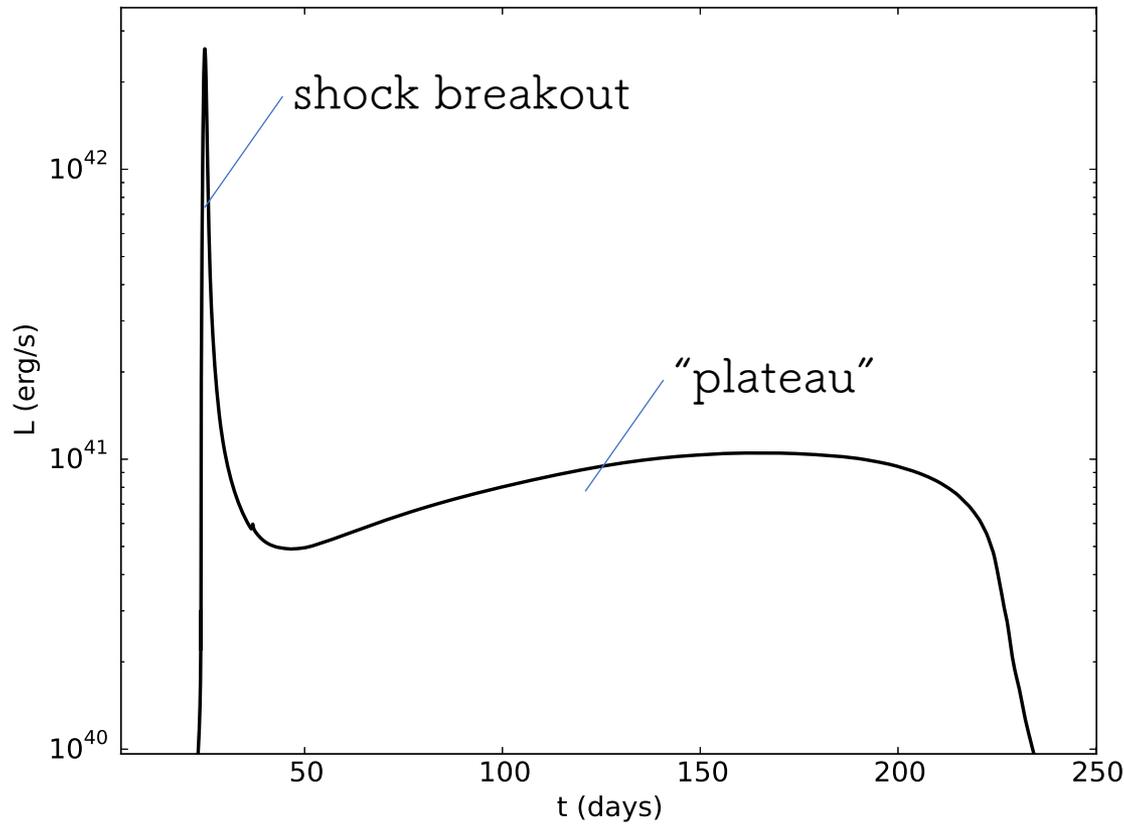
# Fallback accretion



衝撃波は弱いが長時間の降着ヒストリーへの影響は結構でかい。

# Luminous red novae from failed SNe

e.g.,  $M_{\text{ZAMS}} = 25 M_{\text{sun}} \text{ } \textcircled{RSG}$

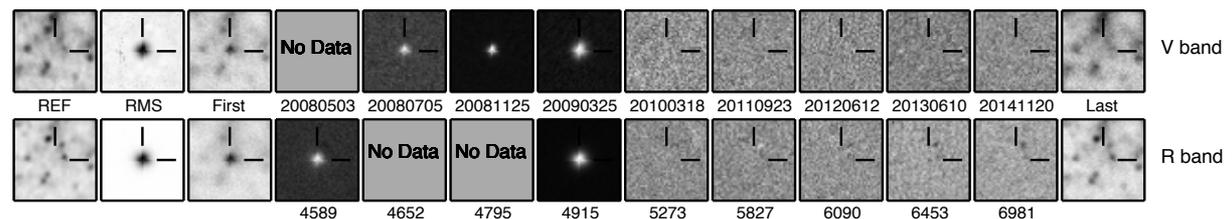
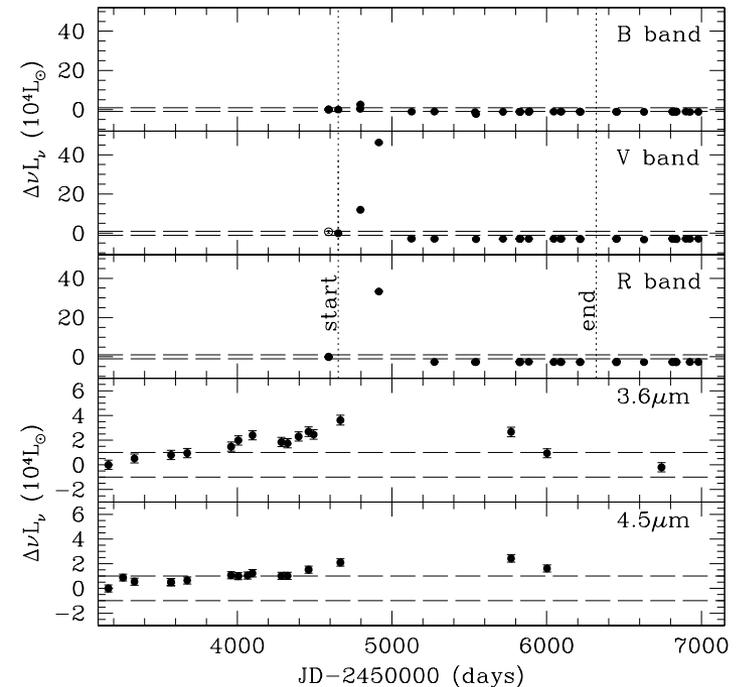


Lovegrove & Woosely 13, 17  
Piro 13

# Searching for vanishing RSGs

- Monitoring  $\sim 10^6$  RSGs in  $\sim 25$  Gal. within  $\sim 10$  Mpc with  $\sim 0.5$  yr cadence for  $\sim 5$  yrs using the Large Binocular Telescope
- Examine sources with 
$$\Delta(\nu L_\nu) \geq 10^4 L_\odot$$
- 3 core collapse supernovae
- 1 candidate of vanishing RSG
- Continuous obs. will give meaningful constraints on failed SN rate.

Kochanek+08, Gerke+15, Adams+17



# Possible obs. signatures of non-RSG failed SNe

Model	$L_{\text{bo}}$ ( $L_{\odot}$ )	$t_{\text{bo}}$	$v_{\text{bo}}$ ( $\text{km s}^{-1}$ )	$T_{\text{bo}}$ (K)	$L_{\text{pl}}$ ( $L_{\odot}$ )	$t_{\text{pl}}$ (d)	$v_{\text{exp}}$ ( $\text{km s}^{-1}$ )
B25z00_eHR	2E+8	3h	900	7E+4	2E+6	20	600
W40z00_eHR	3E+8	1s	12,000	1E+6	5E+4	2	2000

より小さい星からのより速い(とはいえSNよりはるかにしょぼい)衝撃波  
→ より速くより青い(温度が高い)放射

というか速すぎる？

それでも青色巨星の場合は雲雀、Tomo-e Gozenのターゲットになりそう。

# ブラックホール形成と突発天体

- 回転が
  - 遅い場合
  - まあまあ速い場合
  - めちゃくちゃ速い場合

# Ex) Stellar evolution calculations of single massive stars with MESA

$$V_{\text{surf, ini}} = 200 \text{ km/s}$$

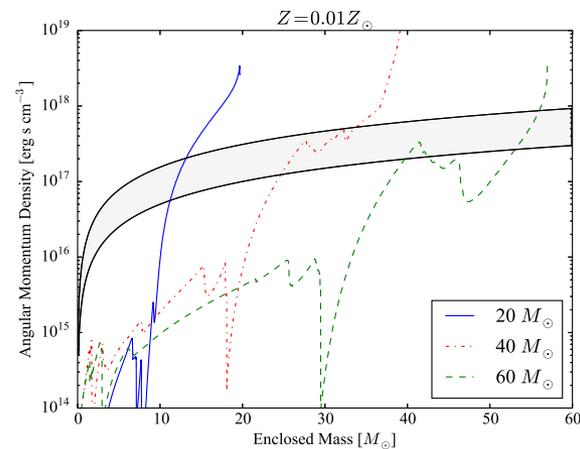
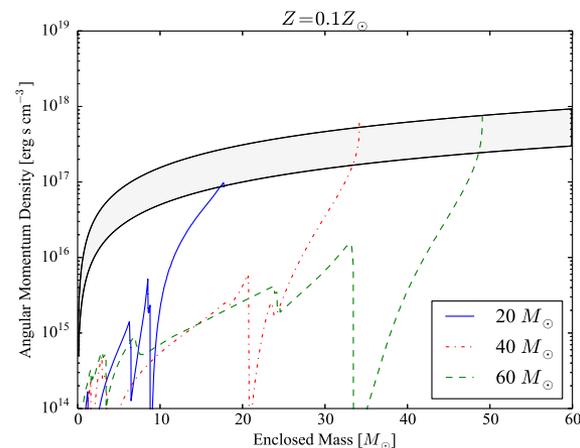
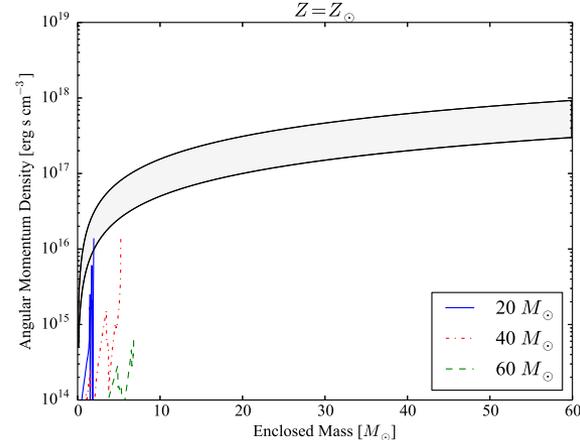
$$M_{\text{ZAMS}} = 20, 40, 60 M_{\text{sun}}$$

$$Z = 1, 0.1, 0.01 Z_{\text{sun}}$$

金属量が多い  $\rightarrow$  死ぬときにはゆっくり回っている。  
 右の場合、 $Z = Z_{\text{sun}}$ はみんなWR星として死ぬ。

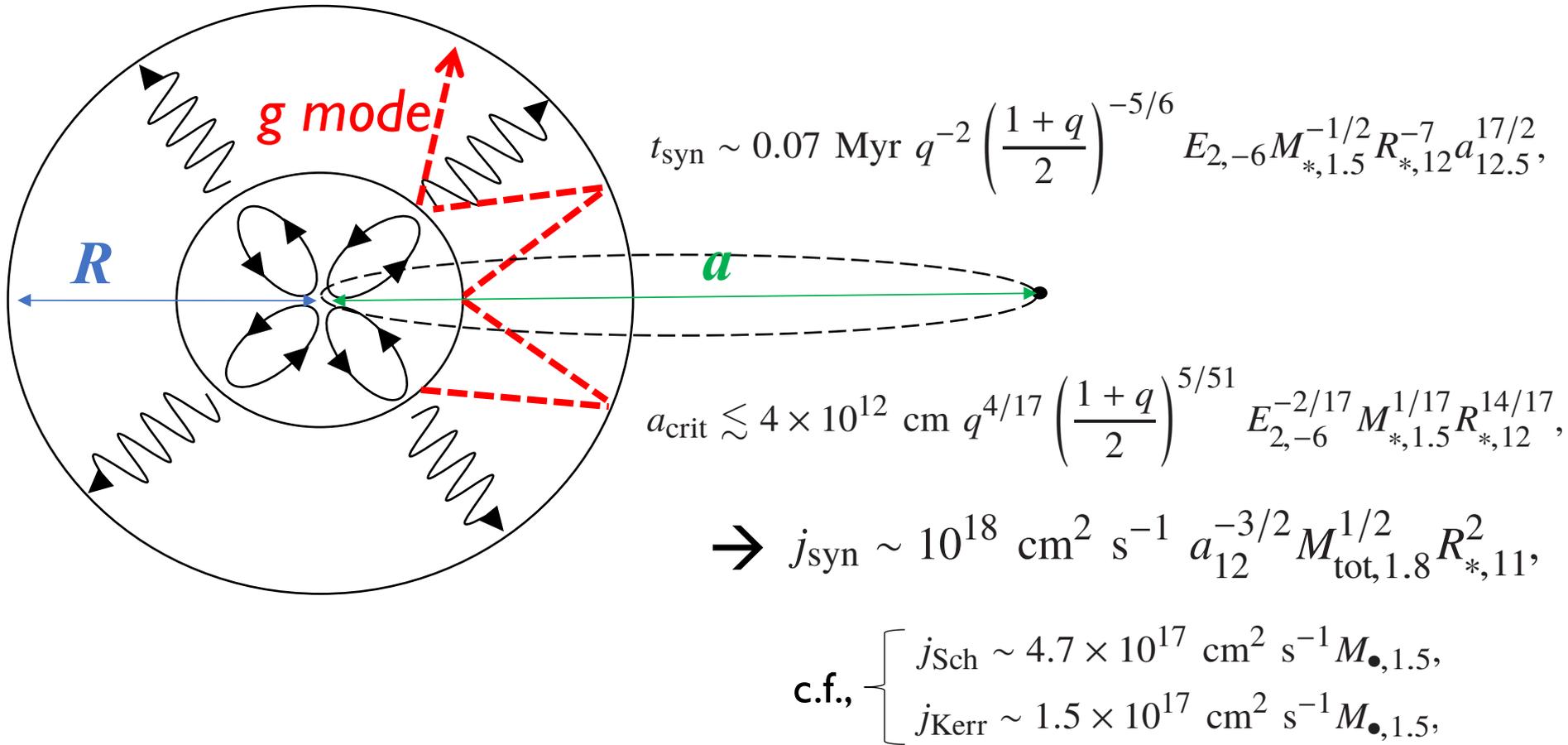
金属量が少ない  $\rightarrow$  死ぬときも割と速く回っている。  
 右の場合、 $Z < 0.1 Z_{\text{sun}}$ は青色、赤色巨星として死ぬ。  
 そのほとんどで（全部落ちたとすると） $a_{\text{BH}} \sim 1$ 。  
 外層から~太陽質量の降着円盤ができる。

(注) 回転星のwind mass lossは不定性がでかい。  
 定量的な議論は … .



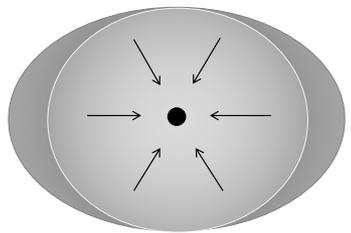
# Tidal interaction

The convective core + rad. envelope can be locked by the dynamical tide (Zahn 83).

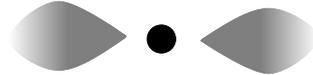


Note: g mode dumping is non-trivial, especially when including the wind mass loss.

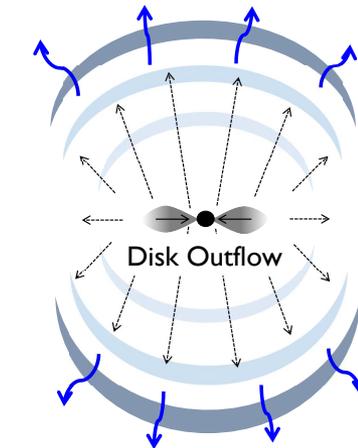
# Mass ejection from a minidisk



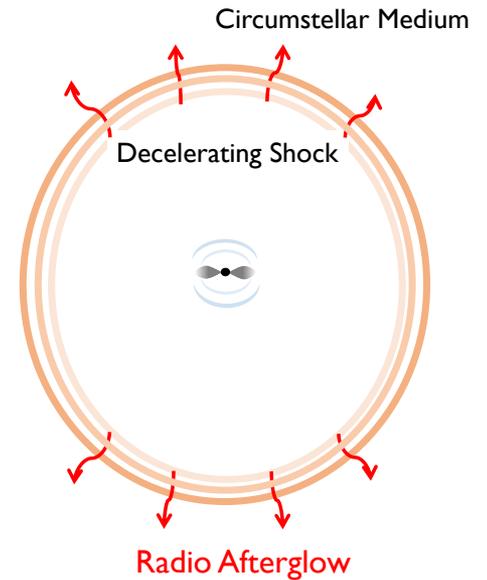
The Inner core is directly swallowed by the black hole.



The outermost layers have sufficient angular momentum to form a mini disk.



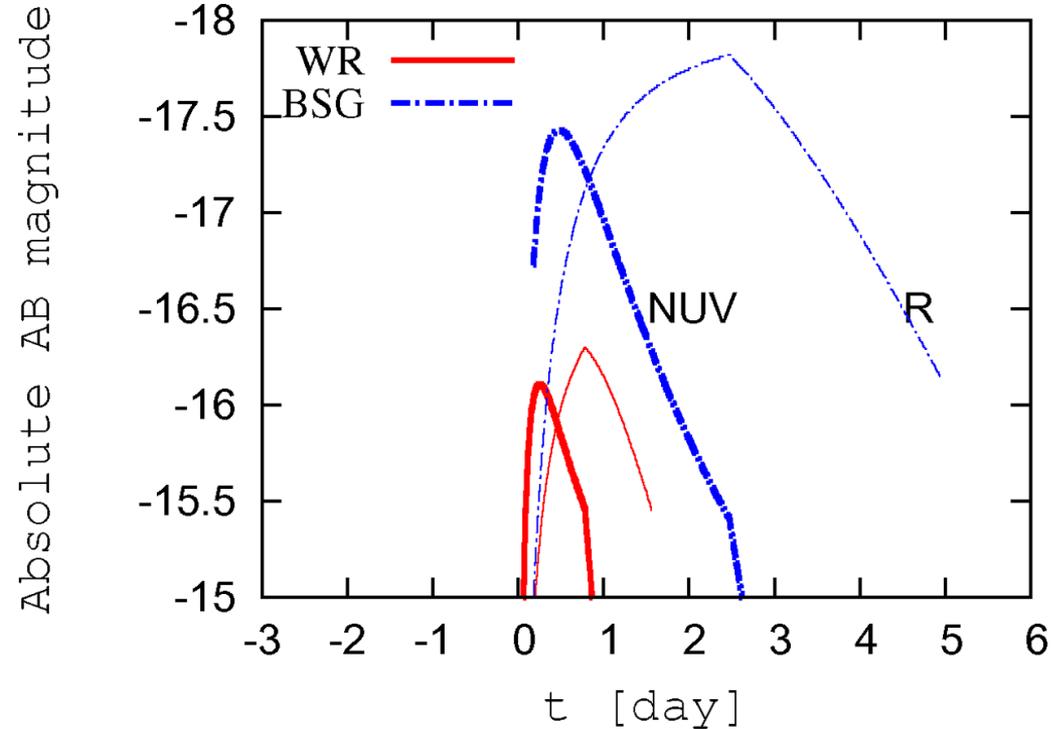
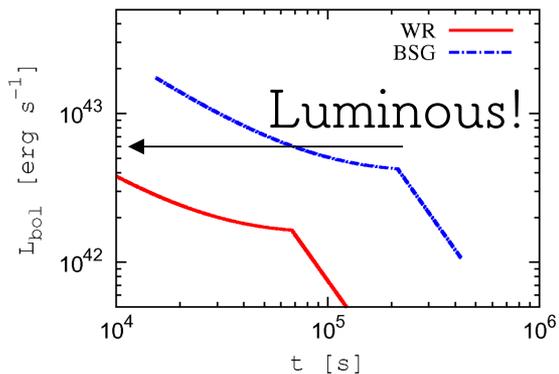
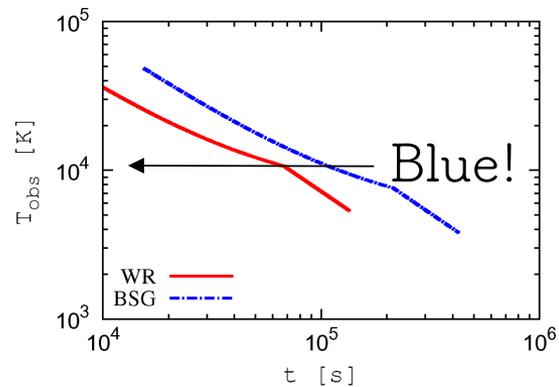
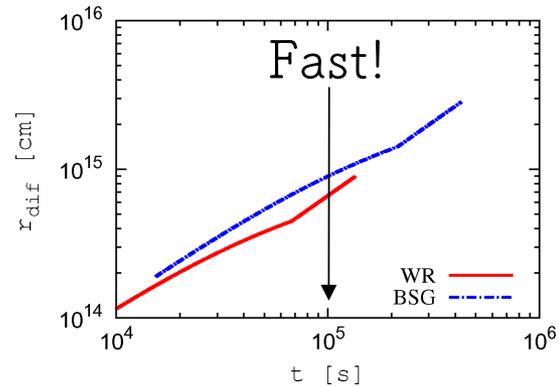
Fast Blue Transient  
& Inverse Compton X rays



KK & Quataert 15

KK, Hotokezaka, Murase 17

# Thermal emission from the outflow

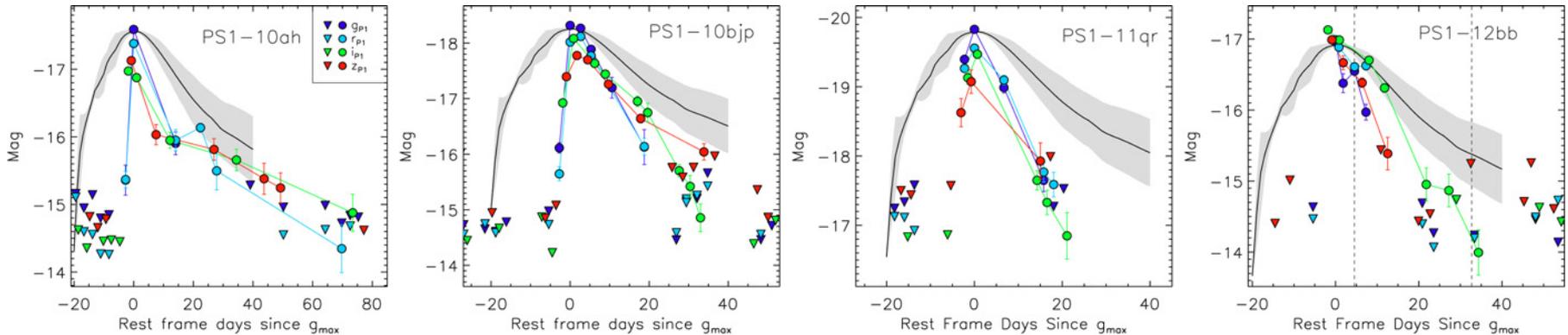


**"Fast luminous blue transients"**

# The PSI-MDS Transients

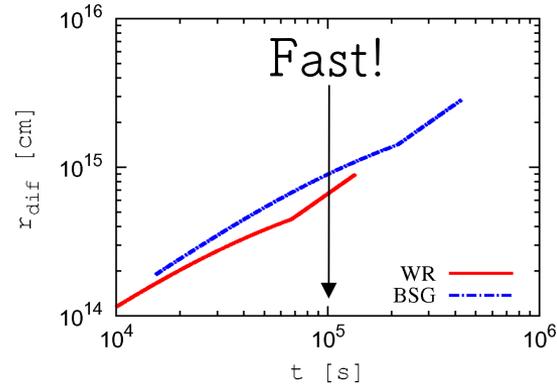
Pan-STARRS1 Medium Deep Survey (PSI-MDS) for Rapidly Evolving and Luminous Transients

Drout+14



- ✓  $t_{1/2} < 12$  day --- rapidly evolving than any SN type
- ✓  $L_{\text{peak}} \sim 10^{42-43} \text{ erg s}^{-1}$  --- luminous as bright SNe
- ✓  $T_{\text{peak}} \sim \text{a few } 10^4 \text{ K}$  --- blue
- ✓ No line blanketing --- not powered by the radioactive decay
- ✓ Host Gal. = star forming Gal. --- related to massive stars
- ✓ Event rate  $\sim 4-7$  % of core-collapse SN --- not rare

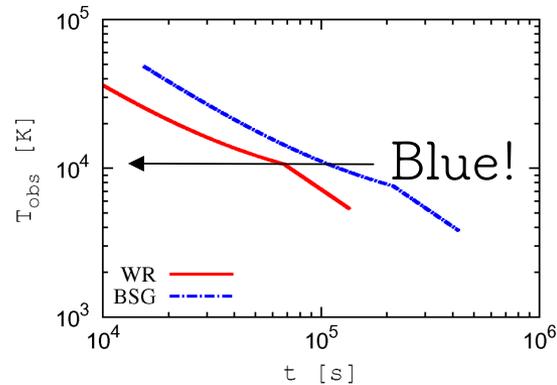
# Non-thermal emission from the outflow



+ electron acceleration at the forward shock  
& inverse Compton cooling

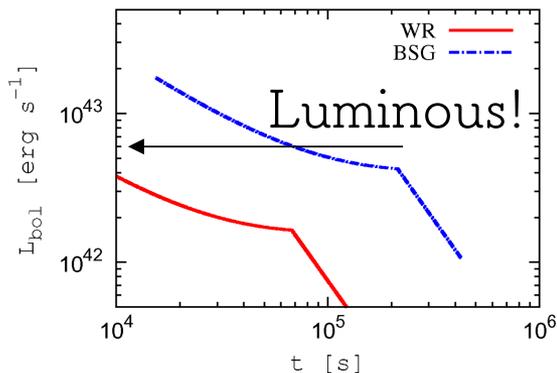
@  $t \sim t_{\text{peak}} \sim$  a few days

$$\gamma_{\text{ec}} \sim 47 \left( \frac{T_{\text{peak}}}{10^4 \text{ K}} \right)^{-4} \left( \frac{t_{\text{peak}}}{1 \text{ day}} \right)^{-1}$$



$$L_{\text{IC}}^c \sim \frac{\epsilon_e}{2C} \frac{\dot{M}_w}{v_w} v_{\text{out}}^3$$

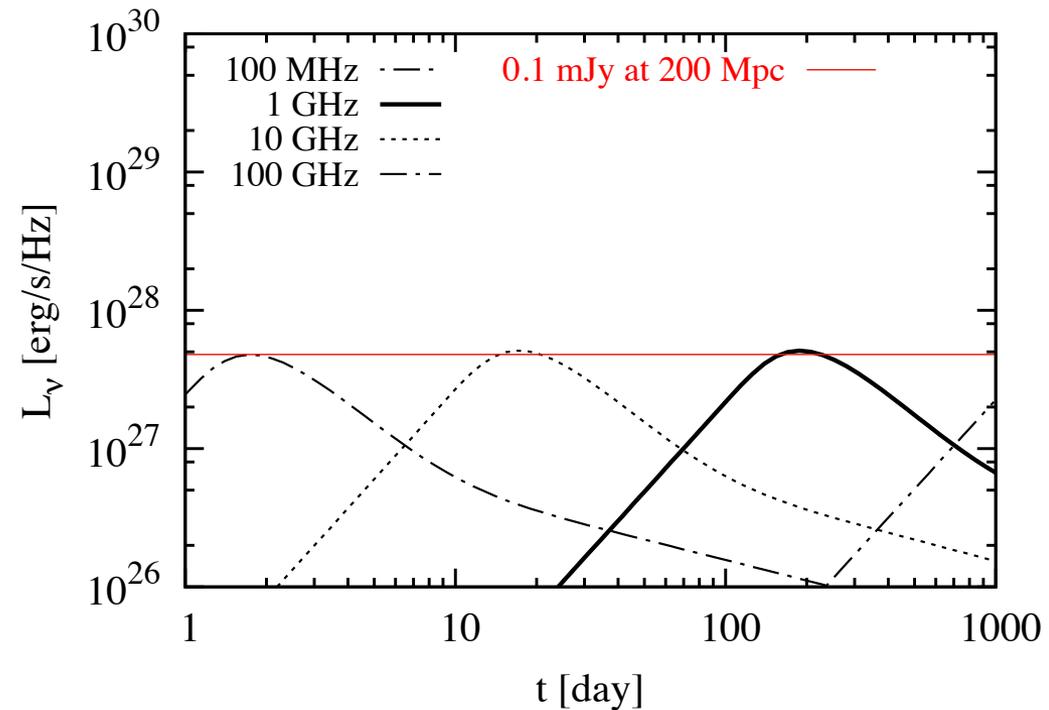
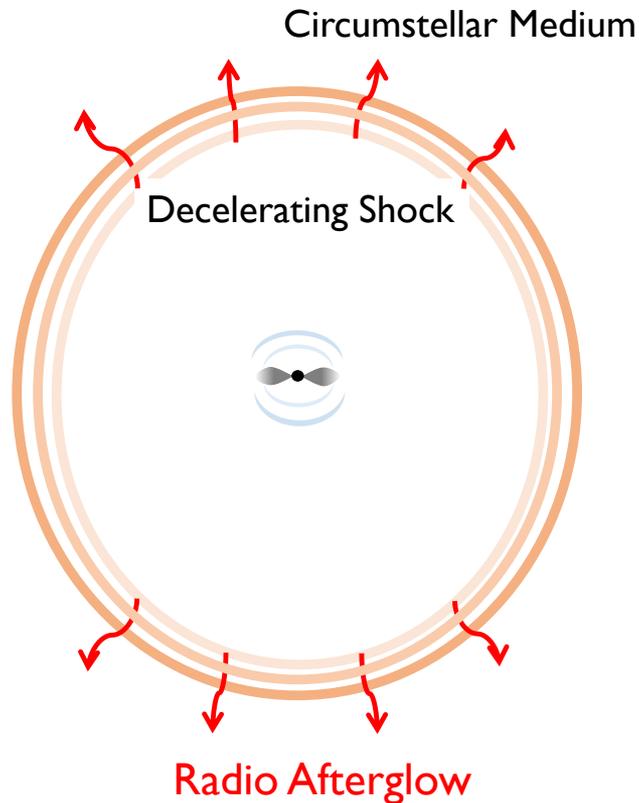
$$\sim 6 \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1} \epsilon_{e,-1} C_1^{-1} \dot{M}_{w,-5} v_{w,8}^{-1} v_{\text{out},10}^3$$



$$\epsilon_{\text{IC}} \approx 2k_B T_{\text{peak}} \gamma_e^2 \sim 1.5 \text{ keV} \left( \frac{\gamma_e}{30} \right)^2 \left( \frac{T_{\text{peak}}}{10^4 \text{ K}} \right)$$

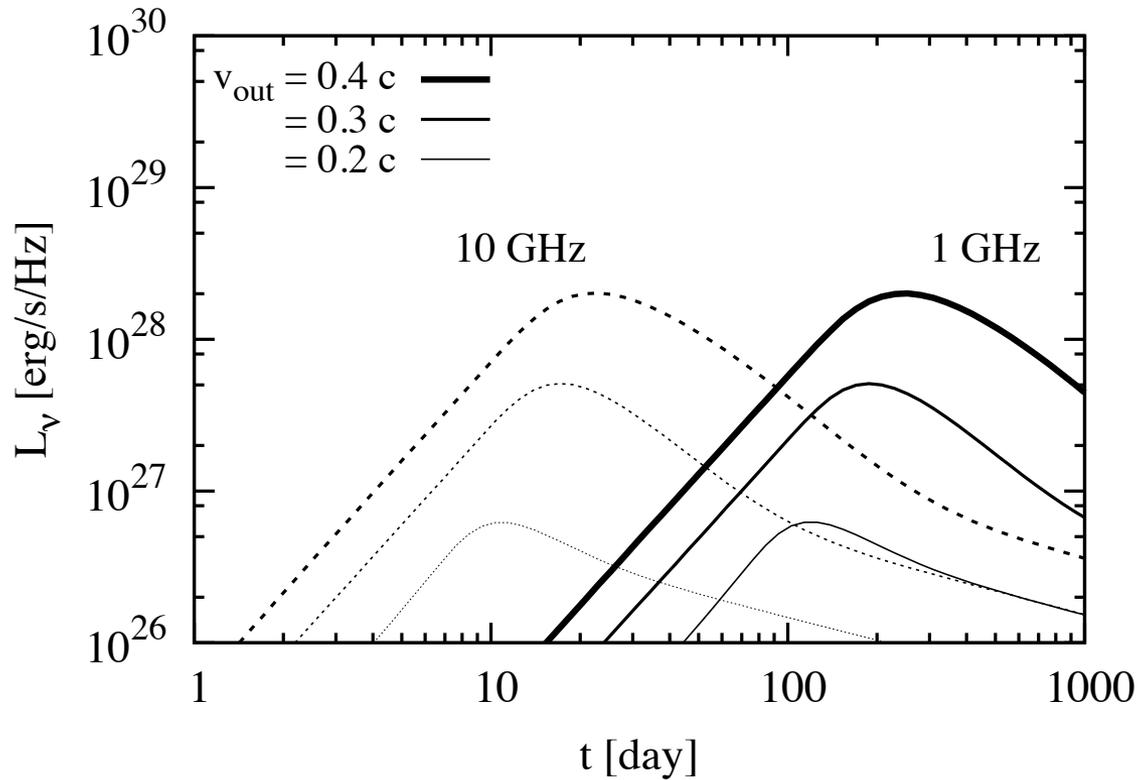
**The IC X-ray flares are detectable by  
e.g., Swift XRT from  $\sim 100$  Mpc.**

# Non-thermal emission from the outflow

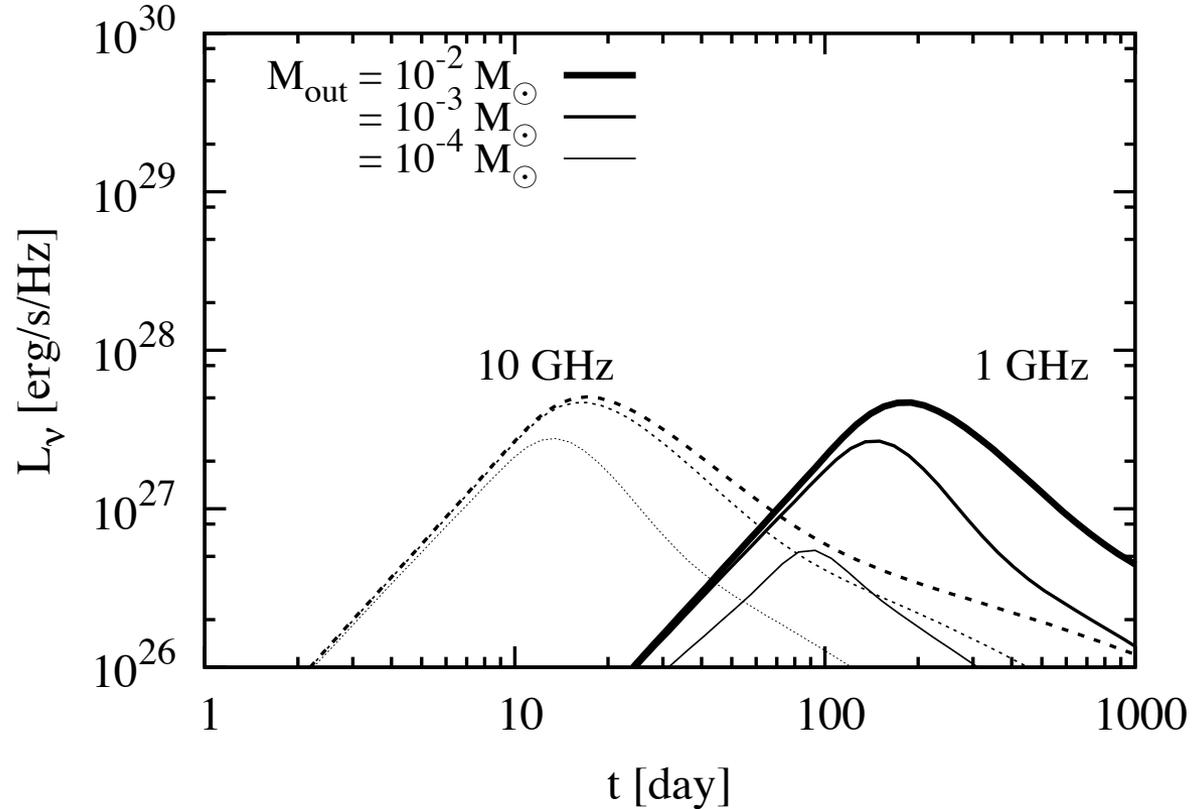


The radio afterglow are detectable by e.g., VLA from a few 100 Mpc.

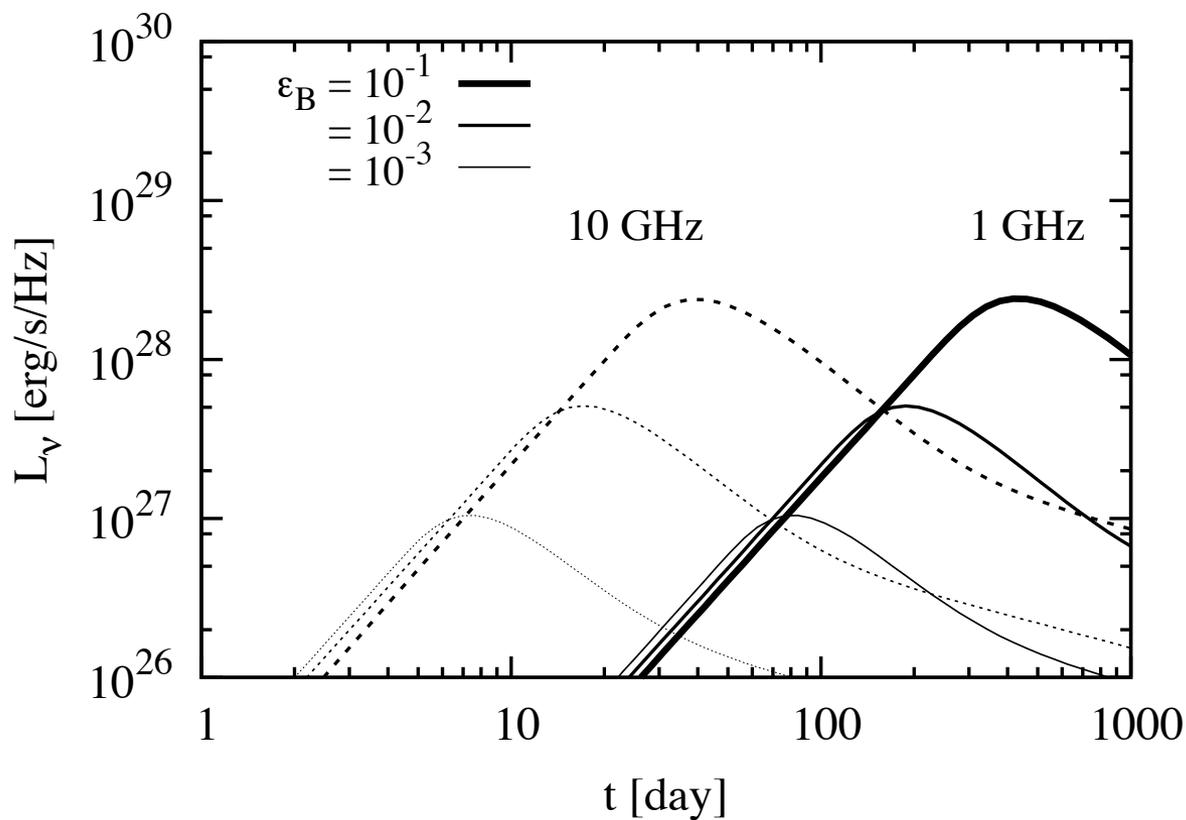
# The radio afterglow



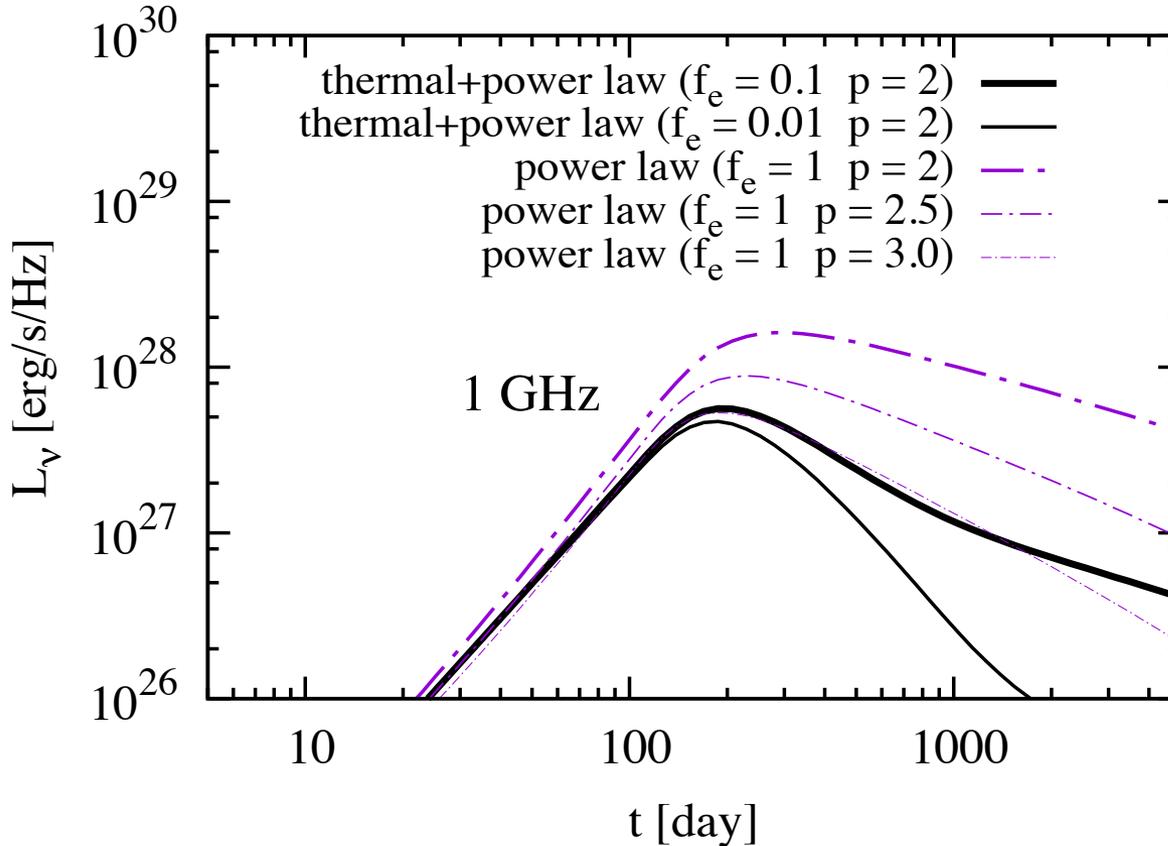
# The radio afterglow



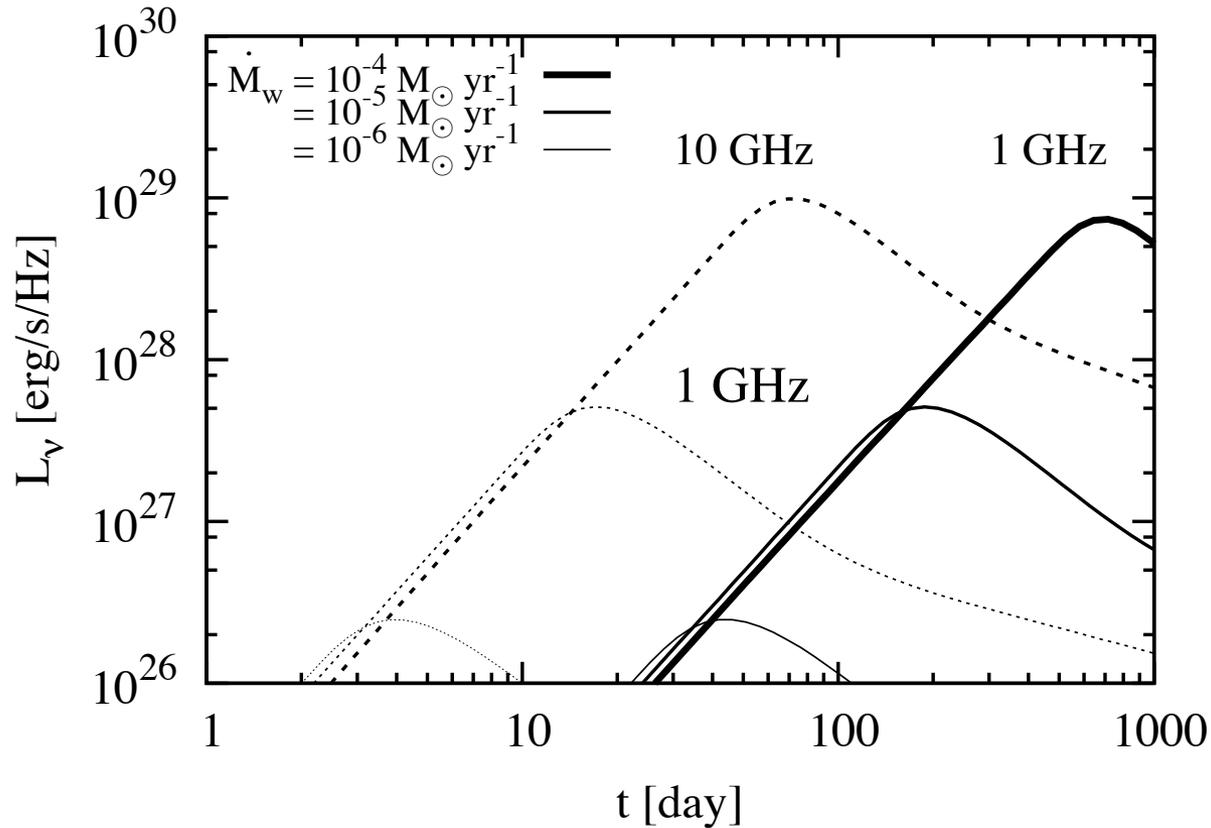
# The radio afterglow



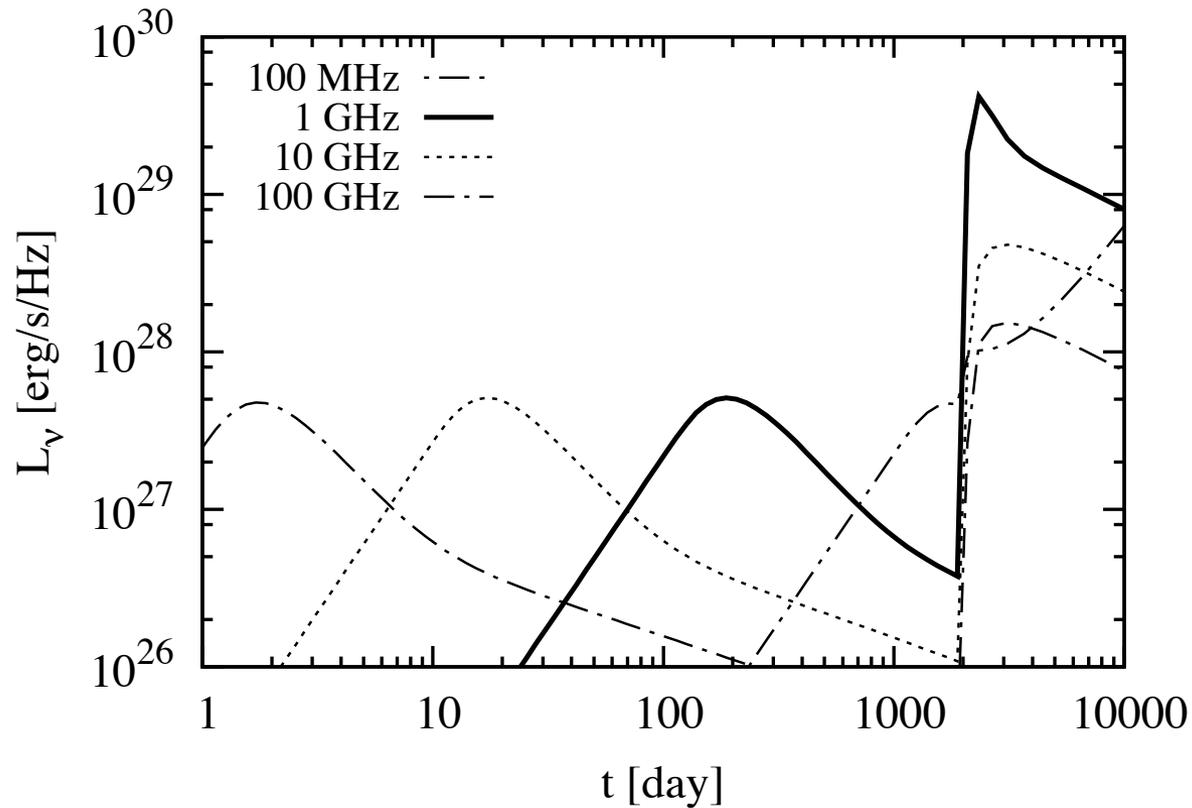
# The radio afterglow



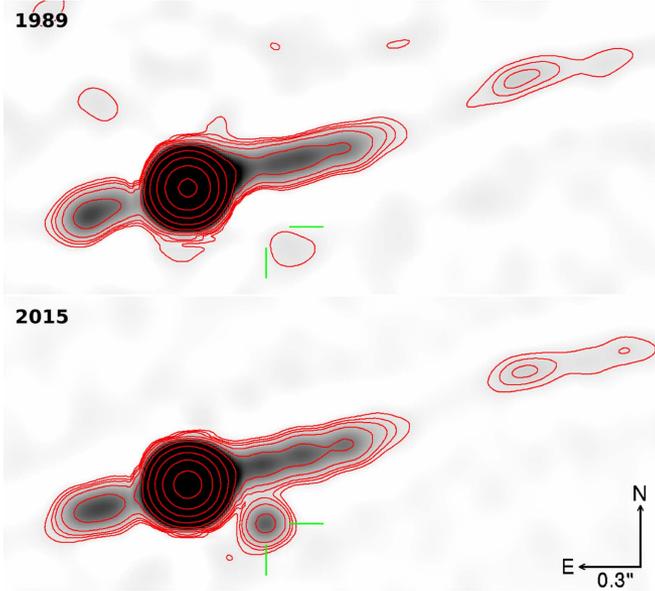
# The radio afterglow



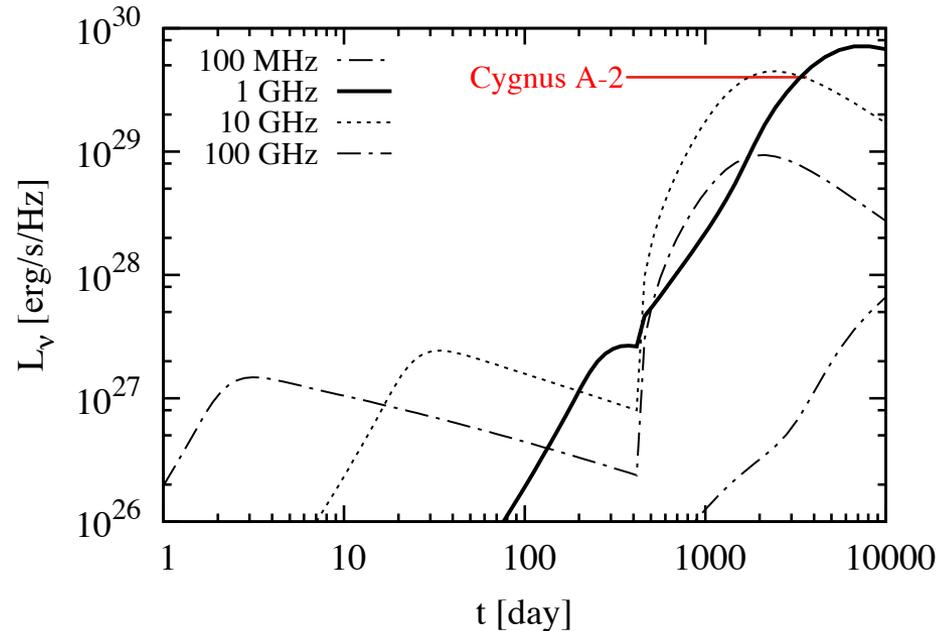
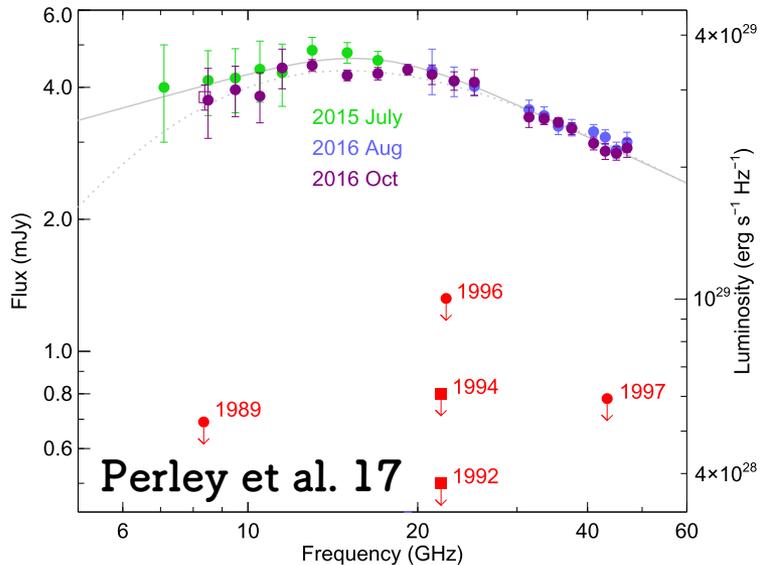
# The radio afterglow



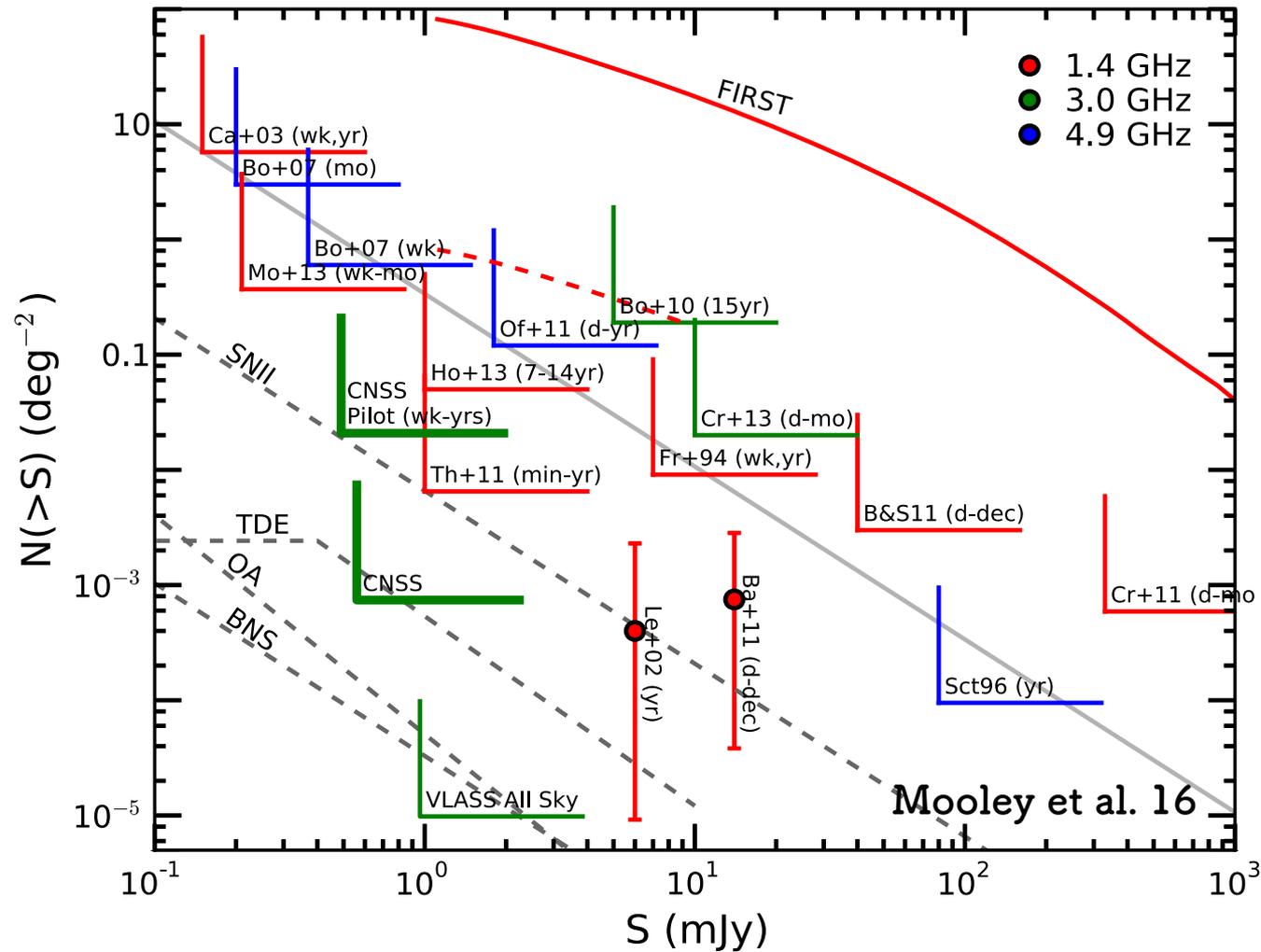
# The radio afterglow



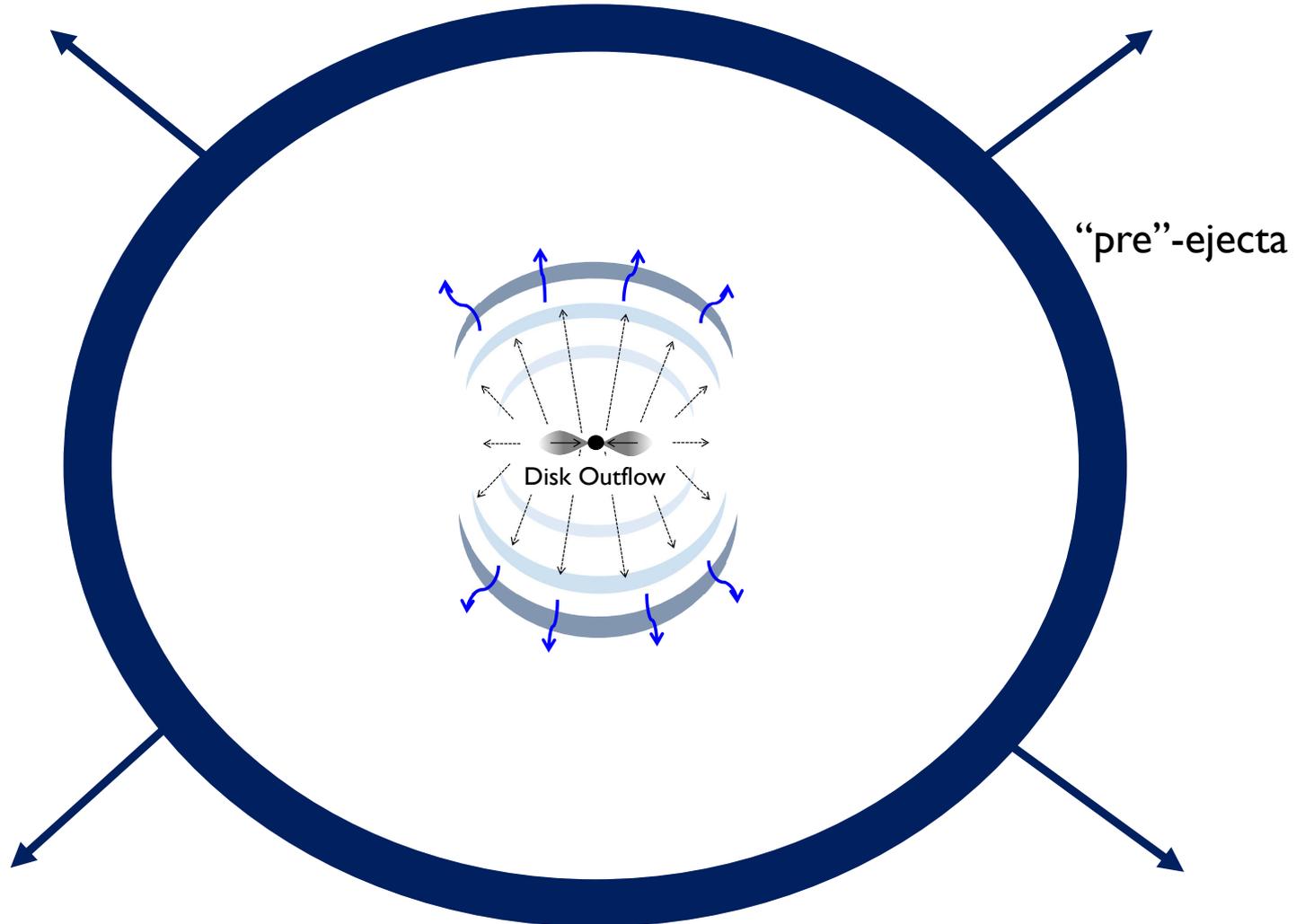
might have been already detected as a possible new class of radio transients, e.g., Cyg A-2



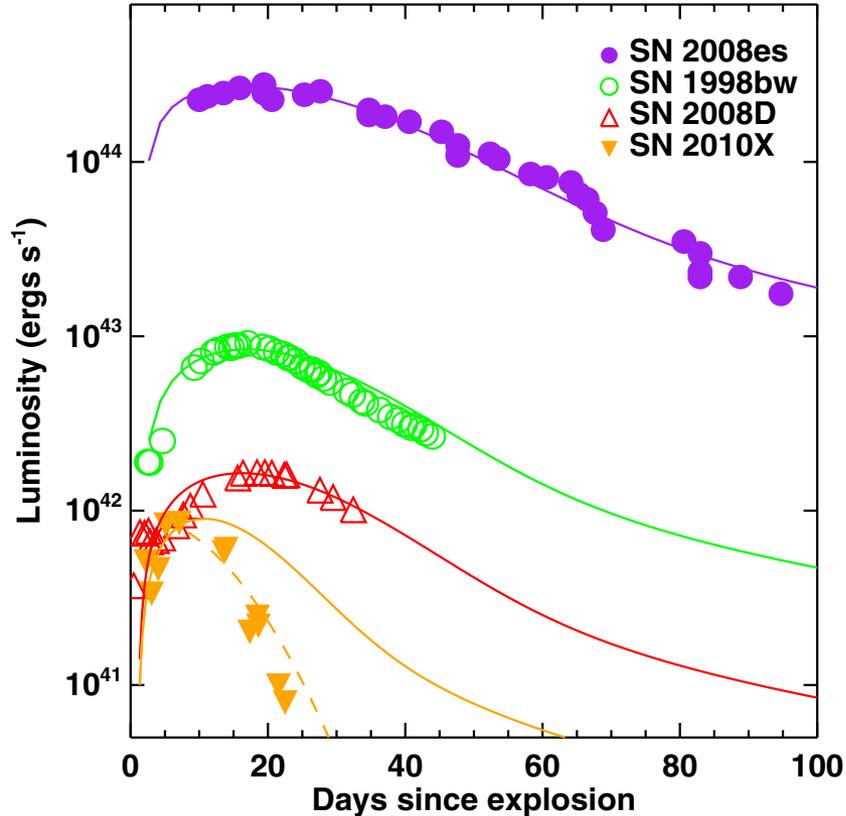
# Competitive sources & future obs.



# Weak explosion + (mini)disk

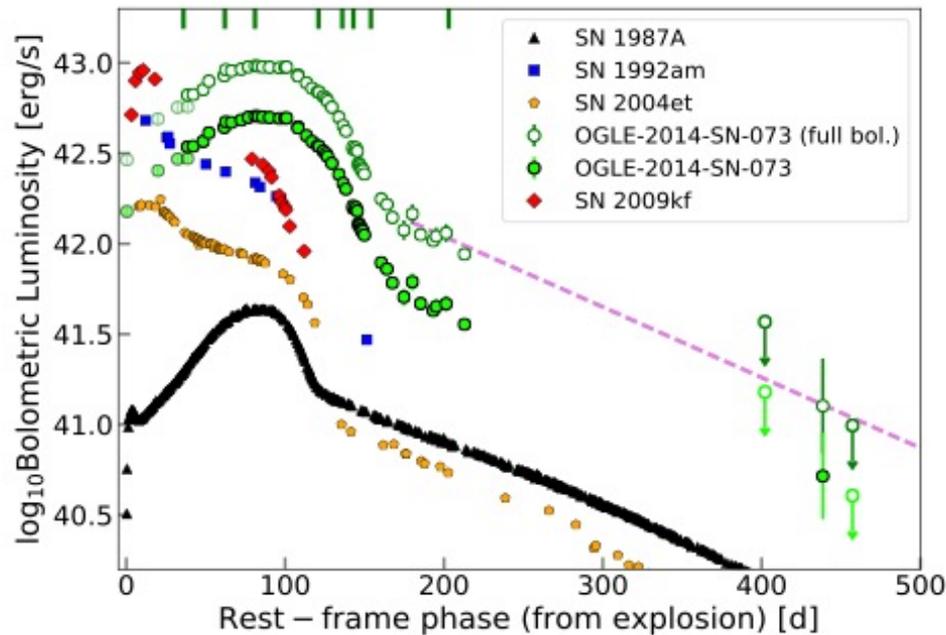


# Disk-wind powered supernovae



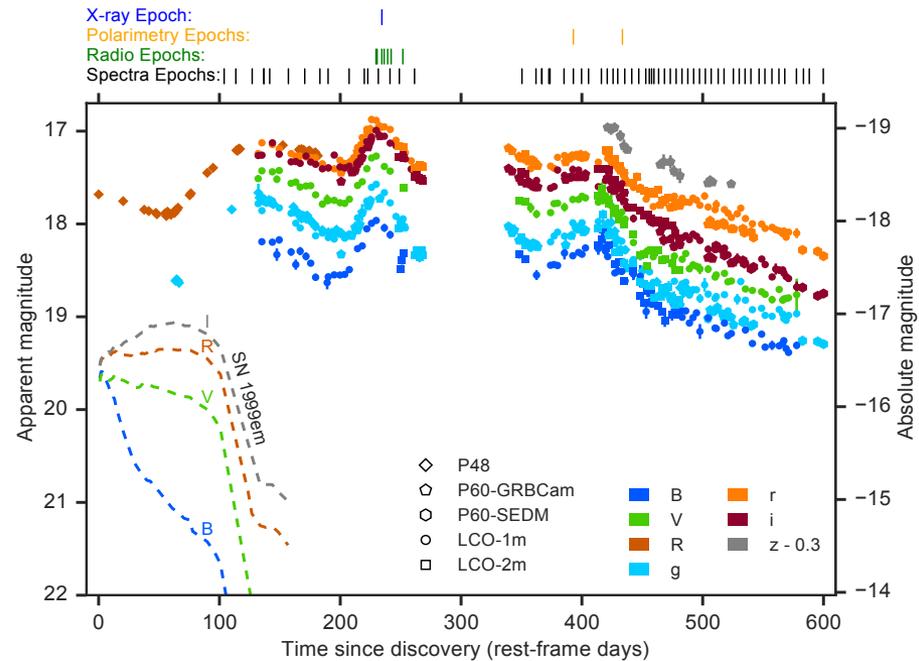
# Creepy transients powered by zombie stars?

OGLE-2014-SN-073  
"The brightest H-rich SN"



Terreran et al. 17

iPTF14hls

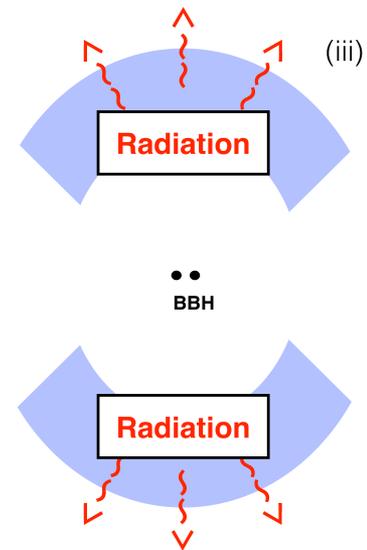
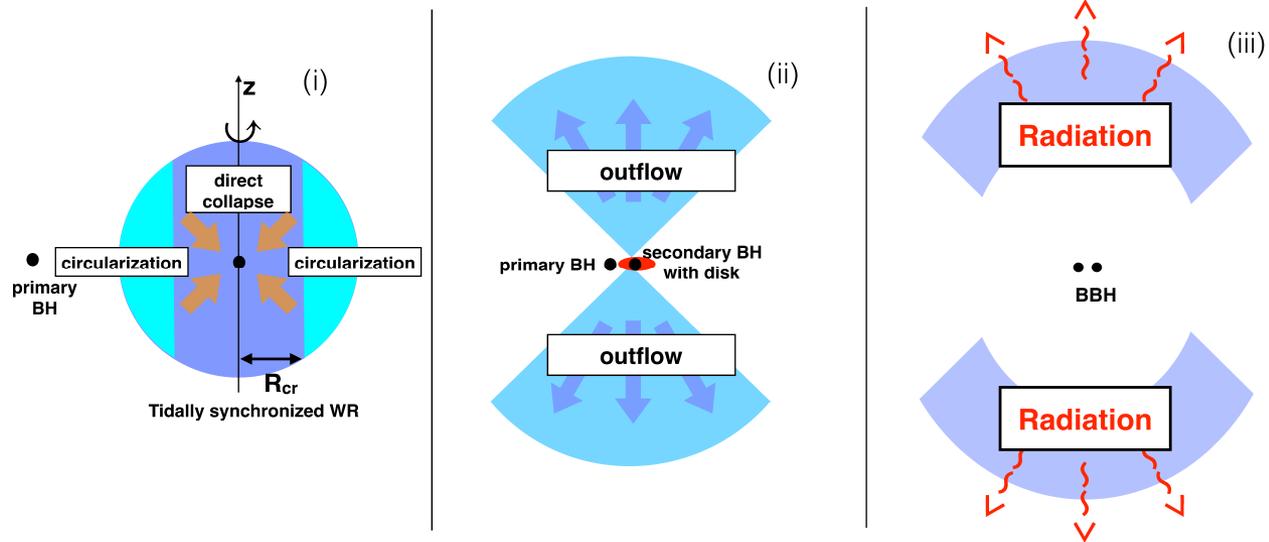


Arcavi et al. 17

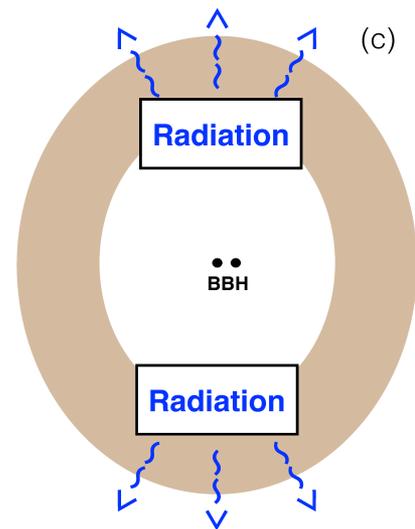
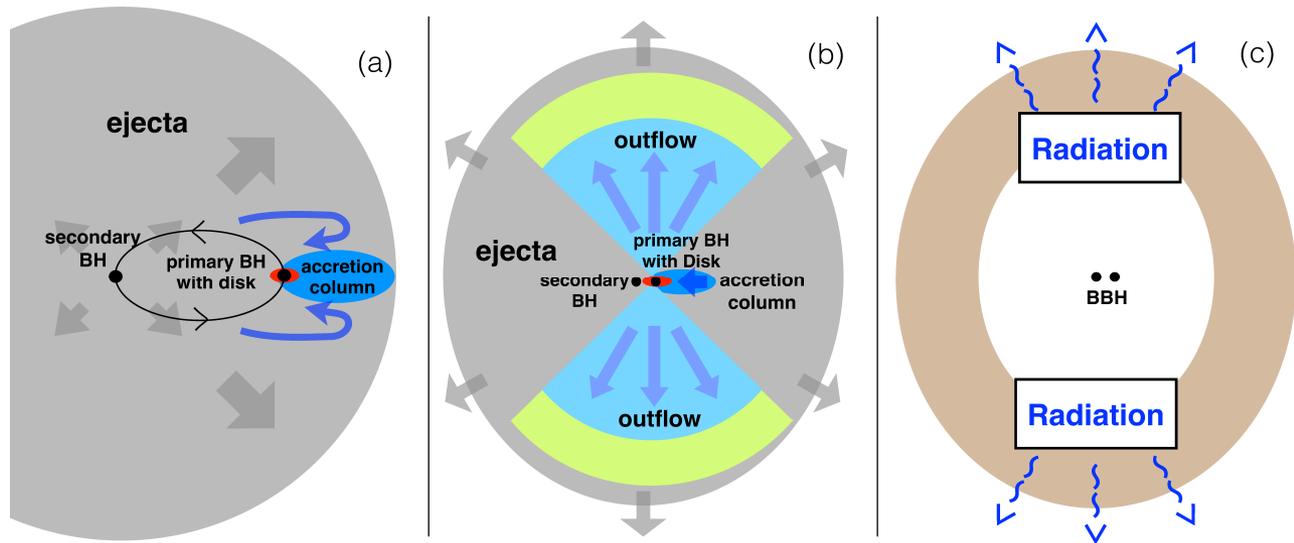
# ブラックホール形成と突発天体

- 回転が
  - 遅い場合
  - まあまあ速い場合、特に連星系
  - めちゃくちゃ速い場合

# Either



or



# ブラックホール形成と突発天体

- 回転が
  - 遅い場合
  - まあまあ速い場合
  - めちゃくちゃ速い場合

# ブラックホール形成と突発天体

- 回転が

- 遅い場合

- まあまあ速い場合

- めちゃくちゃ速い場合

この会議の本題、GRBを作るくらい。  
たぶんコアから降着円盤が作られるくらい。

そもそもどうやってそんな速く回すのか？

とかその辺を衣川くんが話す（ことになっているはず）。

# 今日のまとめ

- ブラックホール形成に伴う突発天体
  - 回転が遅い場合
    - RSG – luminous rednovae? ← vanishing star search
    - BSG, WR – sub-day blue transients? ← Tomo-e Gozen etc?
  - まあまあ速い場合
    - RSG – disk-wind powered SNe? ← conventional SN search
    - BSG, WR – fast blue transients? ← high-cadence SN search
  - めちゃくちゃ速い場合
    - RSG – failed jet & disk-wind powered SNe?
    - BSG – ultra-long GRBs?
    - WR – long GRBs
- 多波長の理論モデル、フォローアップ観測が重要

appendix

# Mass ejection in failed supernovae

Model	$\Delta r/r$ (%)	$\nu$ -loss	$\tau_c$ (s)	$\tau_{\text{tov}}$ (s)	$\delta M_G$ ( $M_\odot$ )	$M_{\text{ej}}$ ( $M_\odot$ )	$E_{\text{ej}}$ ( $10^{47}$ erg)	$E_{\text{k,max}}$ ( $10^{47}$ erg)	$r_c$ ( $10^9$ cm)	$\Delta E(r_c)$ ( $10^{47}$ erg)	$\Delta M$ ( $M_\odot$ )
R15z00_e	0.9	exp	3	6.1	0.30	4.2	1.5	4.7	1.5	2.9	4.8
B25z00_e				3.1	0.24	4.9E-2	1.5	4.5	1.7	4.8	0.13
W40z00_e				2.6	0.22	5.0E-4	0.23	3.5	1.5	4.2	3E-3
R15z00_eHR	0.45	exp	3	6.1	0.30	4.2	1.9	4.5	1.5	2.9	4.8
B25z00_eHR				3.1	0.24	4.9E-2	1.6	4.4	1.7	4.8	0.13
W40z00_eHR				2.6	0.22	5.0E-4	0.25	3.4	1.5	4.2	3E-3
R12z00_e	0.9	exp	3	21	0.30	5.5	1.8	3.9	1.4	1.5	5.6
Y22z00_e				1.1	0.12	...	...	0.4	0.8	1.8	1.2
Y25z-2_e				5.3	0.30	2.5	-1.0	8.1	1.5	8.7	11
B30z-2_e				4	0.30	0.2	1.4	10	1.6	9.3	0.85
B80z-2_e				0.2	0.03	...	...	0.03	0.23	0.38	0.01
W26z00_e				6.8	0.30	8.1E-3	2.6	10	1.5	9.3	0.02
W50z00_e				1.2	0.13	5.7E-5	0.02	0.63	0.9	1.9	2E-3
R15z00_f	0.9	full	3	8.0	0.47	4.6	8.8	12	1.5	7.4	4.8
B25z00_f				4.2	0.43	0.11	9.1	18	1.7	16	0.20
W40z00_f				3.6	0.42	4.9E-3	3.0	17	1.7	13	9E-3
B80z-2_f				0.4	0.04	...	...	0.05	0.42	0.63	0.02
R15z00_m	0.9	max	3	8.4	0.49	4.6	13	17	1.5	8.1	4.8
B25z00_m				3.7	0.37	9.5E-2	7.0	15	1.7	12	0.18
W40z00_m				3.0	0.33	2.6E-3	1.5	11	1.7	8.0	6E-3