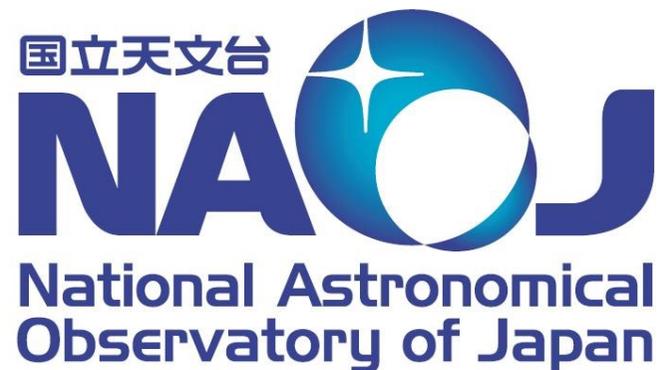
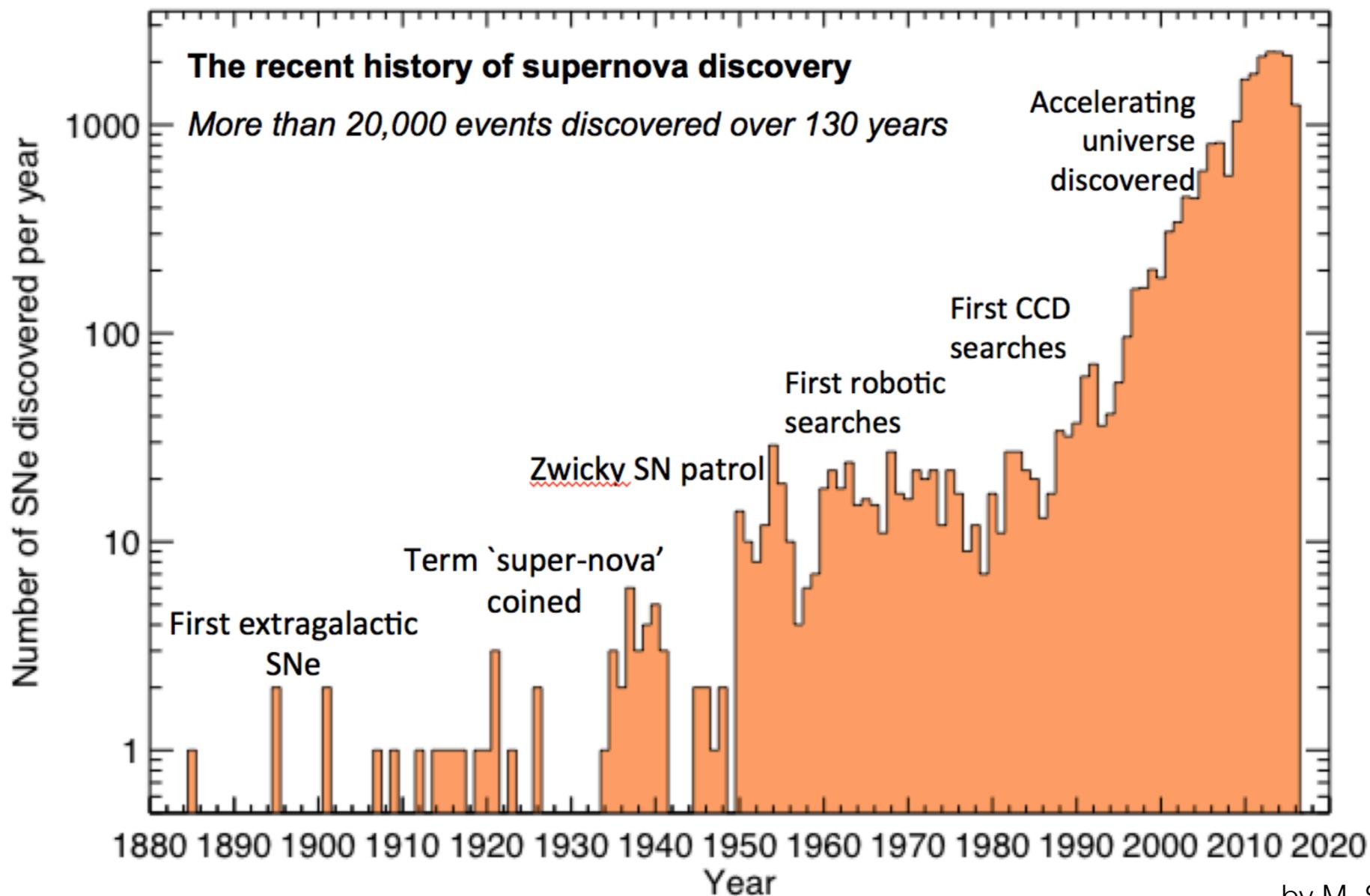


超新星爆発の標準理論と標準外の超新星

守屋堯
国立天文台

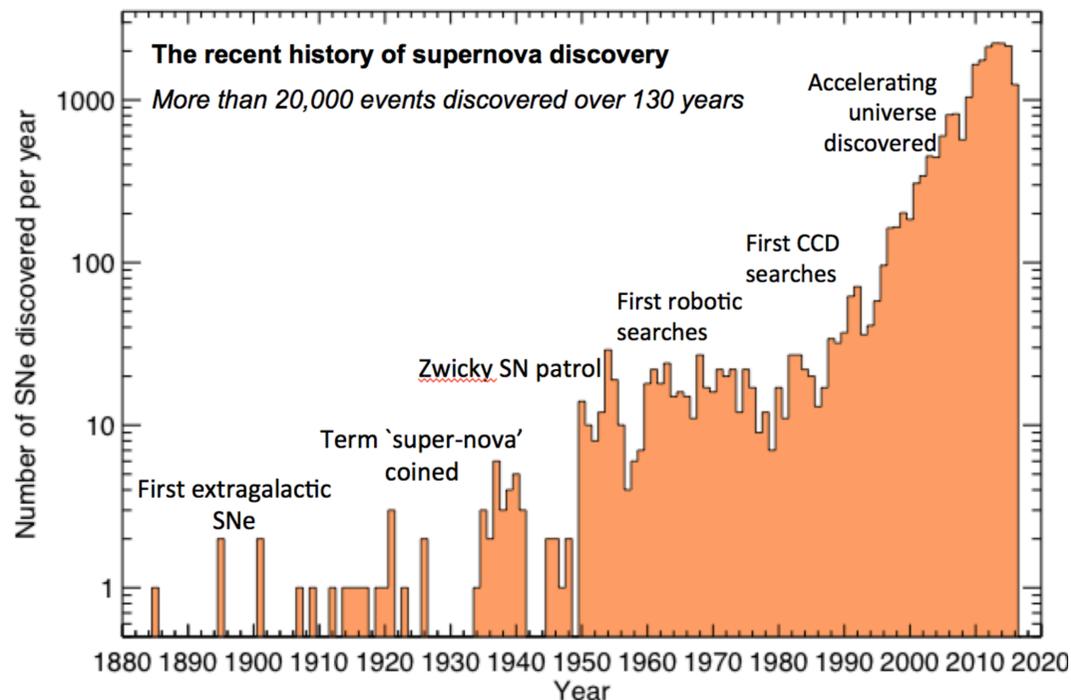


超新星爆発の発見数



超新星爆発の発見数

- ~ 2000年 (~ 10 SNe/yr)
 - 「標準的な超新星」が出揃う
- 2000年代 (~ 100 SNe/yr)
 - 「標準的な超新星」が多く見つかる
 - 統計的性質の調査が可能に
 - 超新星サーベイの方法も変化
 - おかしな（標準外の）超新星が少しずつ見つかり始める
- 2010年代 (~ 1000 SNe/yr)
 - 標準外の超新星がよく見つかる
- 2020年代 (ZTF, LSST時代 ~ 10000 SNe/yr???)
 - 名前を覚えるのが不可能に。「ZTF18moriyat」 SNはまだ3文字

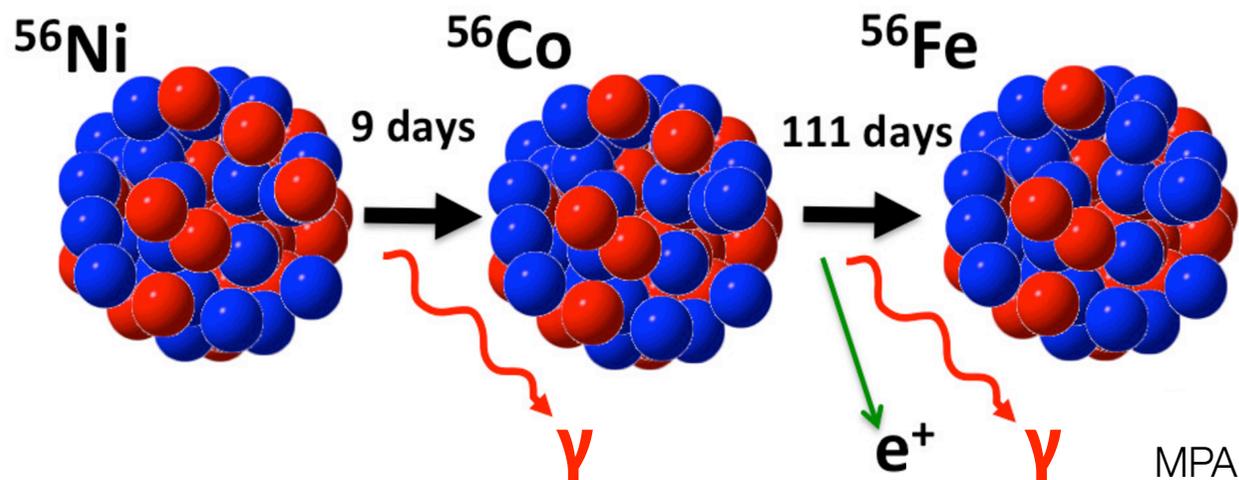


重力崩壊型超新星の標準理論

「光源」に注目して

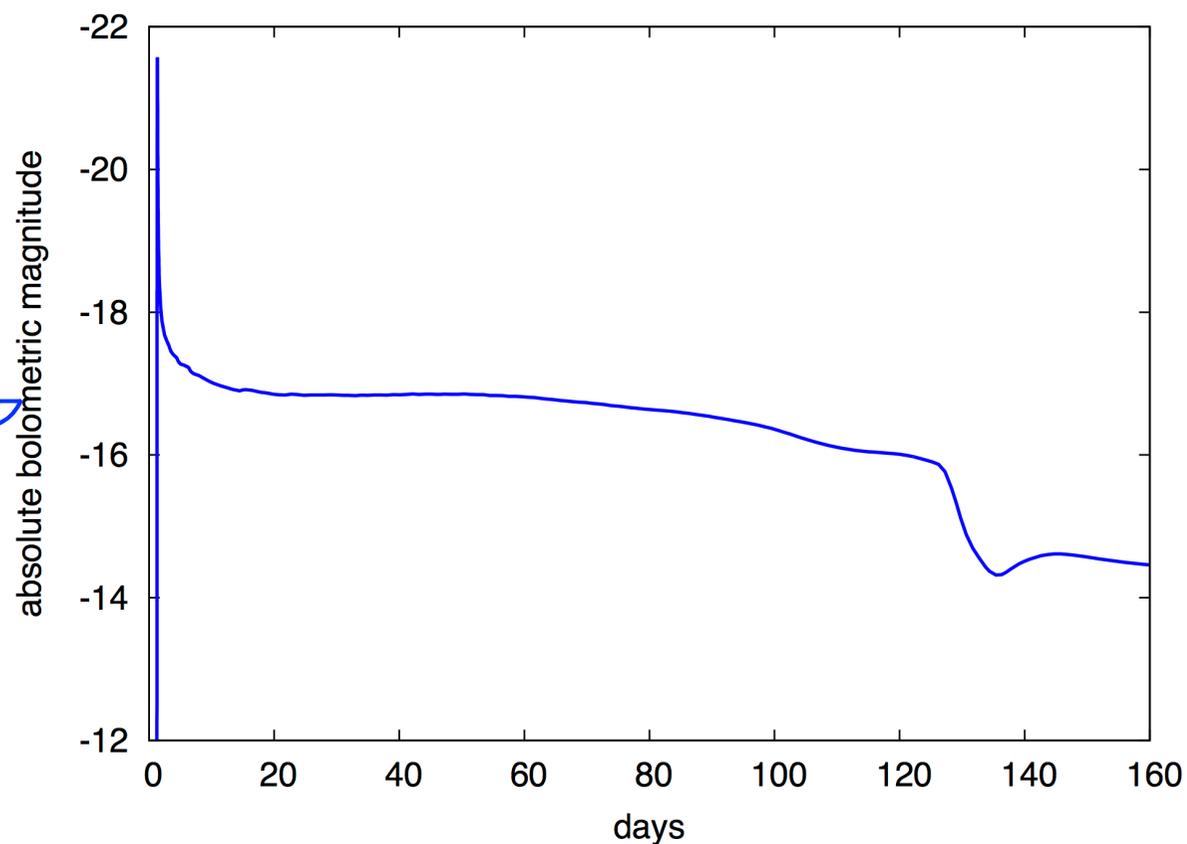
超新星の標準的な光源

- 爆発時の衝撃波の残す熱エネルギー
 - 主に半径の大きな星（赤色超巨星）：断熱膨張が効きにくい
 - 水素を多く含む
- 爆発時に合成された放射性崩壊元素の崩壊エネルギー
 - 主に半径の小さな星（ウォルフ・ライエ星、青色超巨星）
 - 水素が少ないことが多い
 - 爆発初期はニッケル56の崩壊が卓越、その後コバルト56



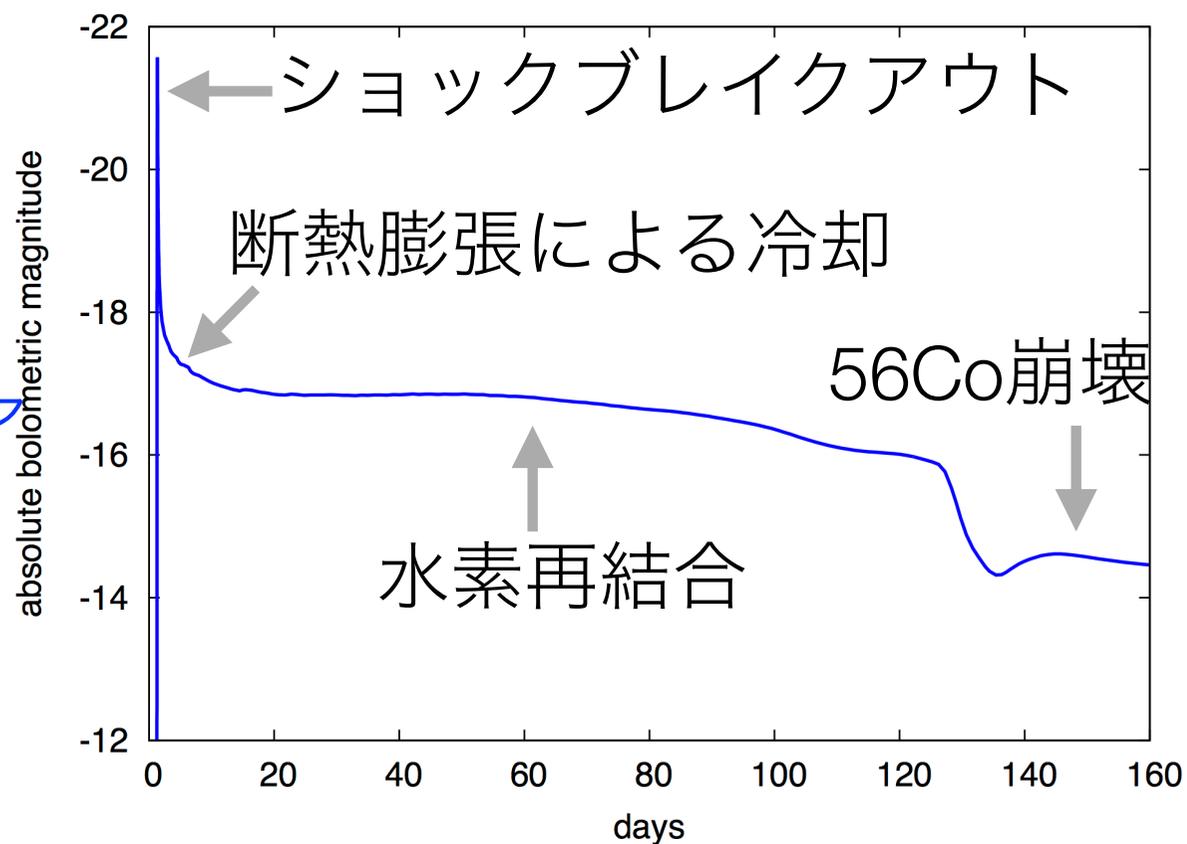
赤色超巨星からの超新星（II型超新星）の光源

- 赤色超巨星（ $\sim 100\text{-}1000 R_{\text{sun}}$ ）：半径の大きな水素を多く持つ星
- 主に爆発時の衝撃波の熱エネルギーで光る



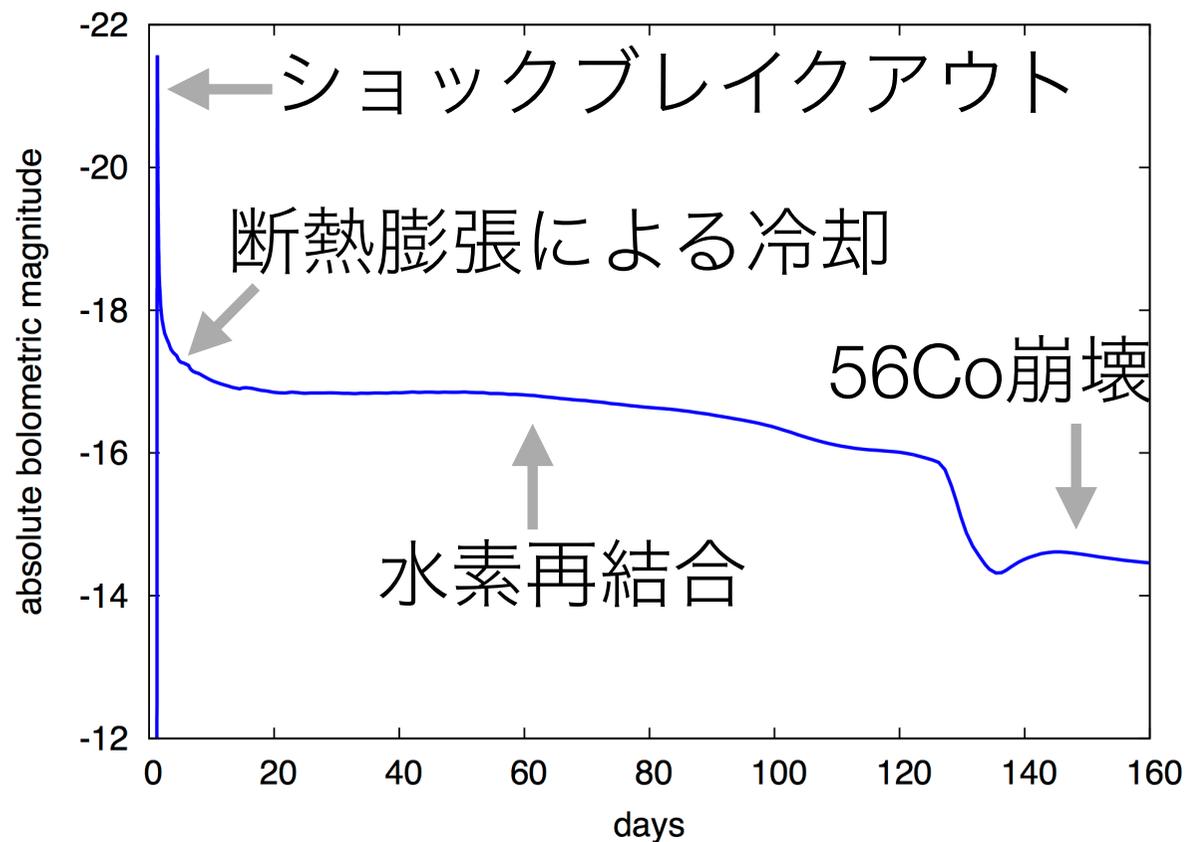
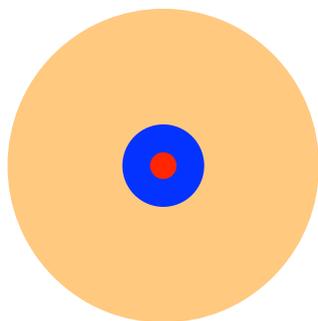
赤色超巨星からの超新星（II型超新星）の光源

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$



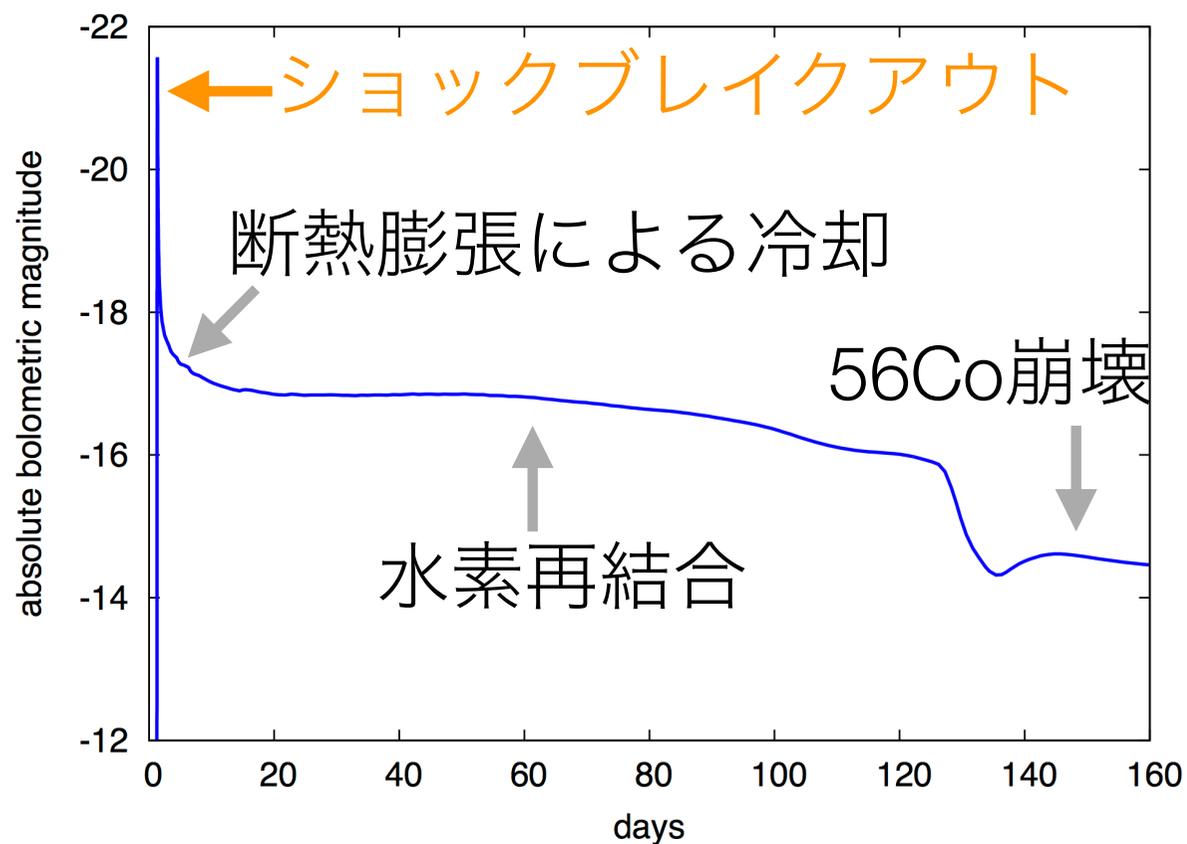
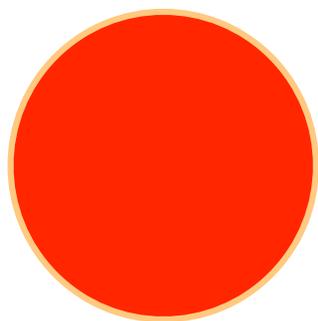
赤色超巨星からの超新星（II型超新星）の光源

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$



赤色超巨星からの超新星（II型超新星）の光源

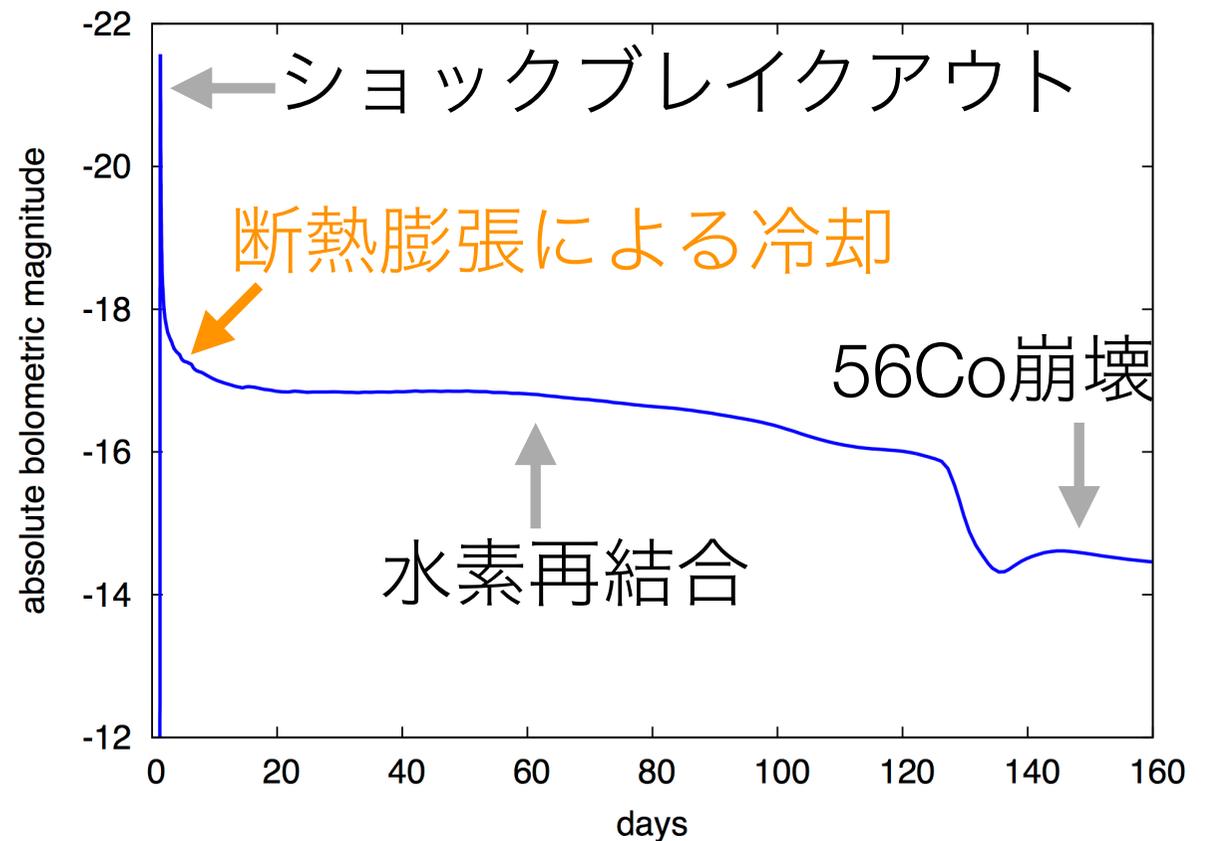
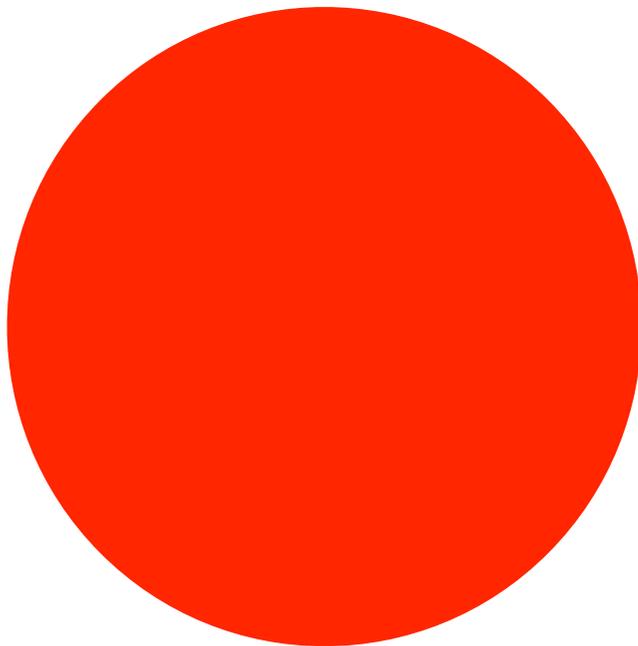
$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$



赤色超巨星からの超新星（II型超新星）の光源

$$T \propto R^{-1}$$

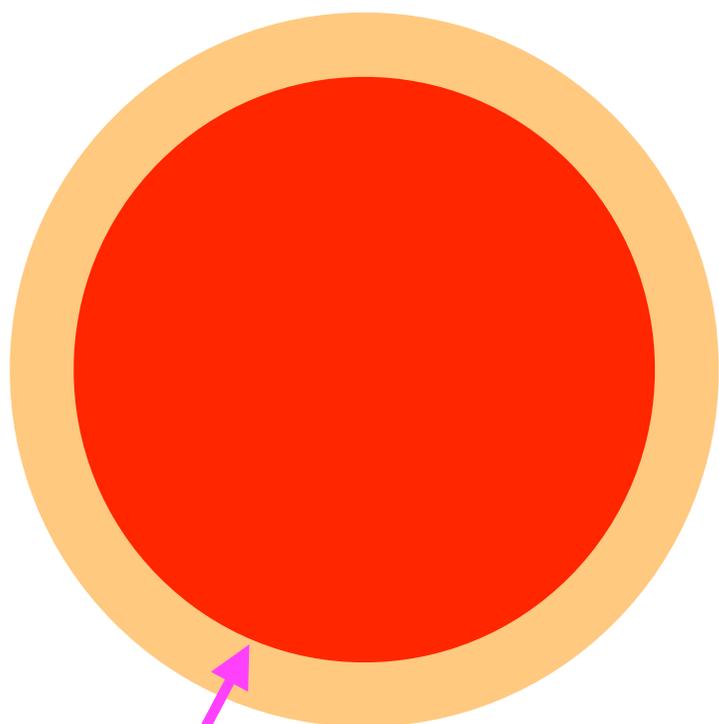
$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$



赤色超巨星からの超新星（II型超新星）の光源

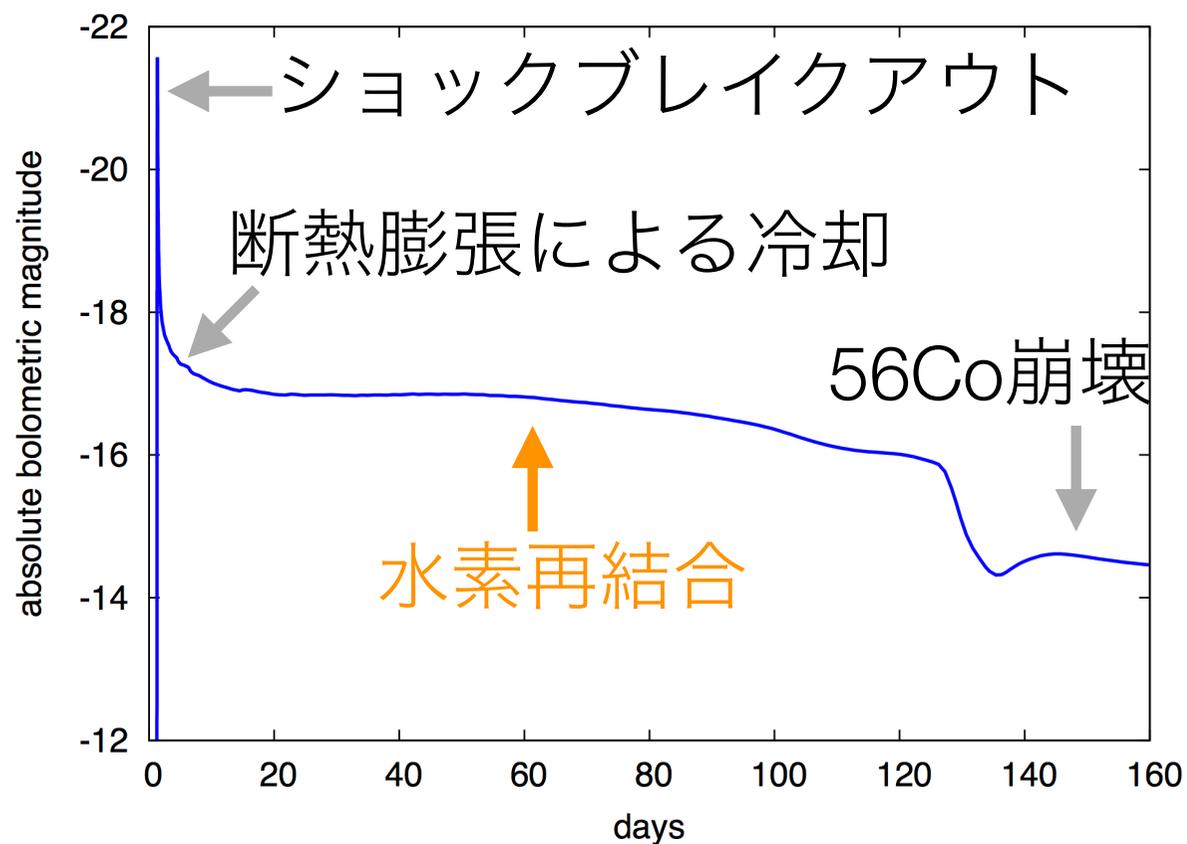
$$T \propto R^{-1}$$

$$T \sim 6000 \text{ K}$$



水素再電離の前線

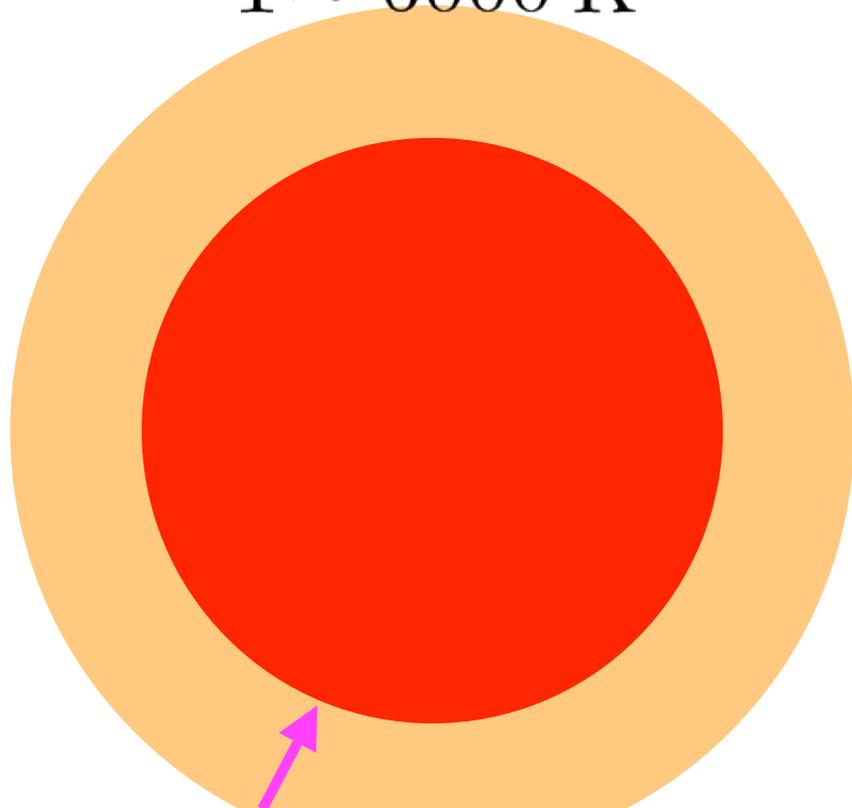
$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$



赤色超巨星からの超新星（II型超新星）の光源

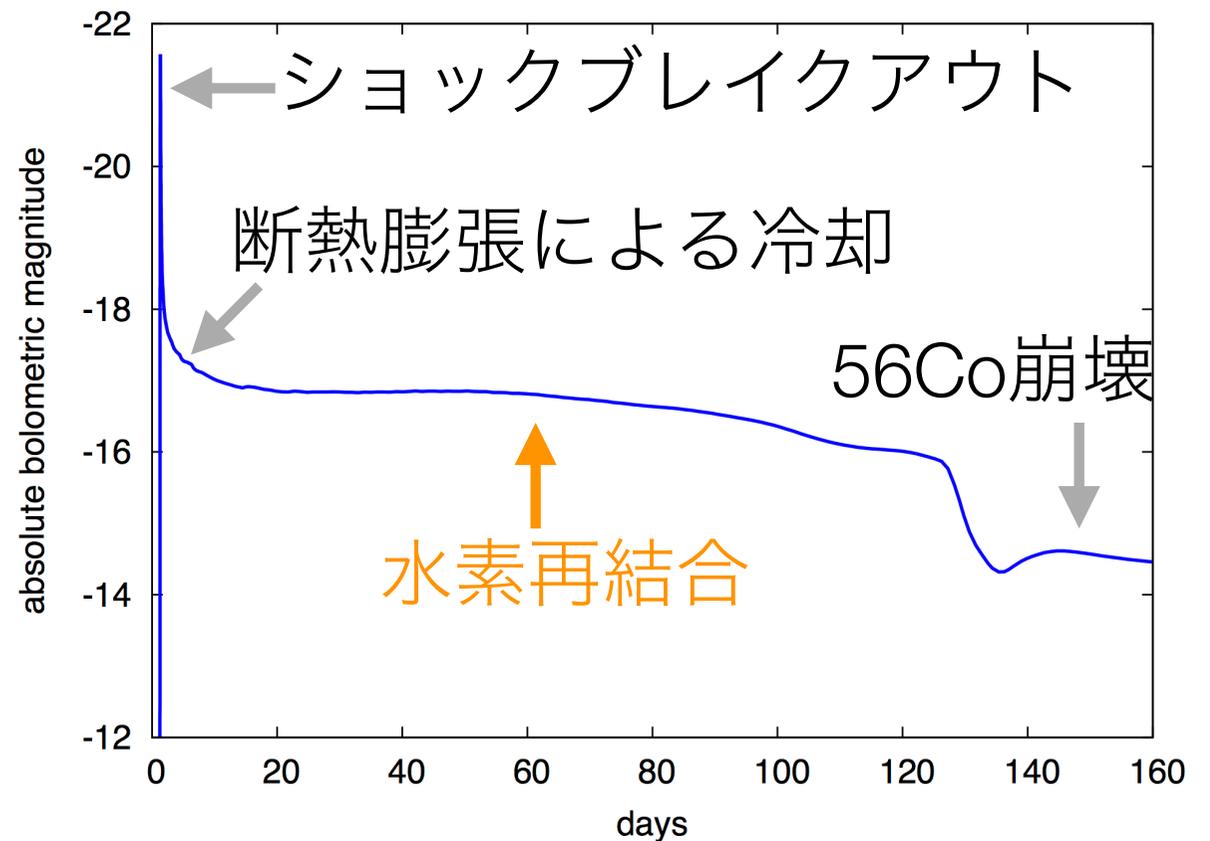
$$T \propto R^{-1}$$

$T \sim 6000 \text{ K}$

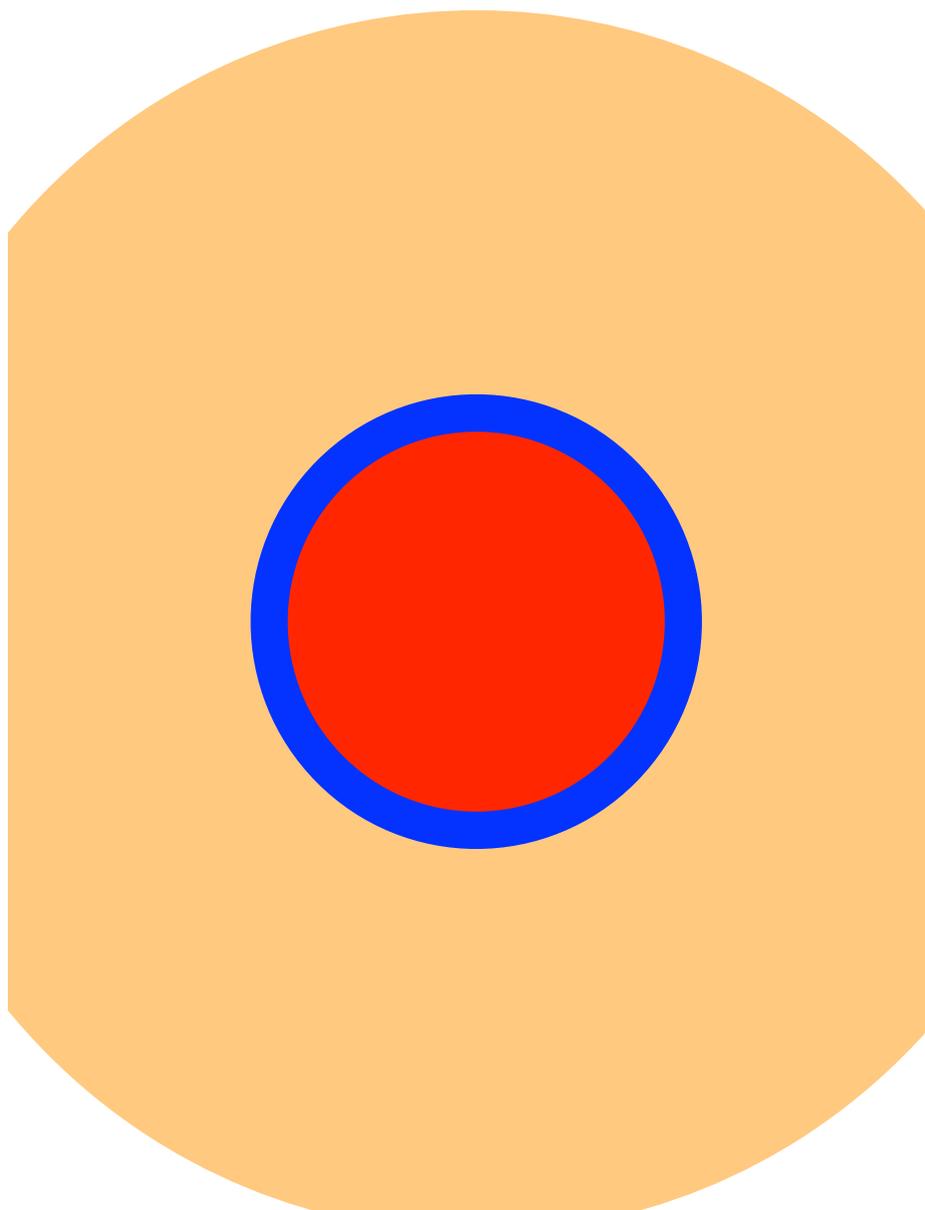


水素再電離の前線

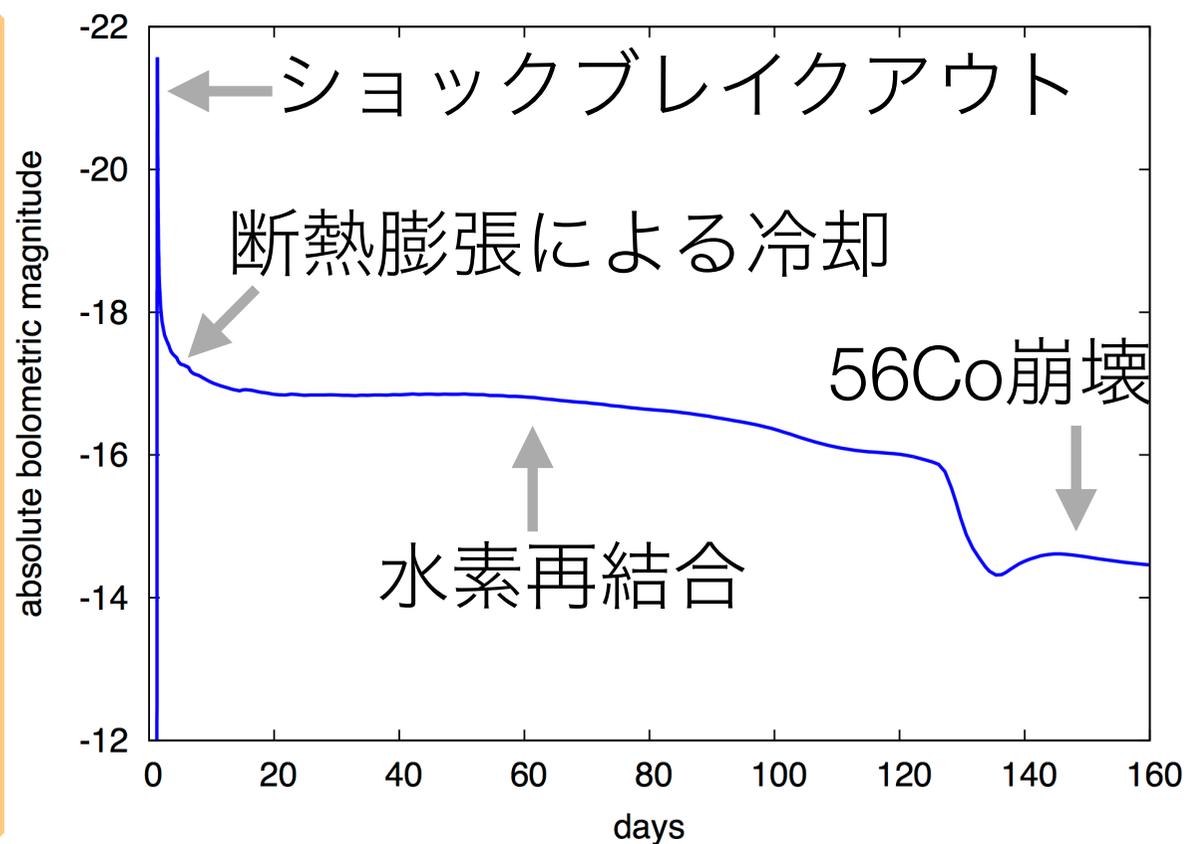
$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$



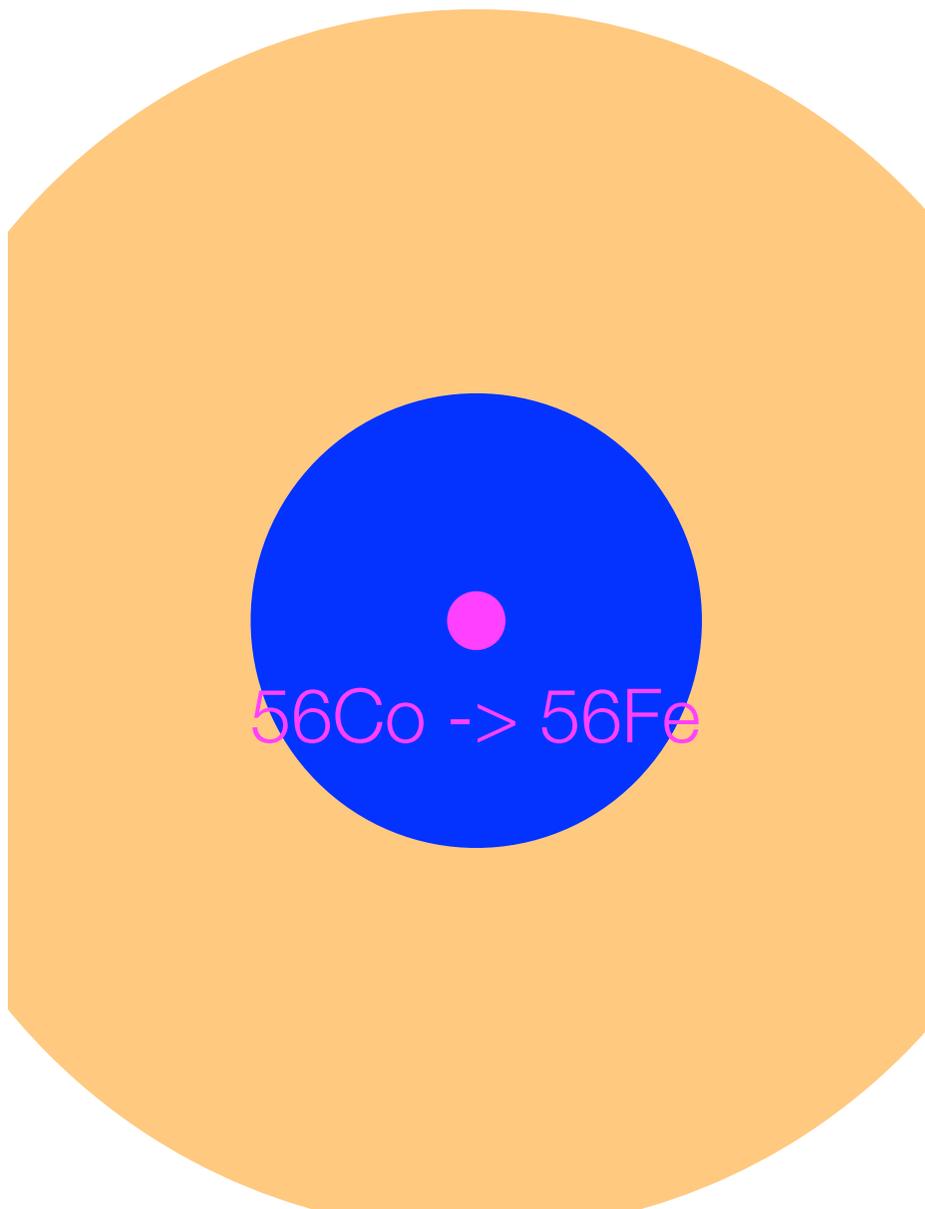
赤色超巨星からの超新星（II型超新星）の光源



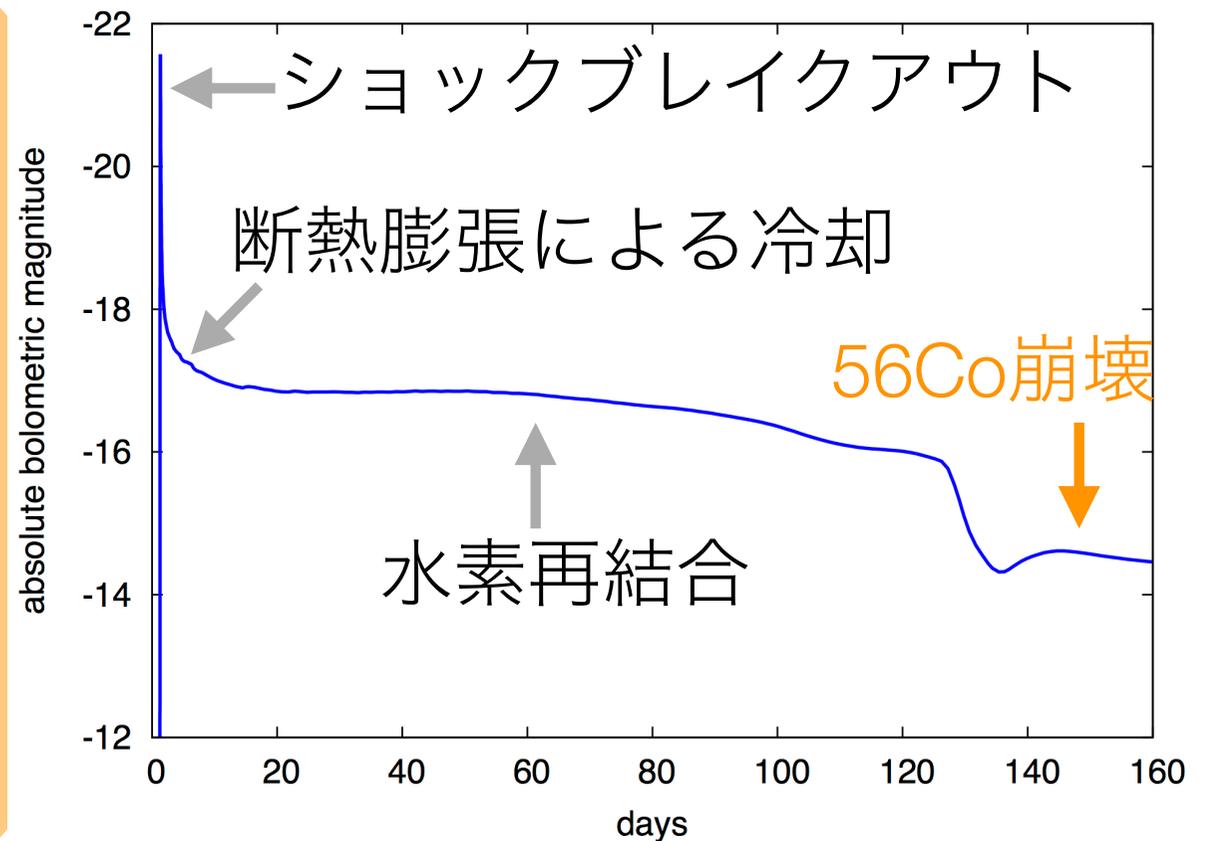
$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$



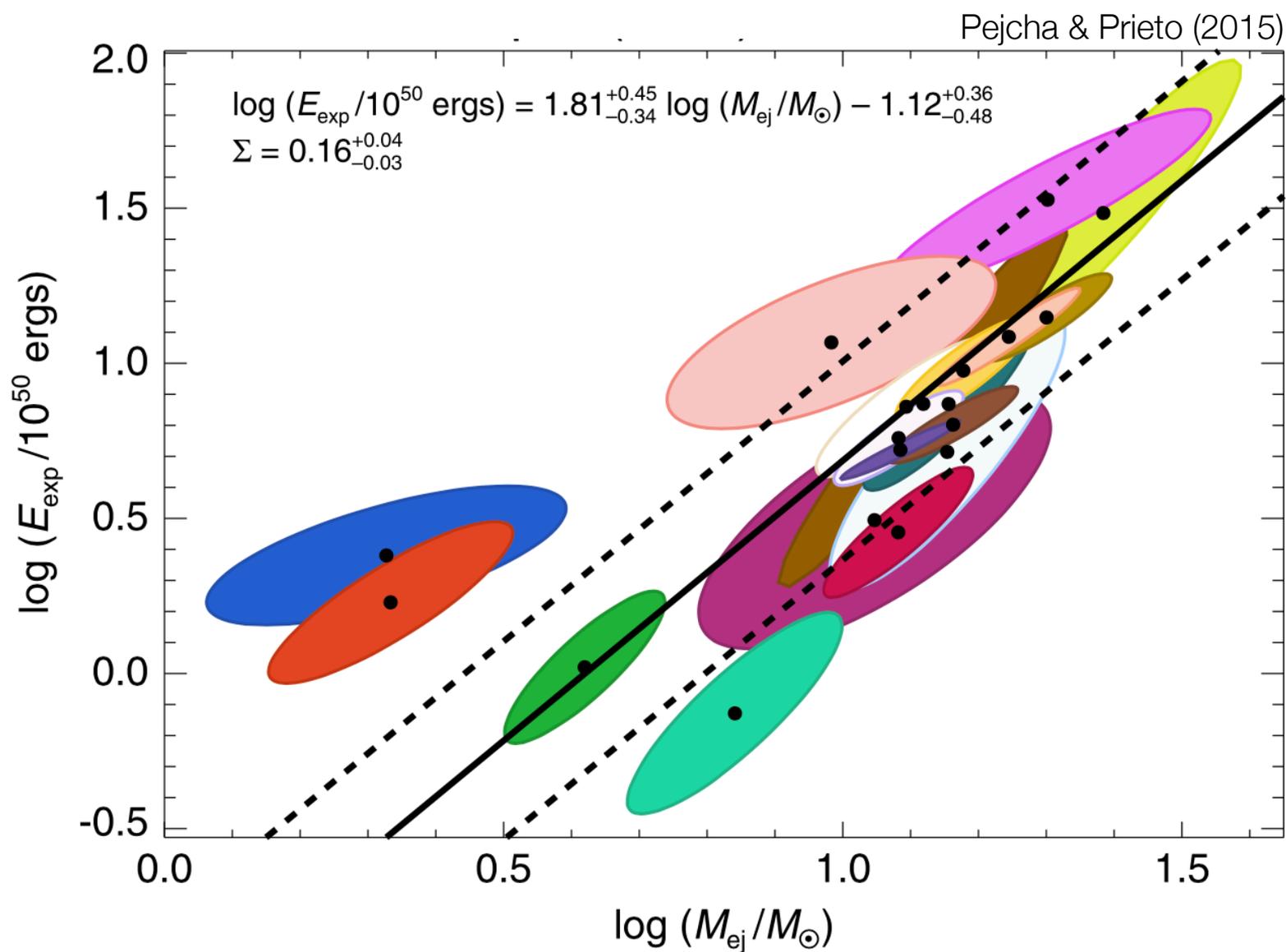
赤色超巨星からの超新星（II型超新星）の光源



$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

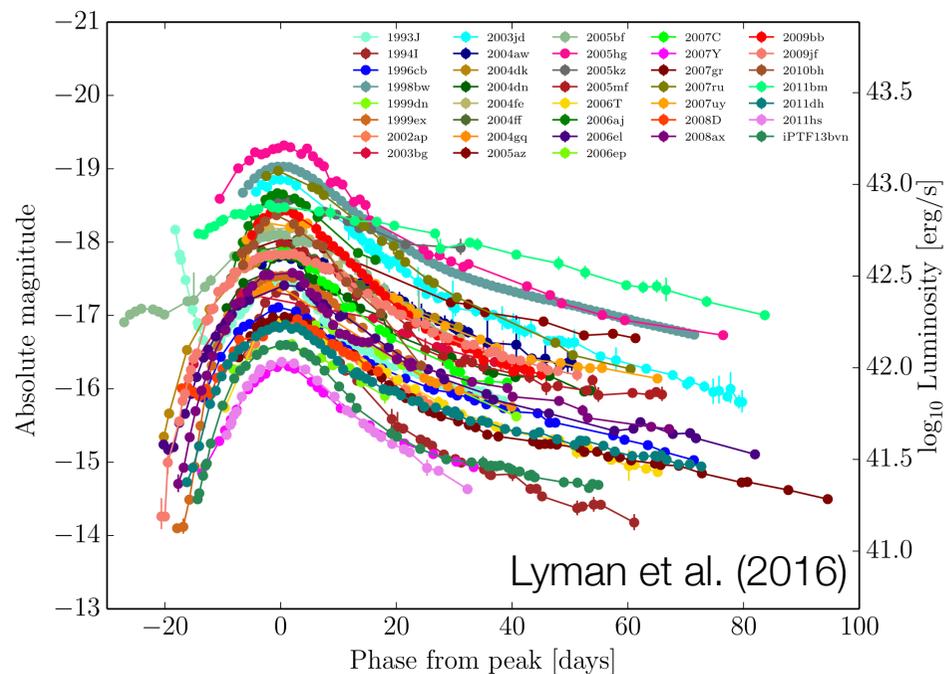
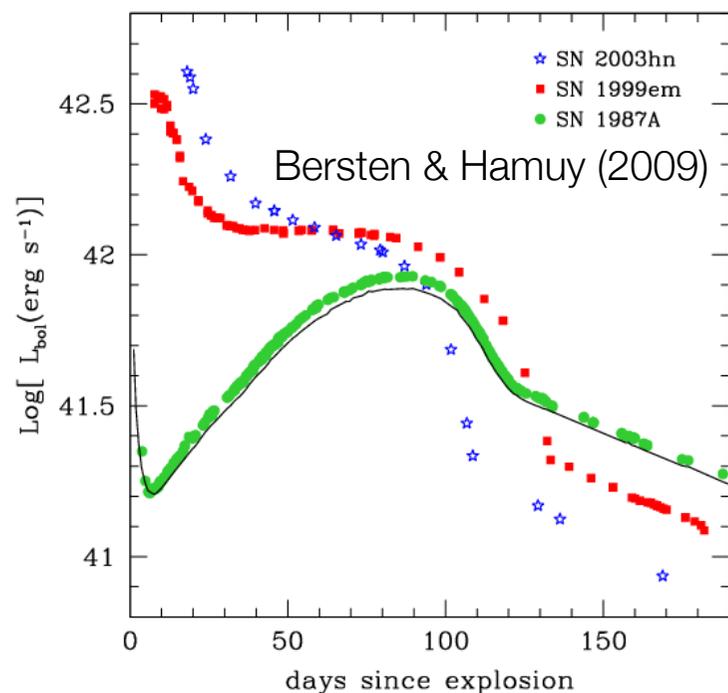


赤色超巨星からの超新星（II型超新星）の性質



半径の小さい星からの超新星爆発

- ウォルフ・ライエ星、青色超巨星 ($\sim 1 - 10 R_{\text{sun}}$)
 - 断熱膨張による冷却が大きく効く
 - 爆発時の熱エネルギーはすぐに無視できる程度に
- 主にニッケル56の放射性崩壊熱で明るくなる
 - ニッケル56の量が多いほど明るい



水素をほとんど含まない超新星(Ib, Ic, IIb)の性質

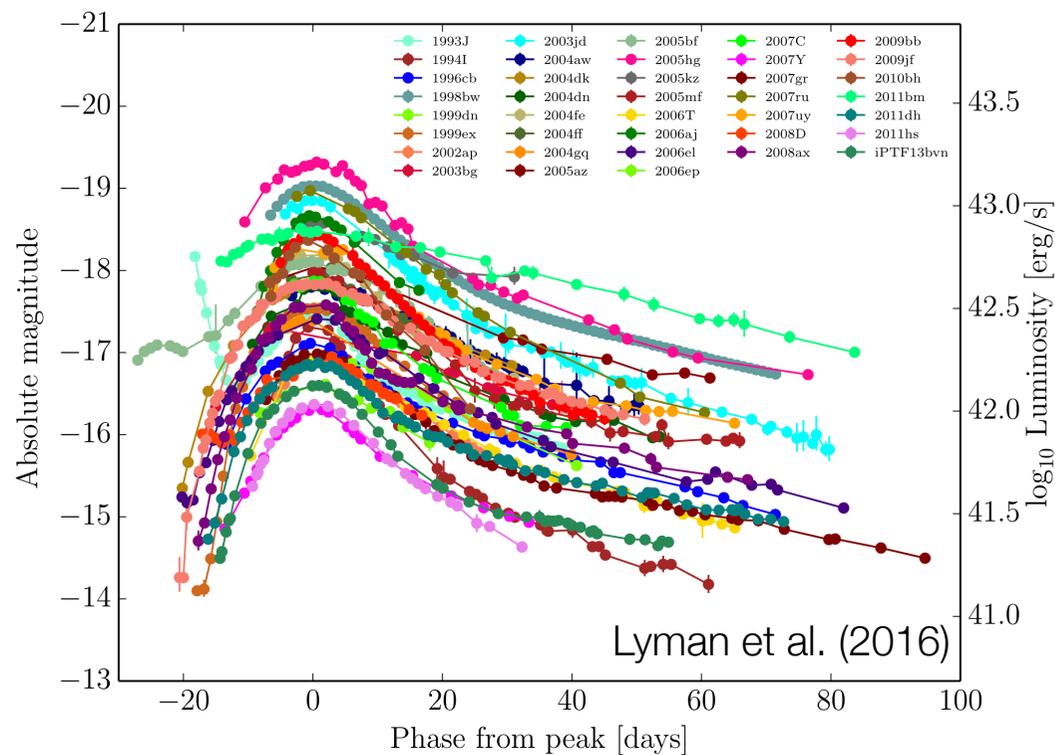
- 光度曲線は爆発噴出物中での拡散時間で決まる

$$t_{\text{rise}} \propto \kappa^{0.5} M_{\text{ej}}^{3/4} E_{\text{ej}}^{-1/4}$$

- スペクトルから速度が分かる

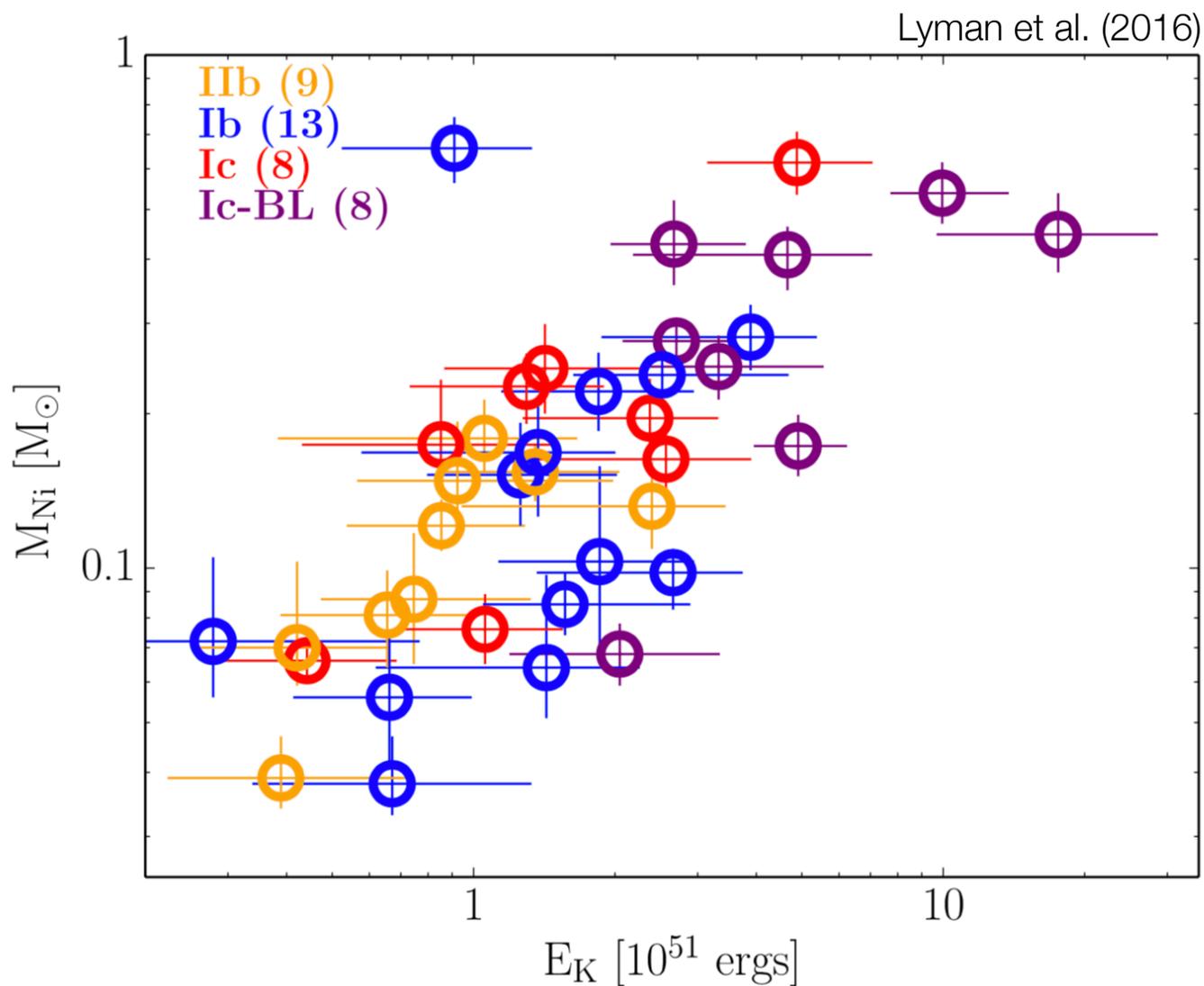
$$v_{\text{ej}} \propto E_{\text{ej}}^{1/2} M_{\text{ej}}^{-1/2}$$

- 両方分かればエネルギーと質量がざっくりと決まる



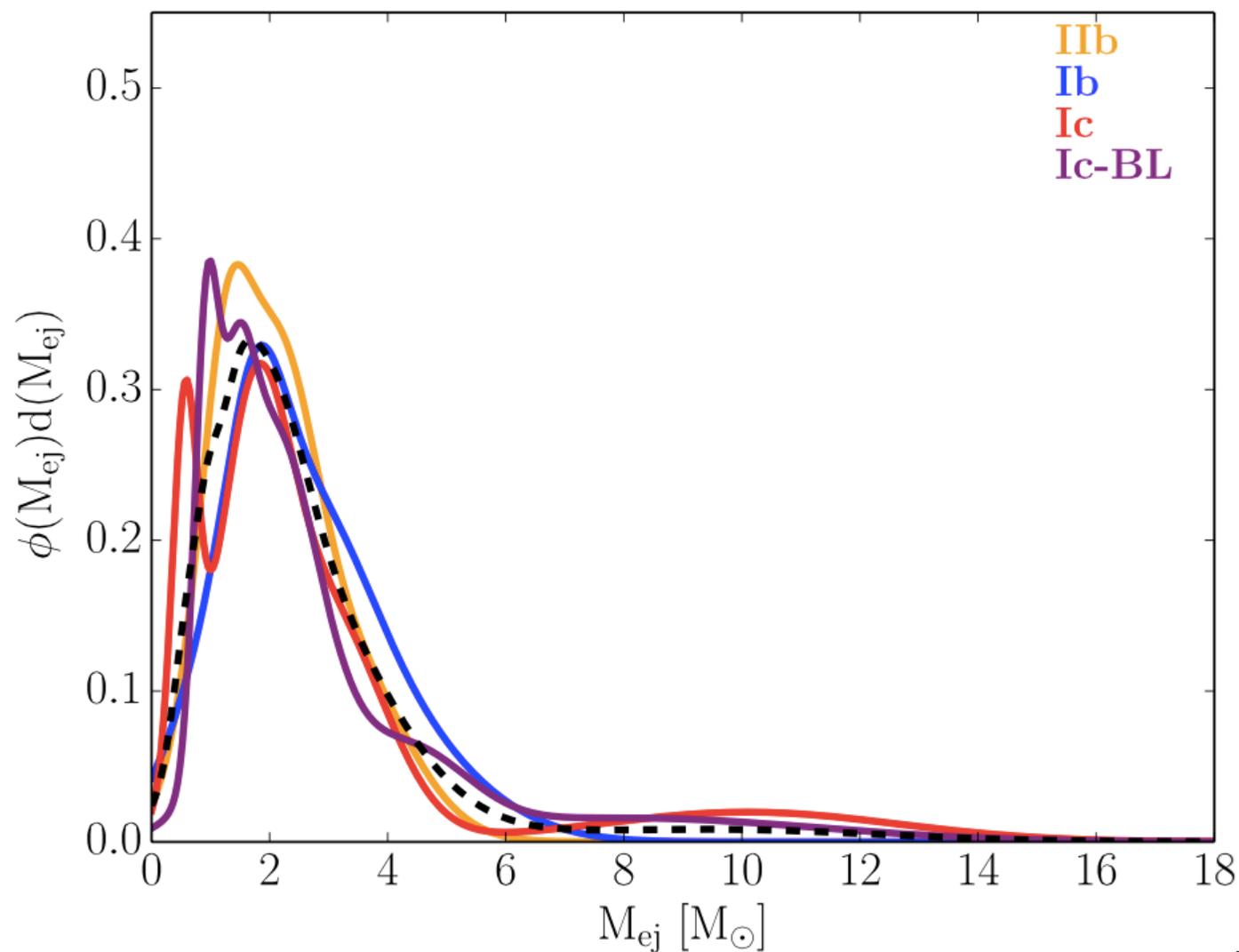
水素をほとんど含まない超新星(Ib, Ic, IIb)の性質

- 爆発エネルギーとニッケル56質量

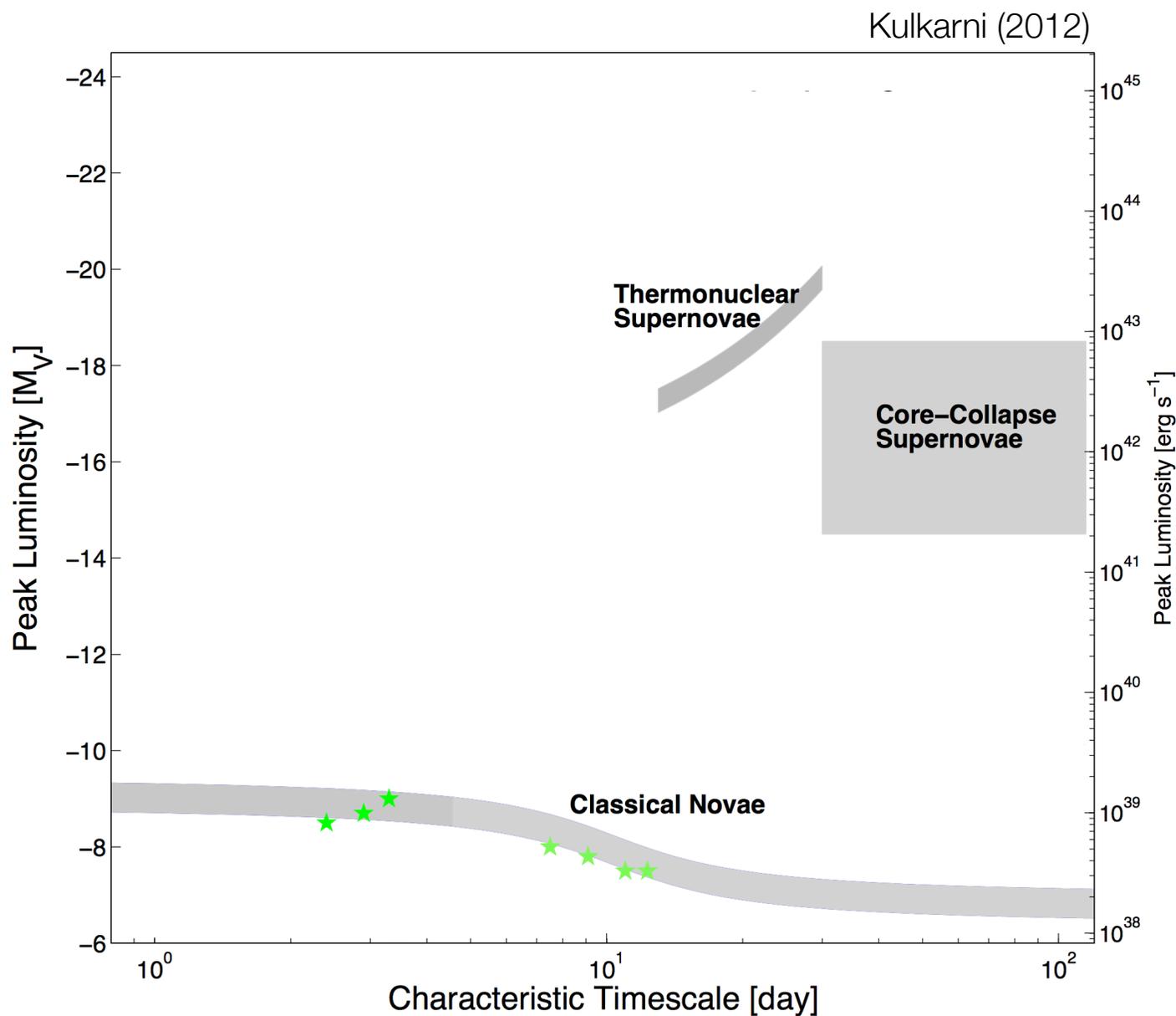


水素をほとんど含まない超新星(Ib, Ic, IIb)の性質

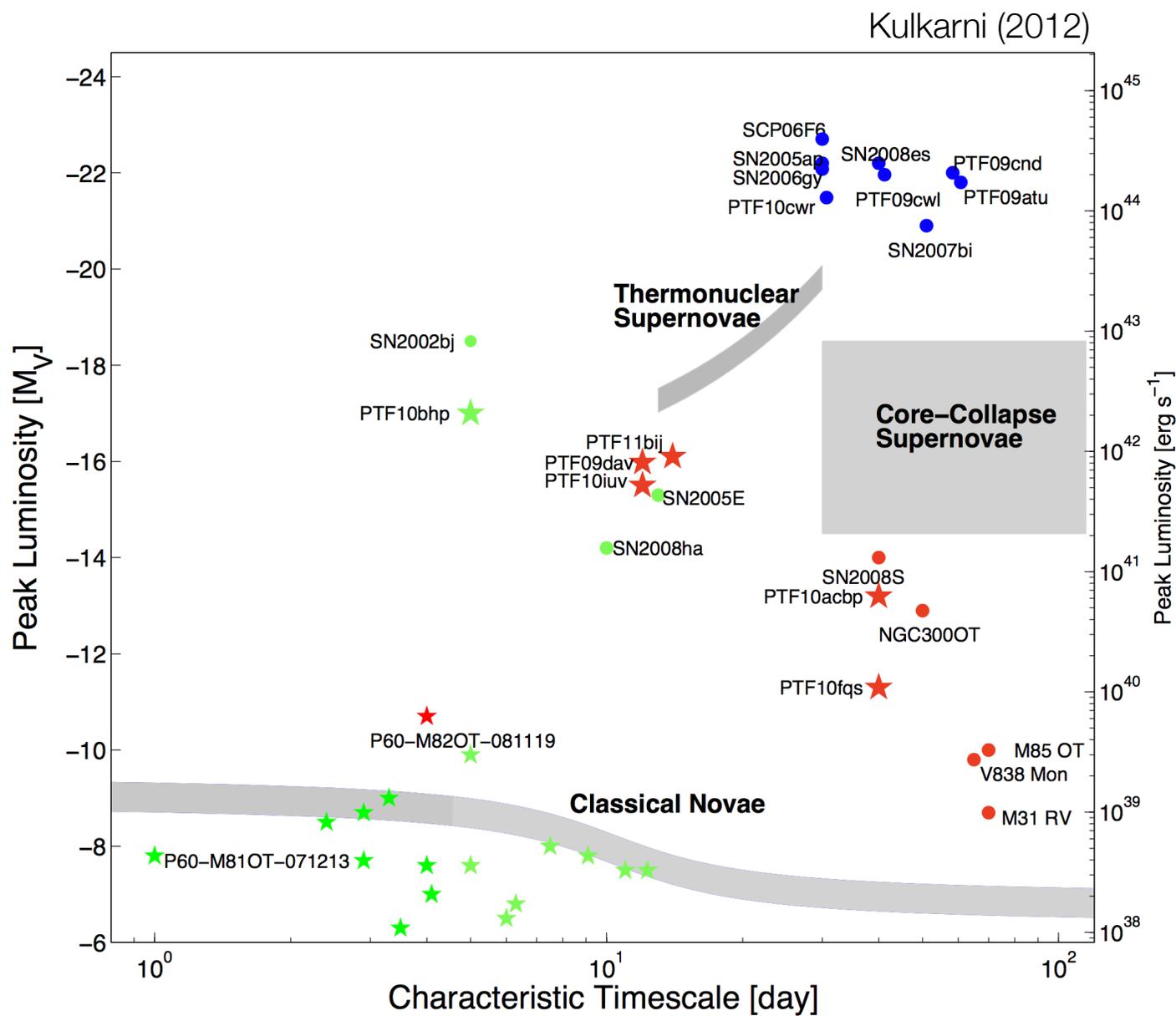
- 爆発噴出物の質量



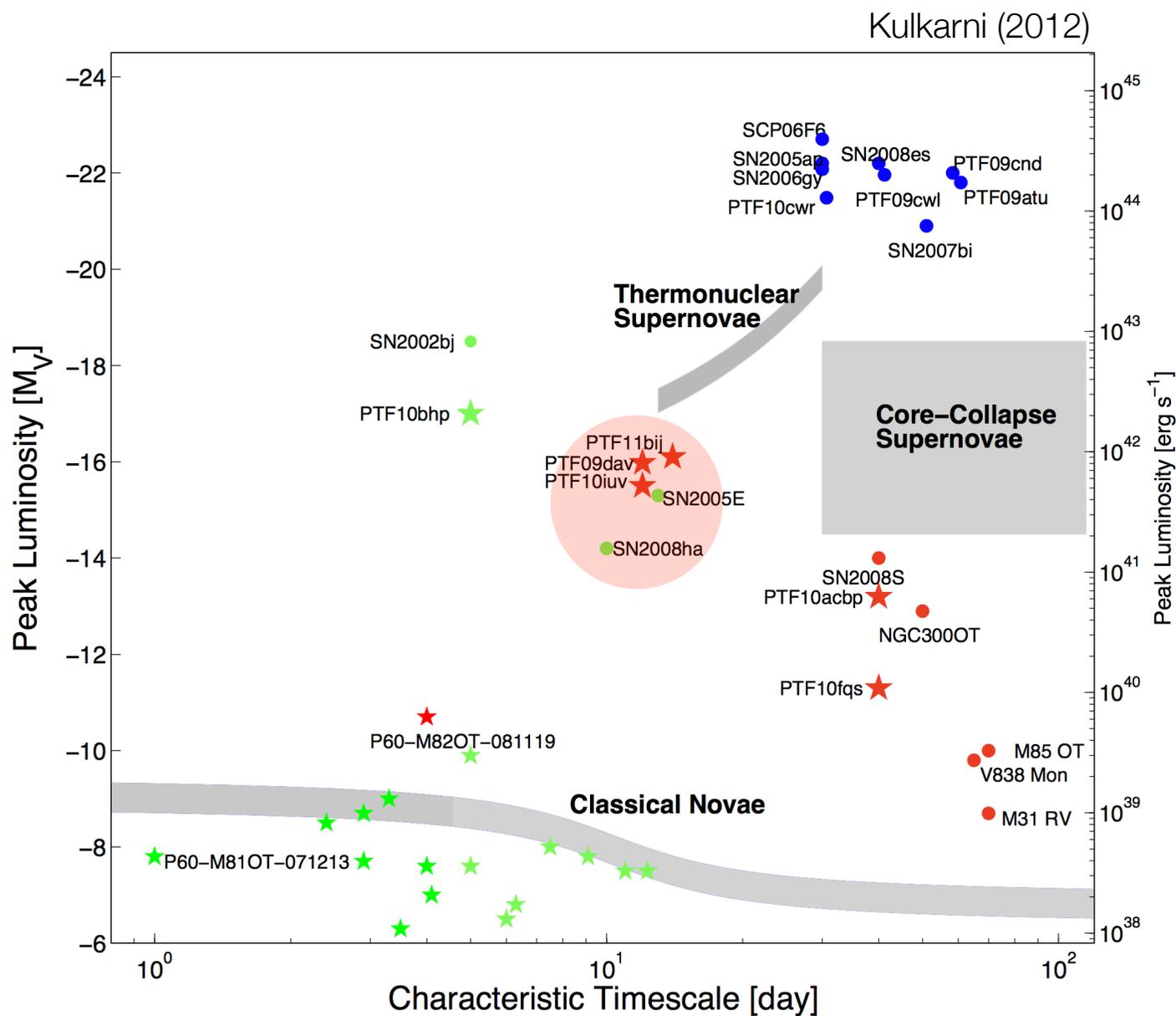
標準的な超新星の明るさと時間スケール



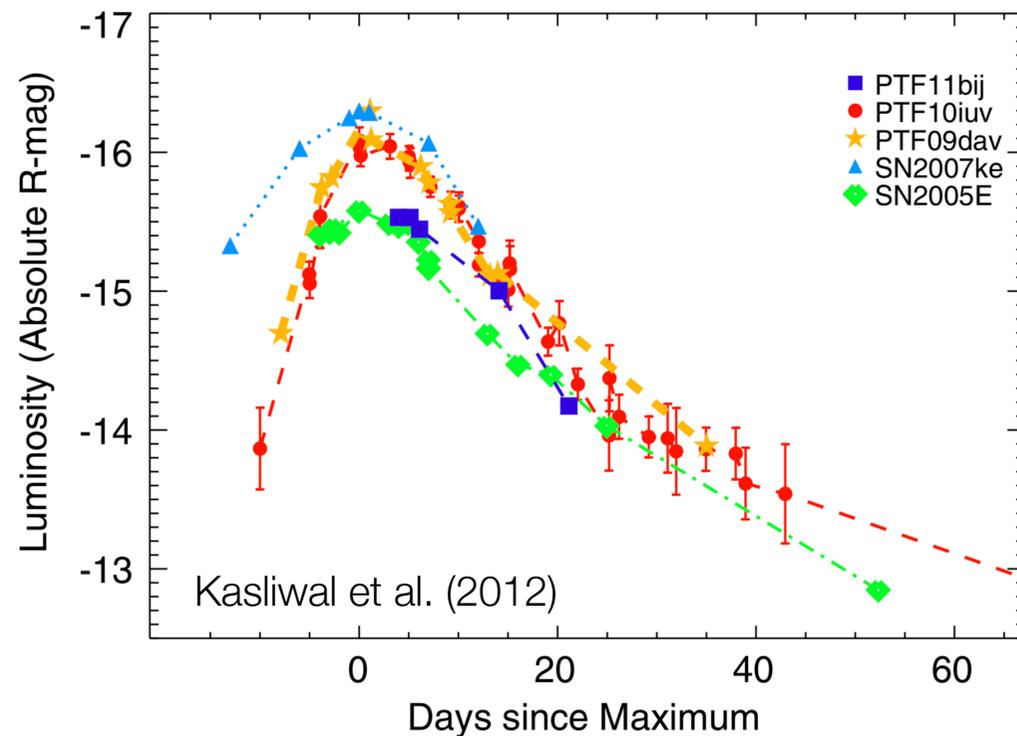
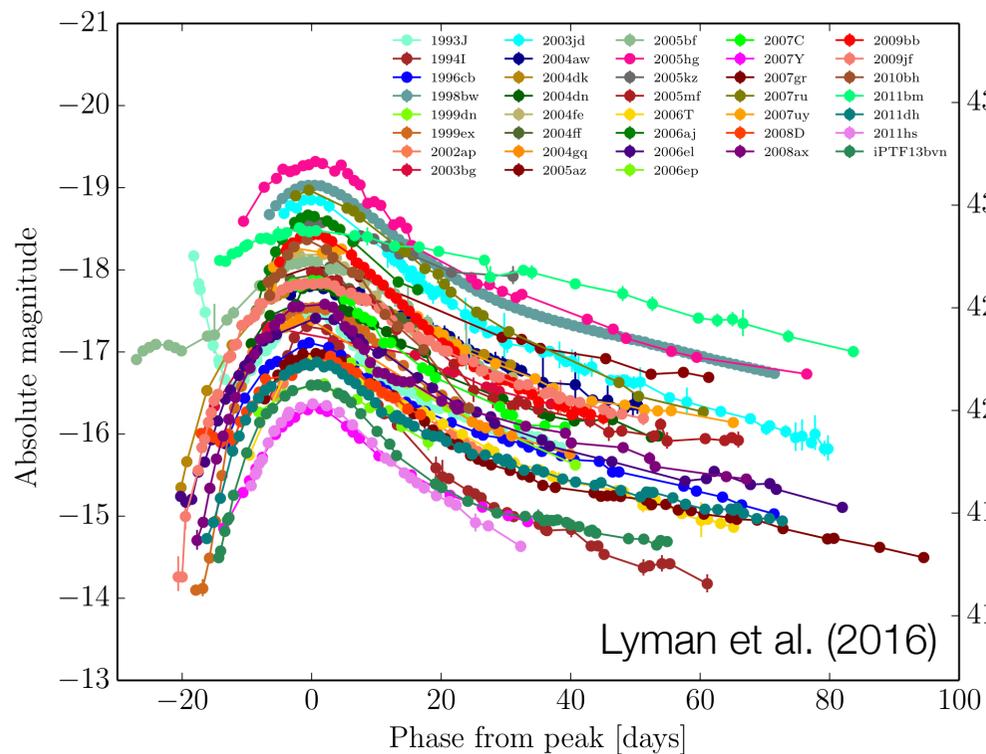
標準外の超新星



標準外の超新星



Faint & fast supernovae

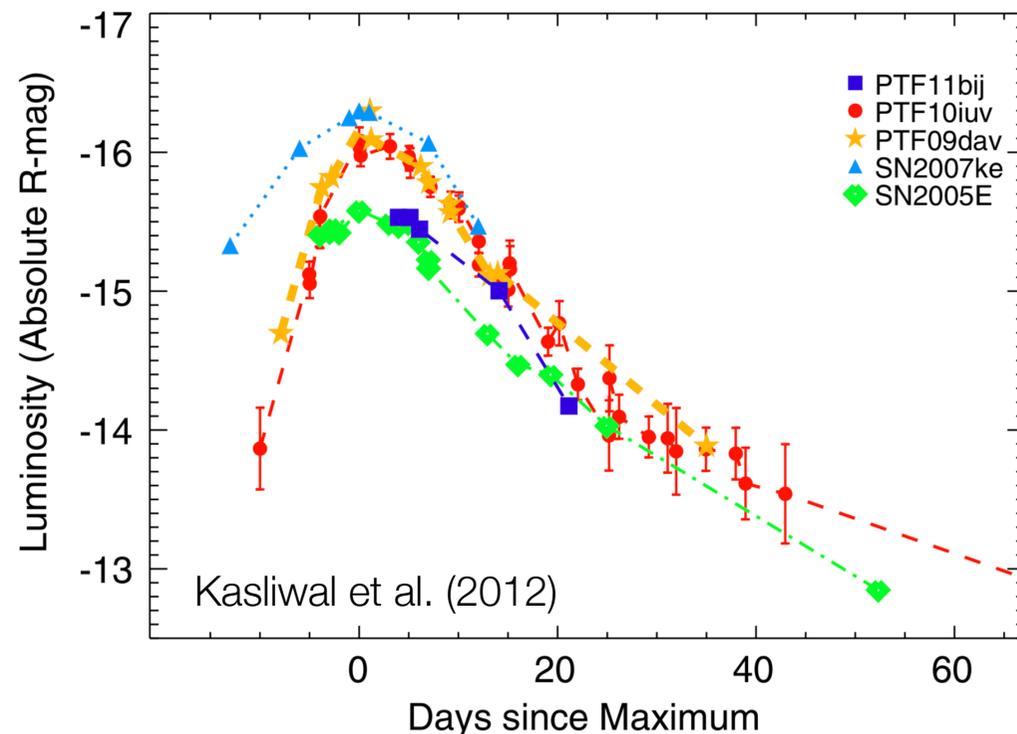
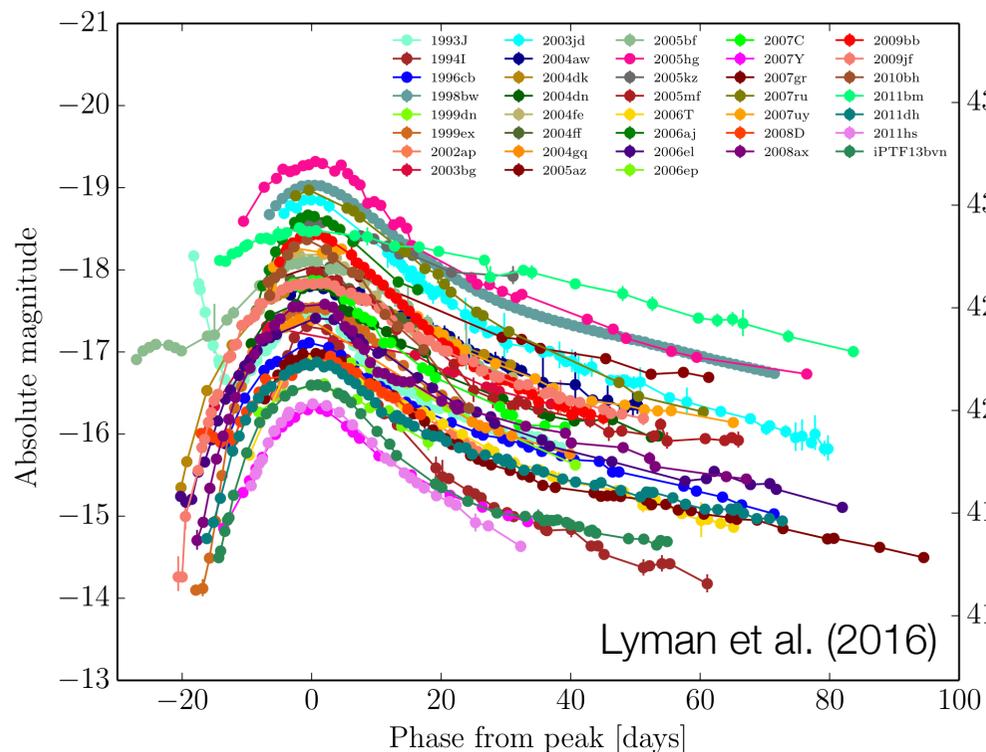


- faint — ニッケル 5 6 の質量が小さい
- fast — 質量が小さい

$$t_{\text{rise}} \propto \kappa^{0.5} M_{\text{ej}}^{3/4} E_{\text{ej}}^{-1/4}$$

$$v_{\text{ej}} \propto E_{\text{ej}}^{1/2} M_{\text{ej}}^{-1/2}$$

Faint & fast supernovae

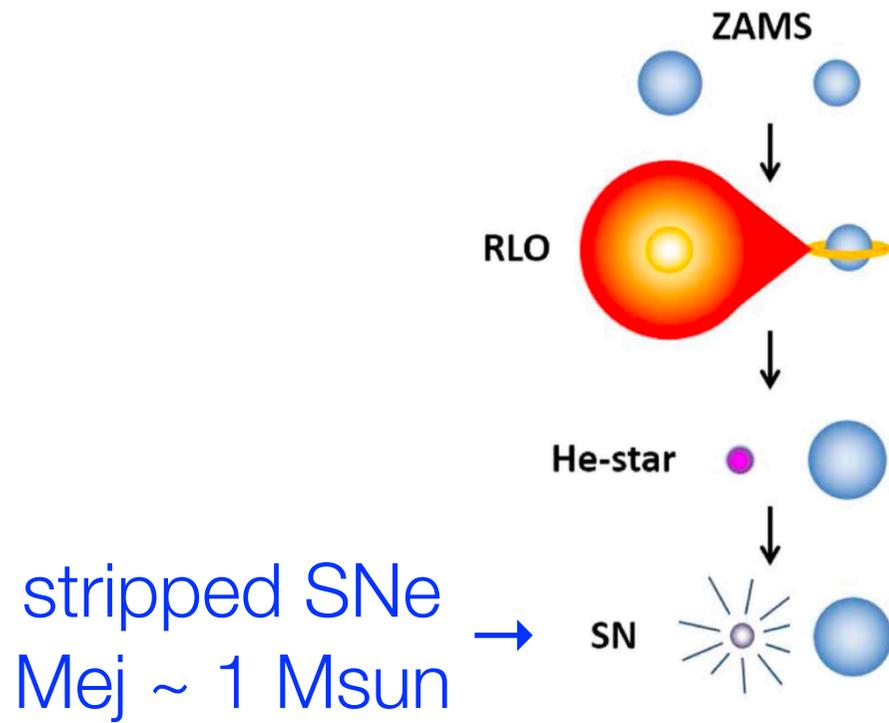


- faint — ニッケル 5 6 の質量が小さい ~ 0.01 Msun
- fast — 質量が小さい ~ 0.1 Msun ($E \sim 1050$ erg)

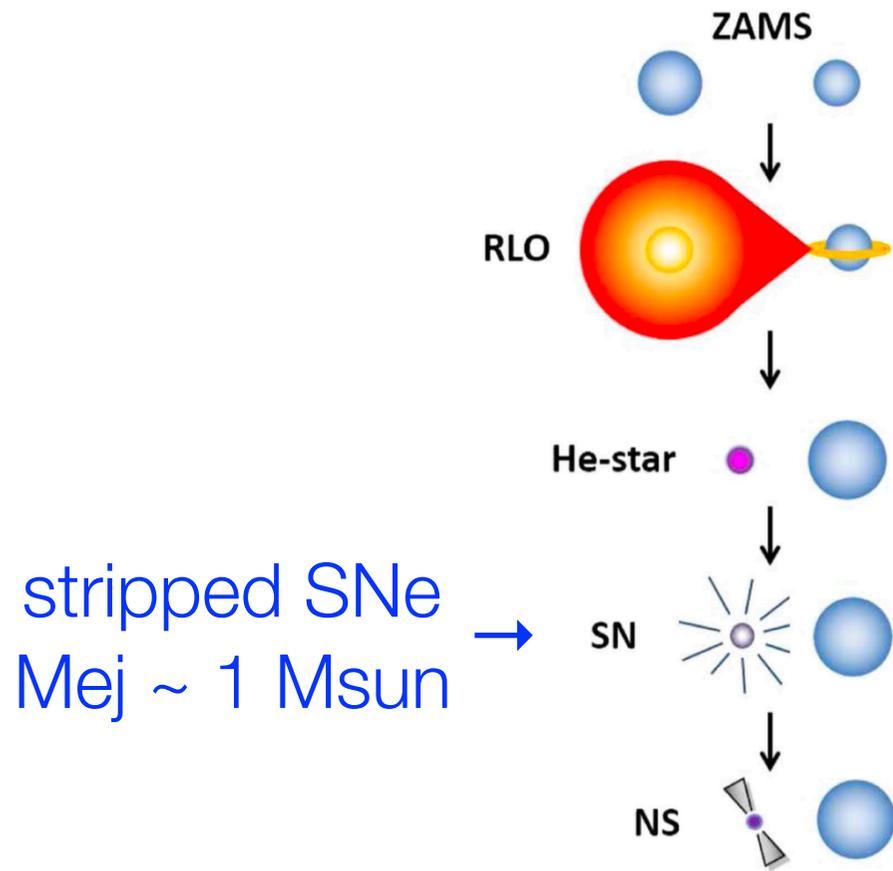
$$t_{\text{rise}} \propto \kappa^{0.5} M_{\text{ej}}^{3/4} E_{\text{ej}}^{-1/4}$$

$$v_{\text{ej}} \propto E_{\text{ej}}^{1/2} M_{\text{ej}}^{-1/2}$$

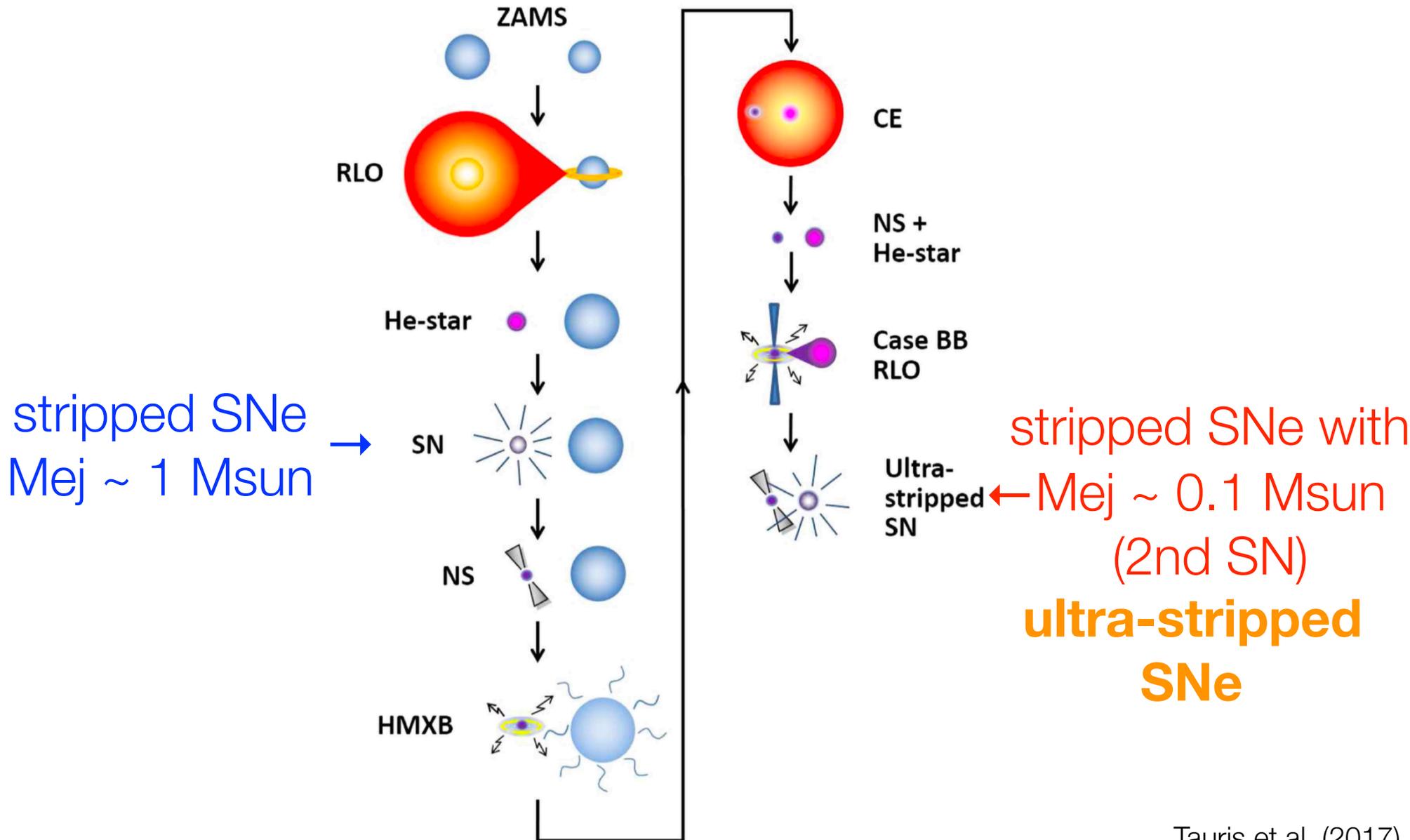
ultra stripping



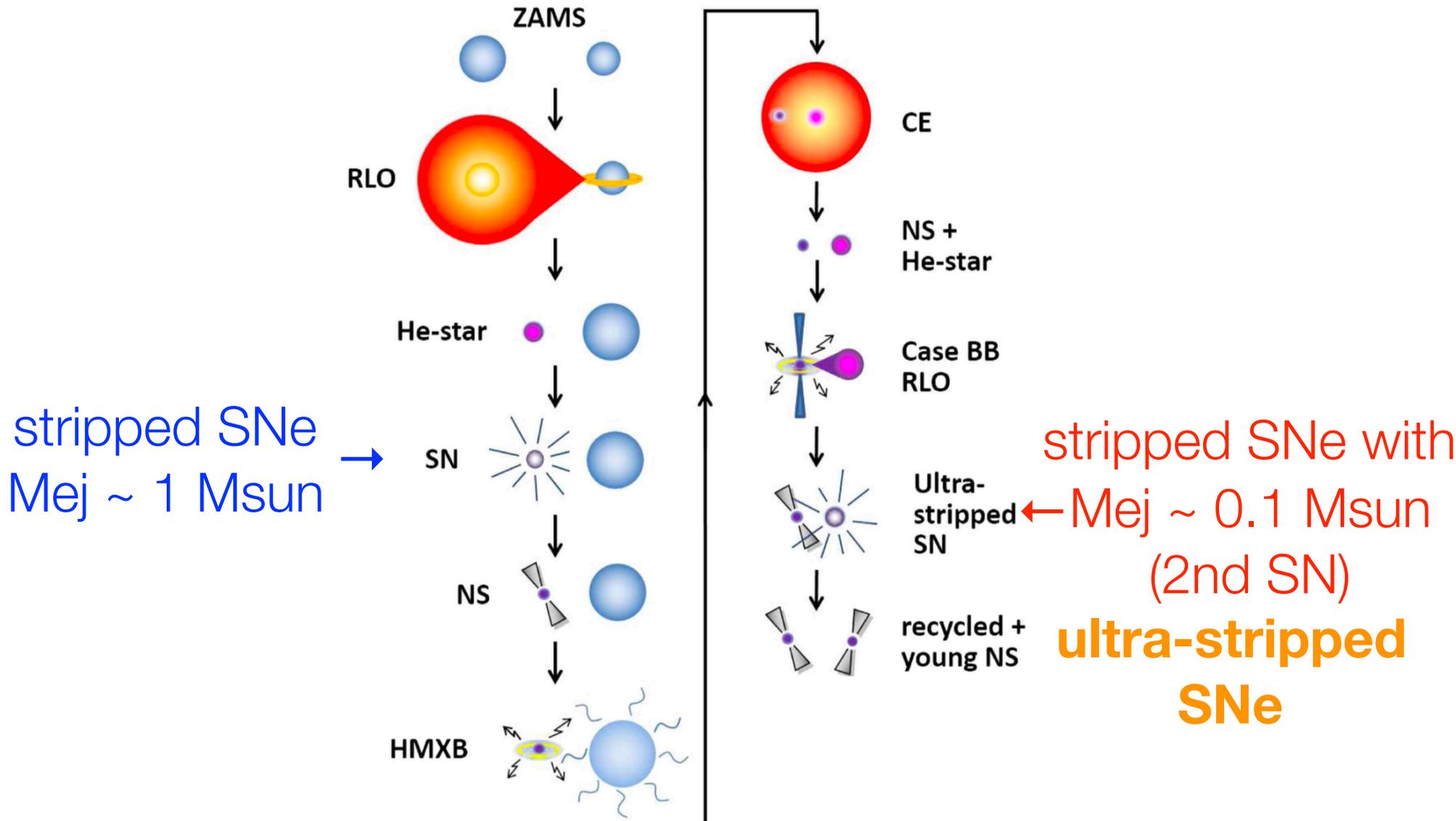
ultra stripping



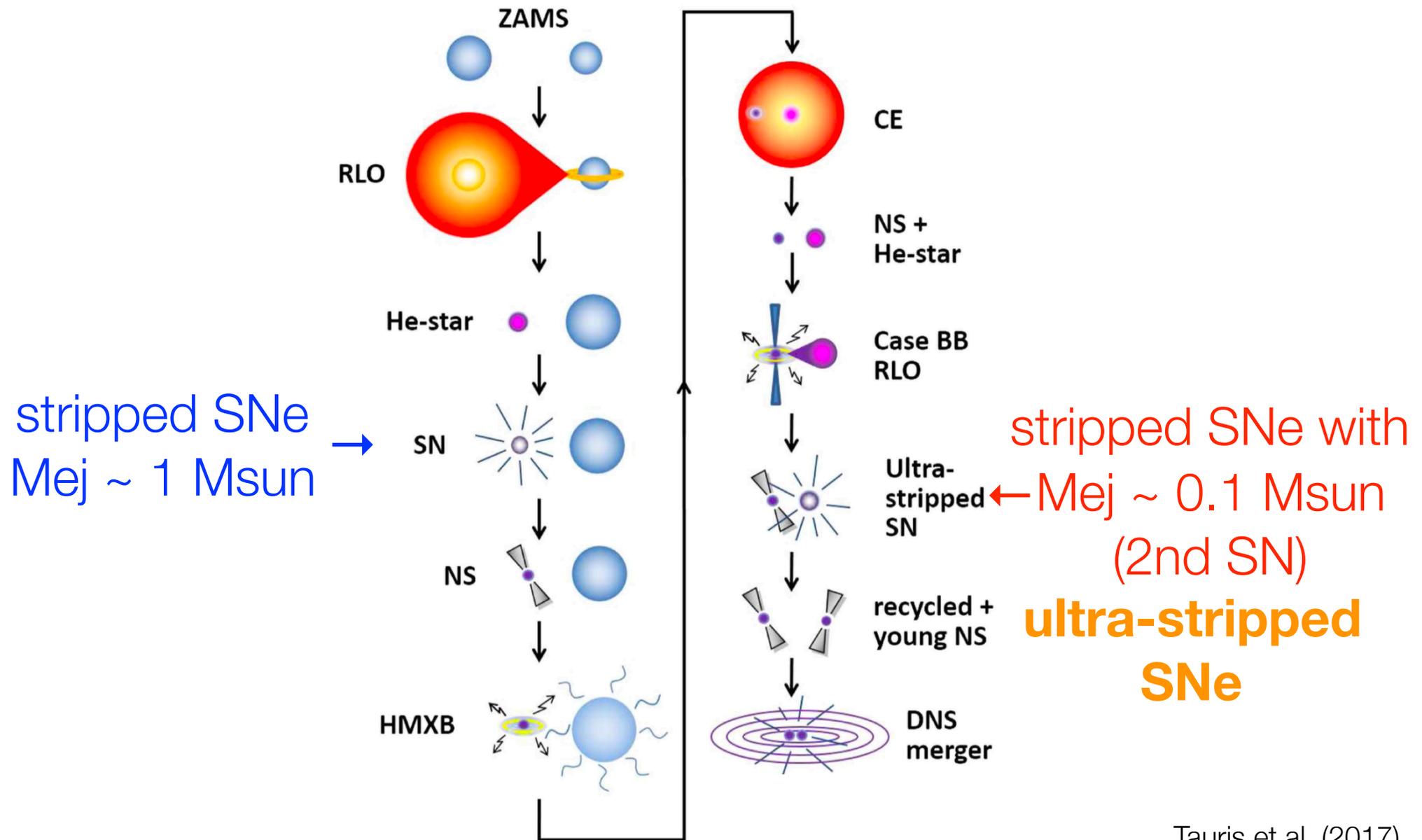
ultra stripping



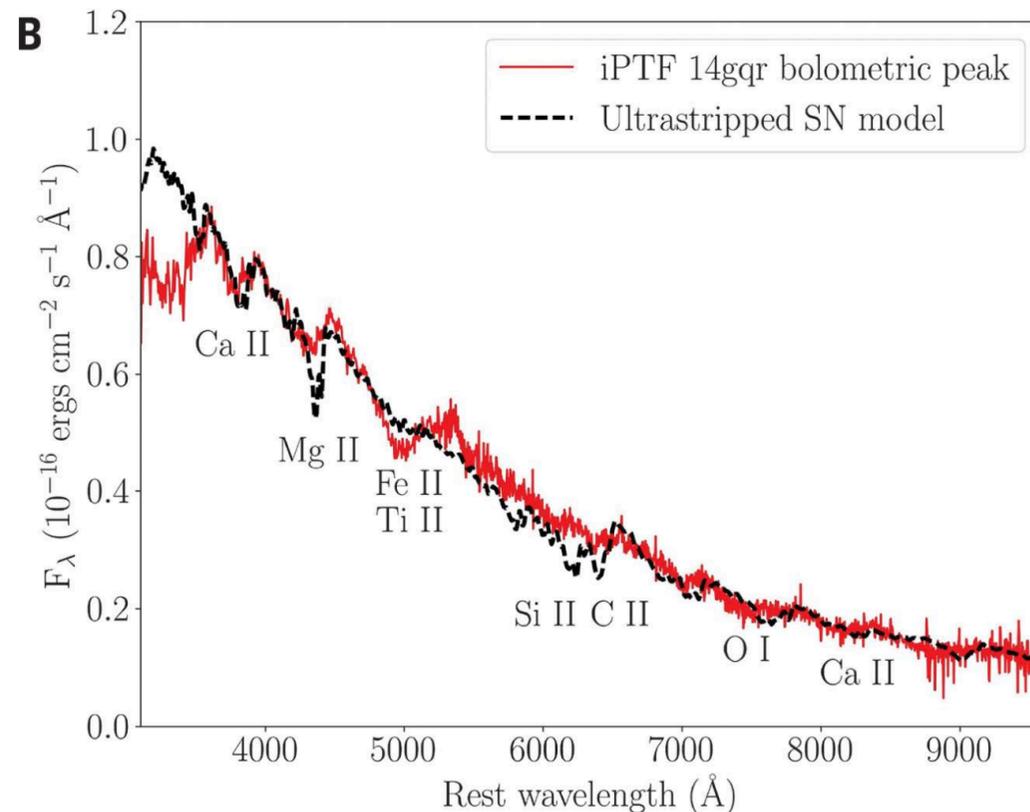
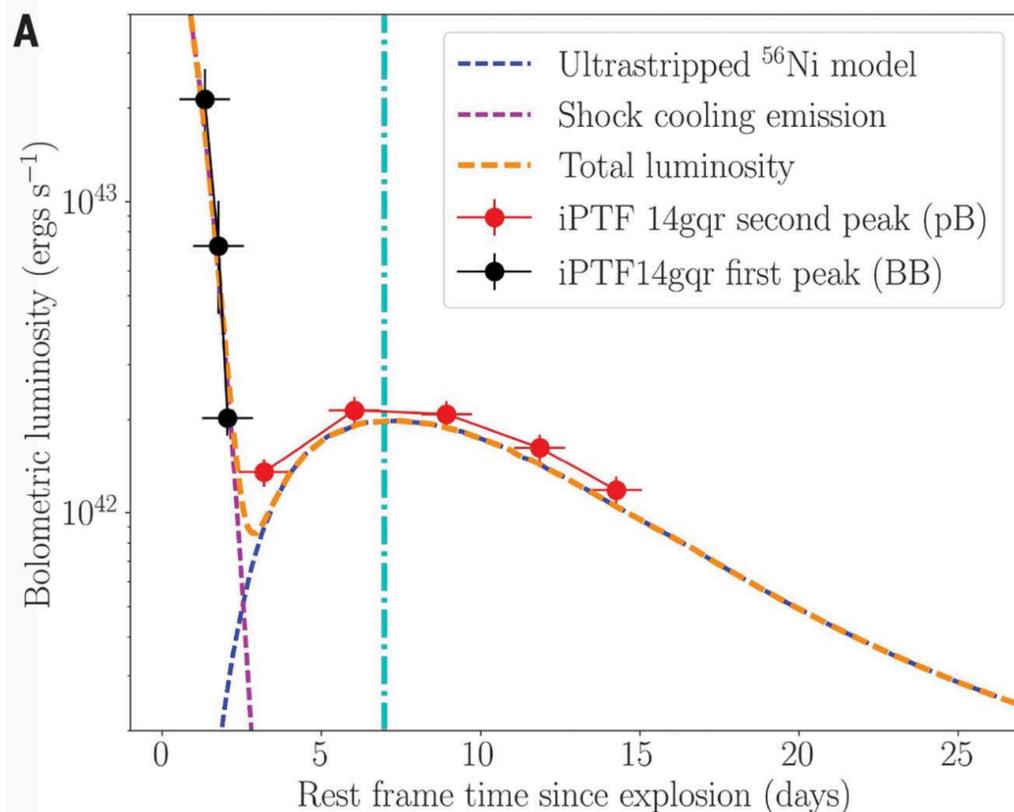
ultra stripping



ultra stripping

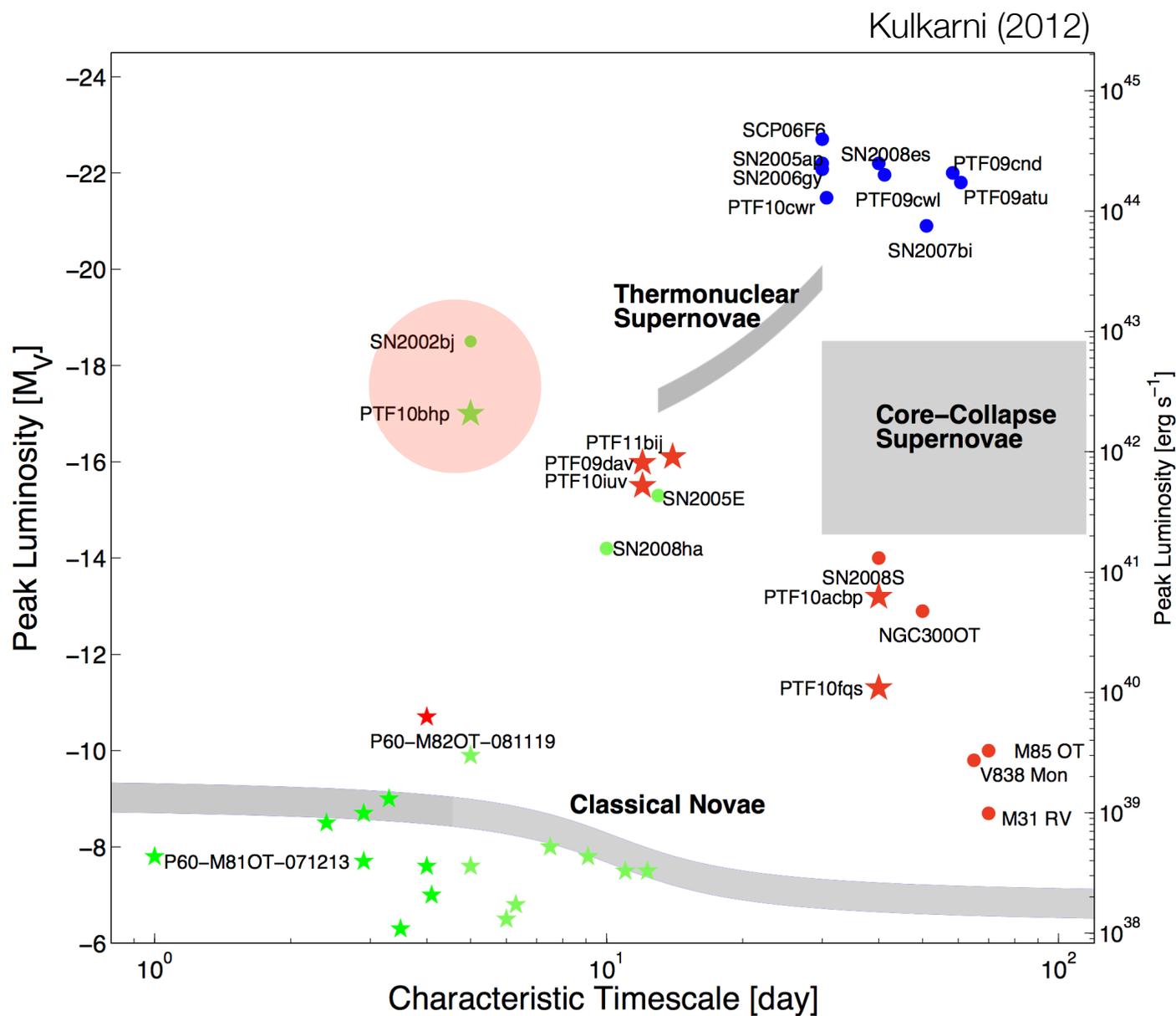


iPTF14gqr — an ultra-stripped SN



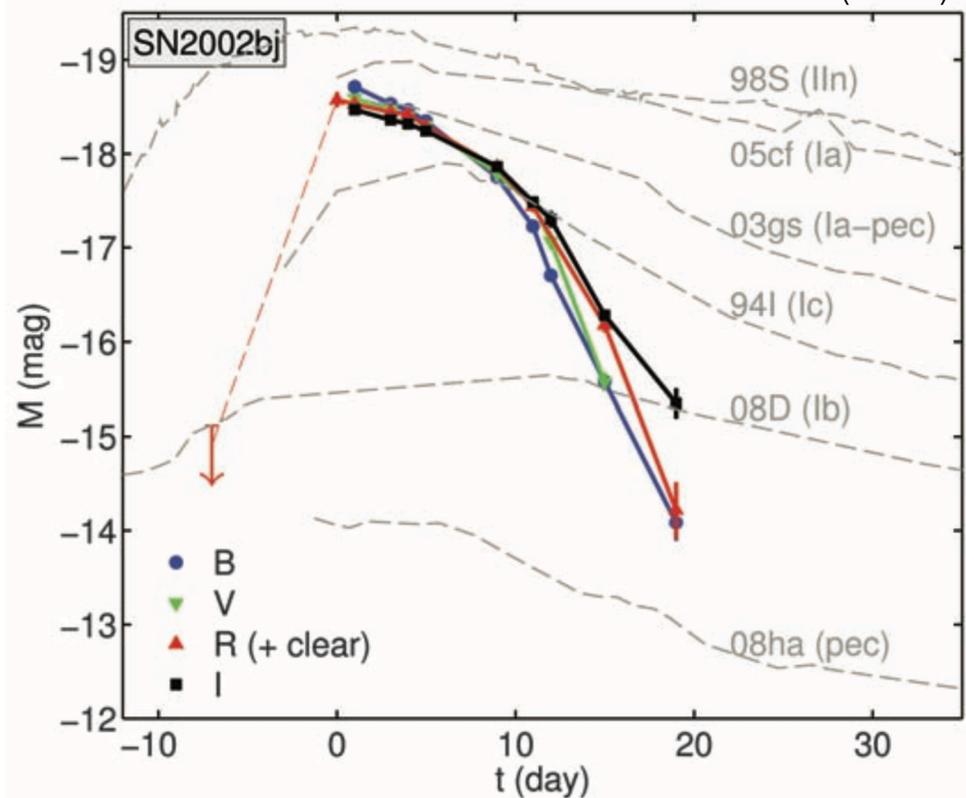
- 光源はニッケル 5 6
- 親星の特殊な進化によって標準外の超新星が生まれる

標準外の超新星

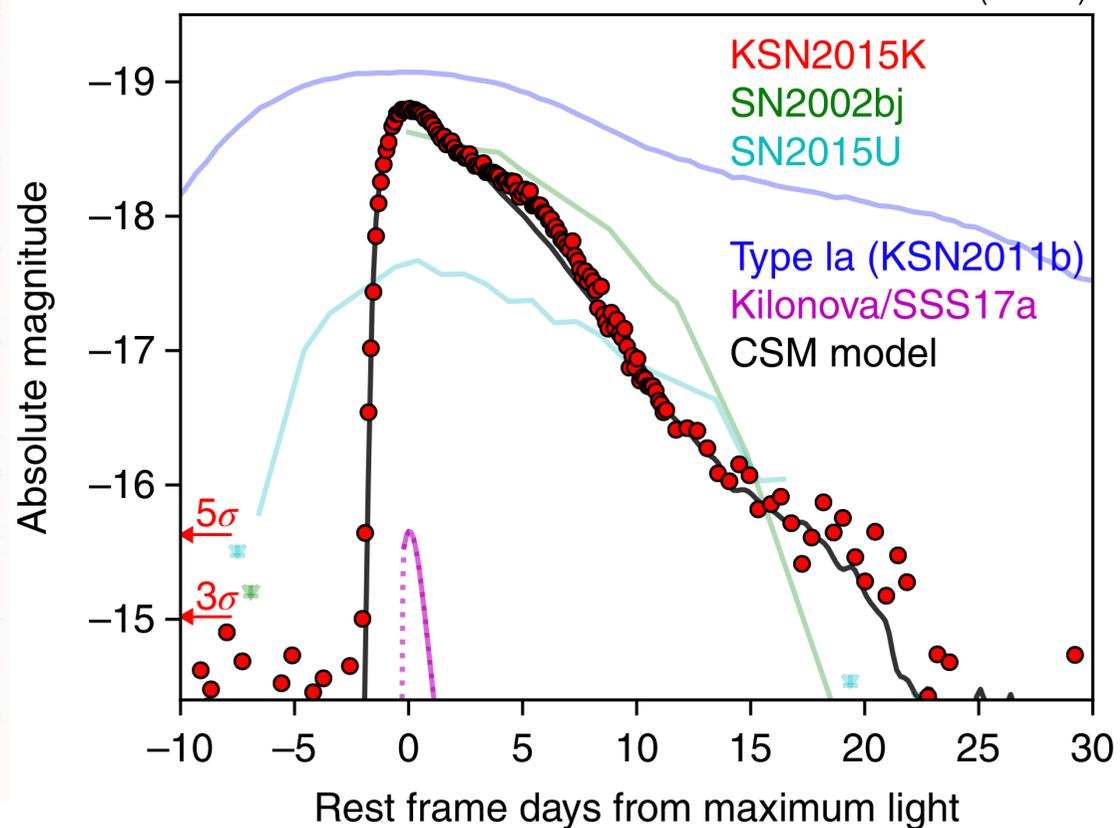


Luminous & fast supernovae

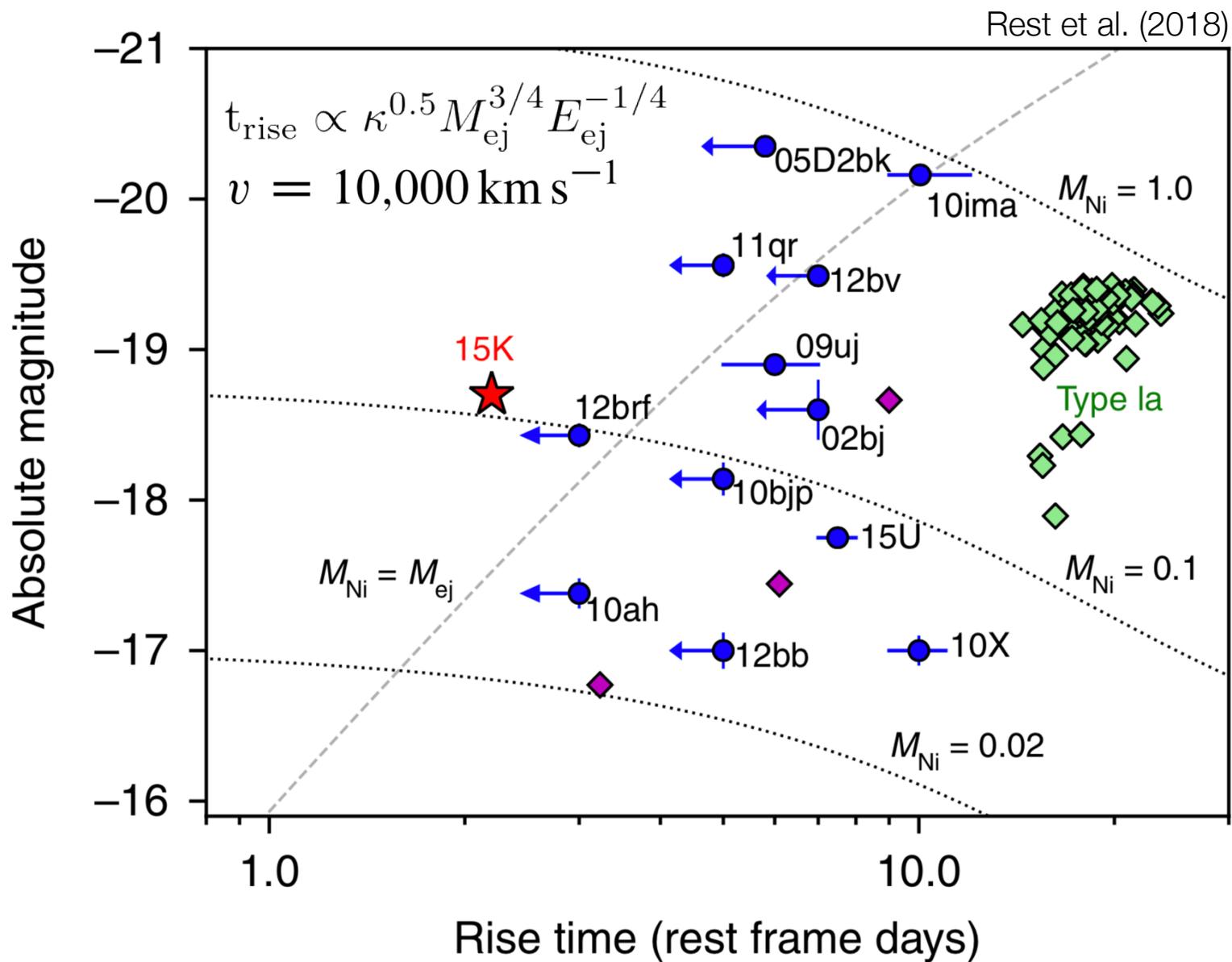
Poznanski et al. (2010)



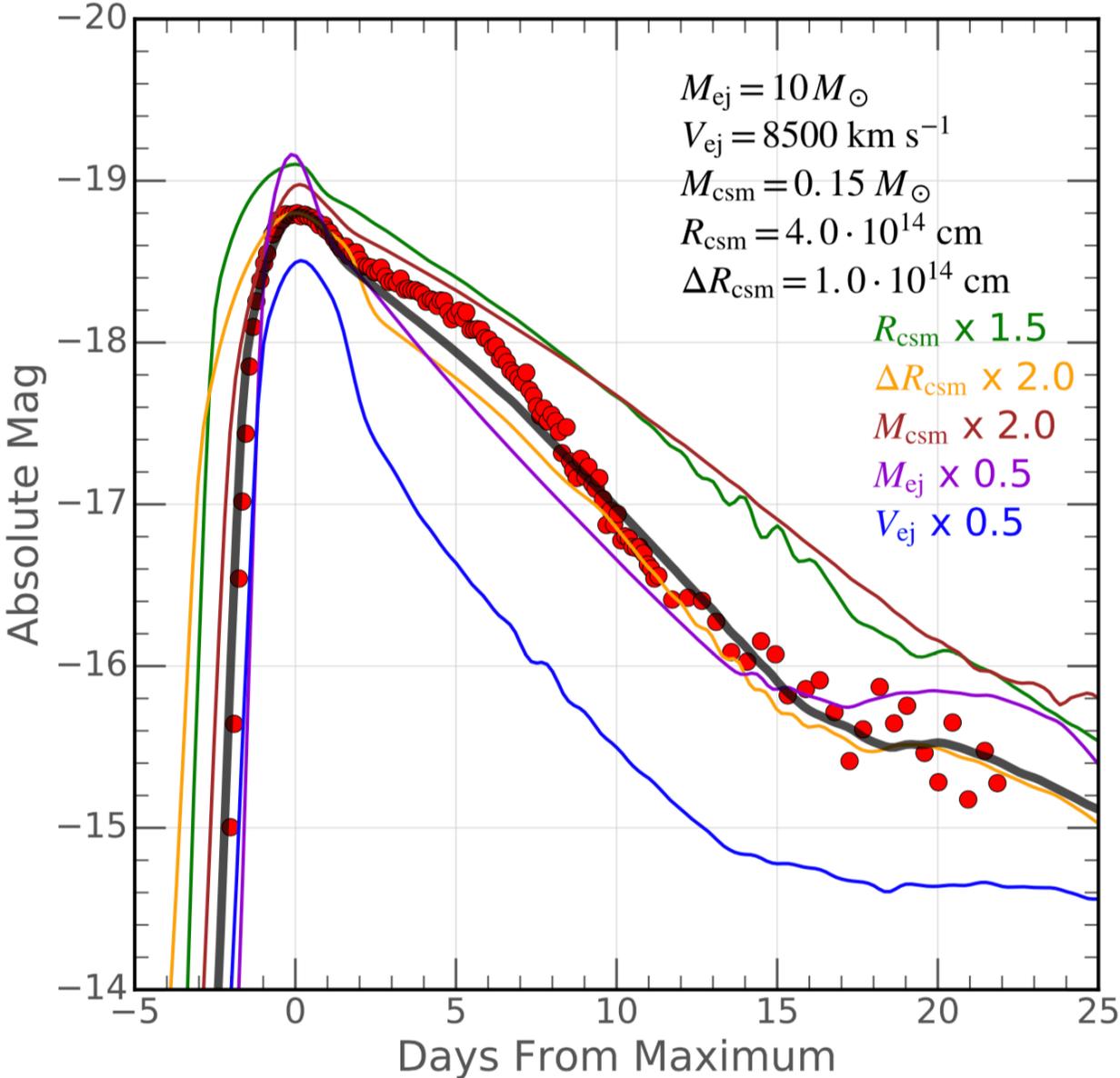
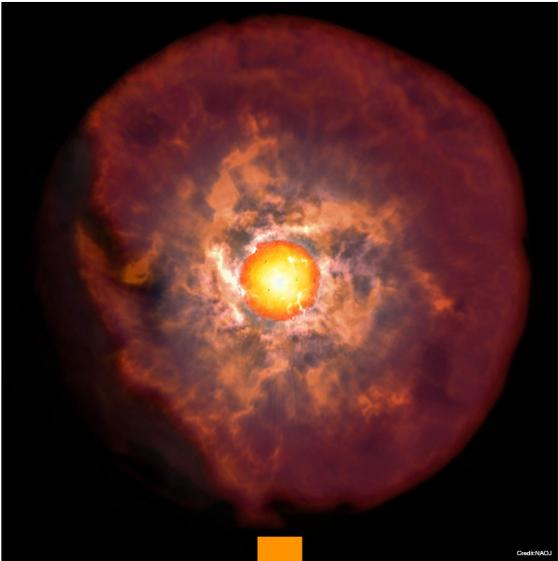
Rest et al. (2018)



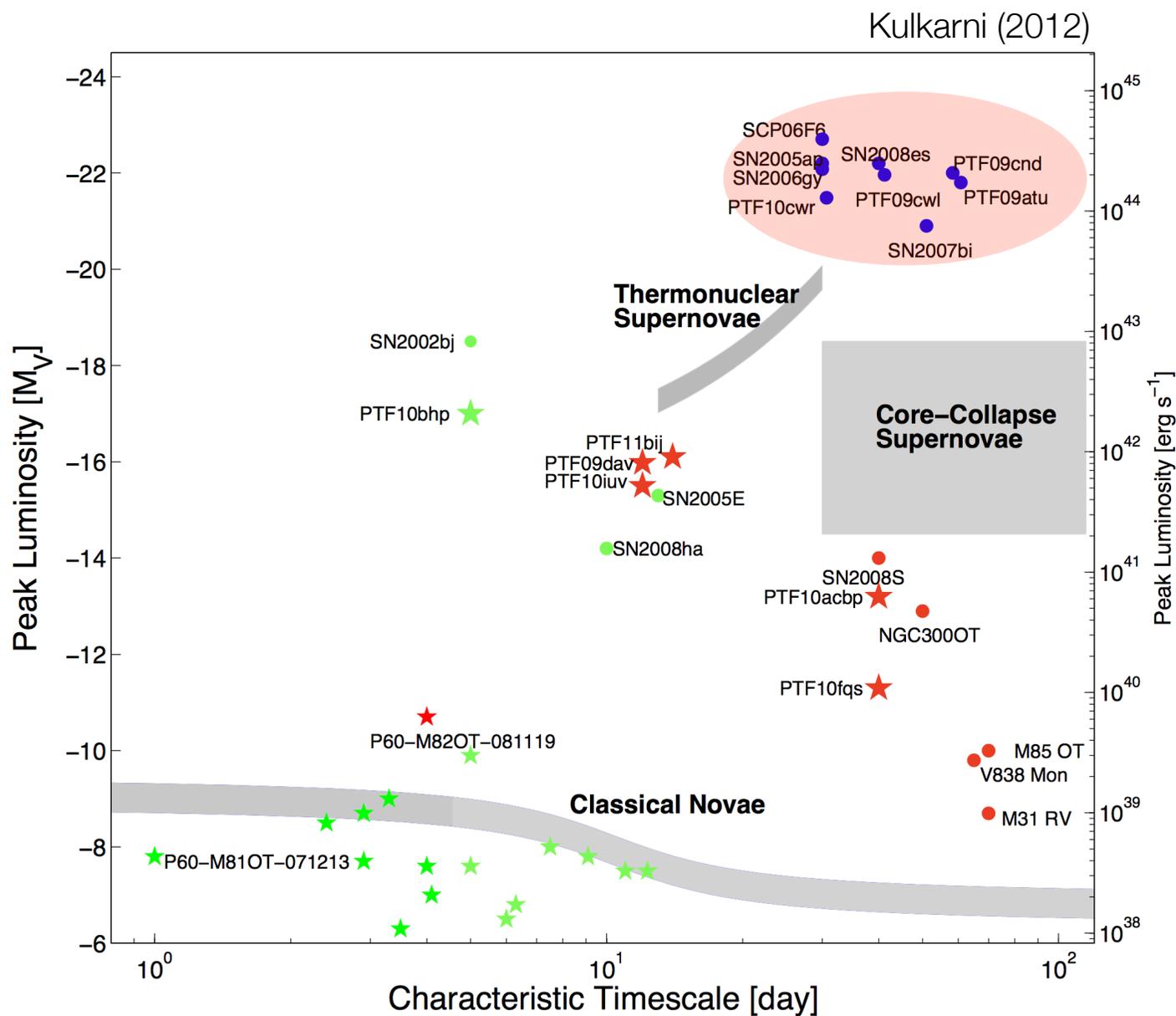
必要なニッケル 5 6 が爆発噴出物以上



高密度星周物質への衝突

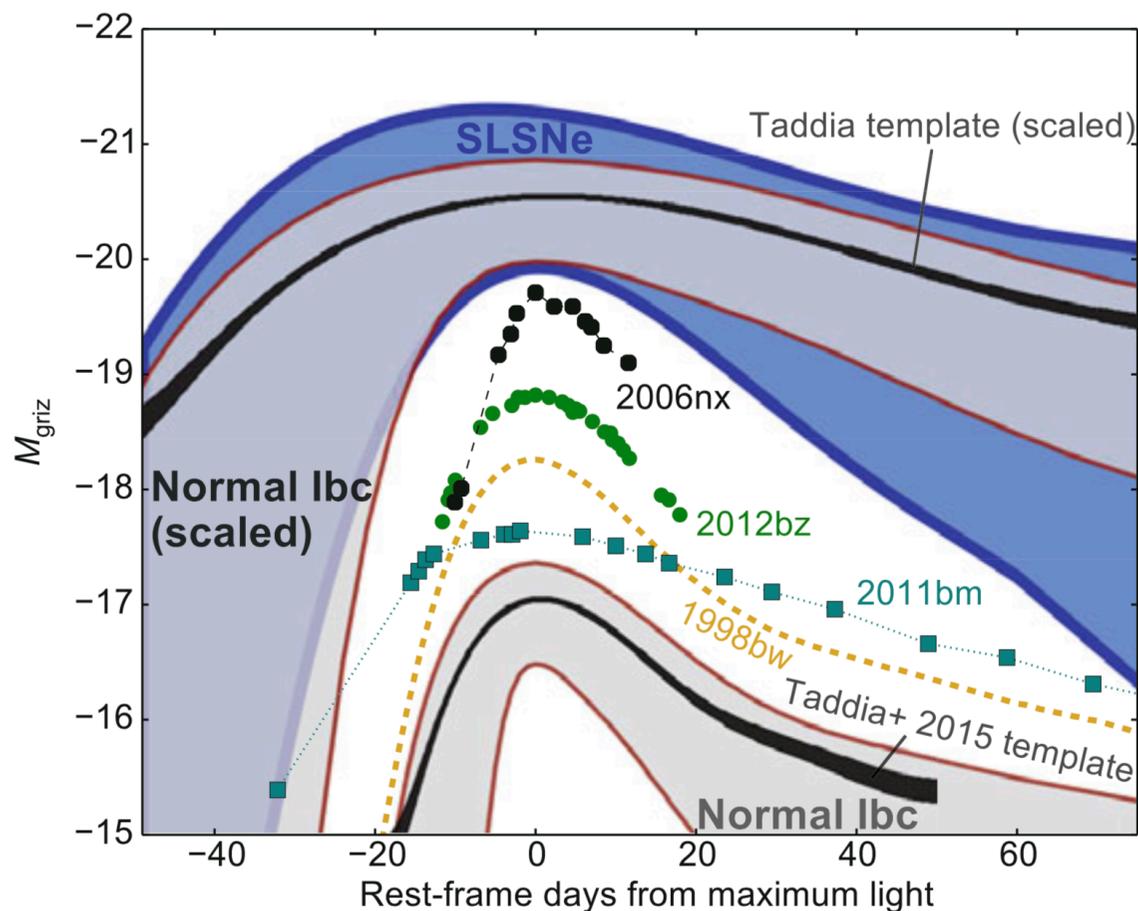


標準外の超新星



超高輝度超新星 (superluminous supernovae)

- これまで知られてきた重力崩壊型超新星の約10倍以上明るい
 - 全放射エネルギー： $\sim 10^{50} - 10^{51}$ erg
- ざっくり2つのスペクトル型：「水素あり」と「水素なし」



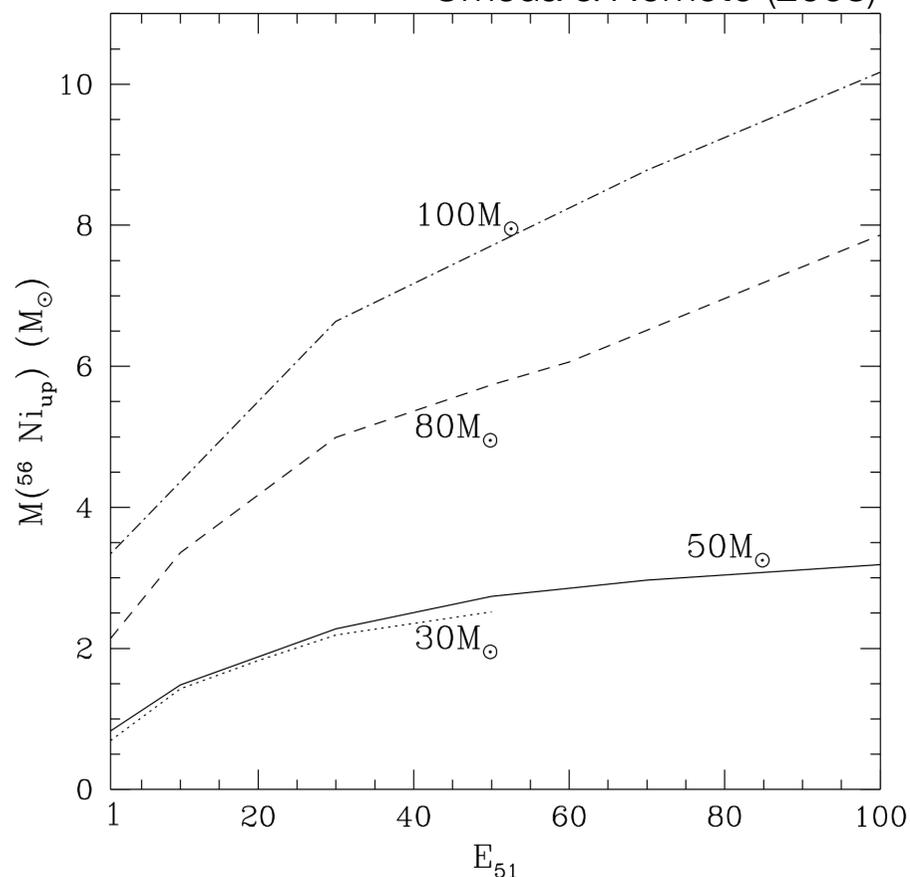
Superluminous Supernovae

Takashi J. Moriya¹  · **Elena I. Sorokina²** ·
Roger A. Chevalier³

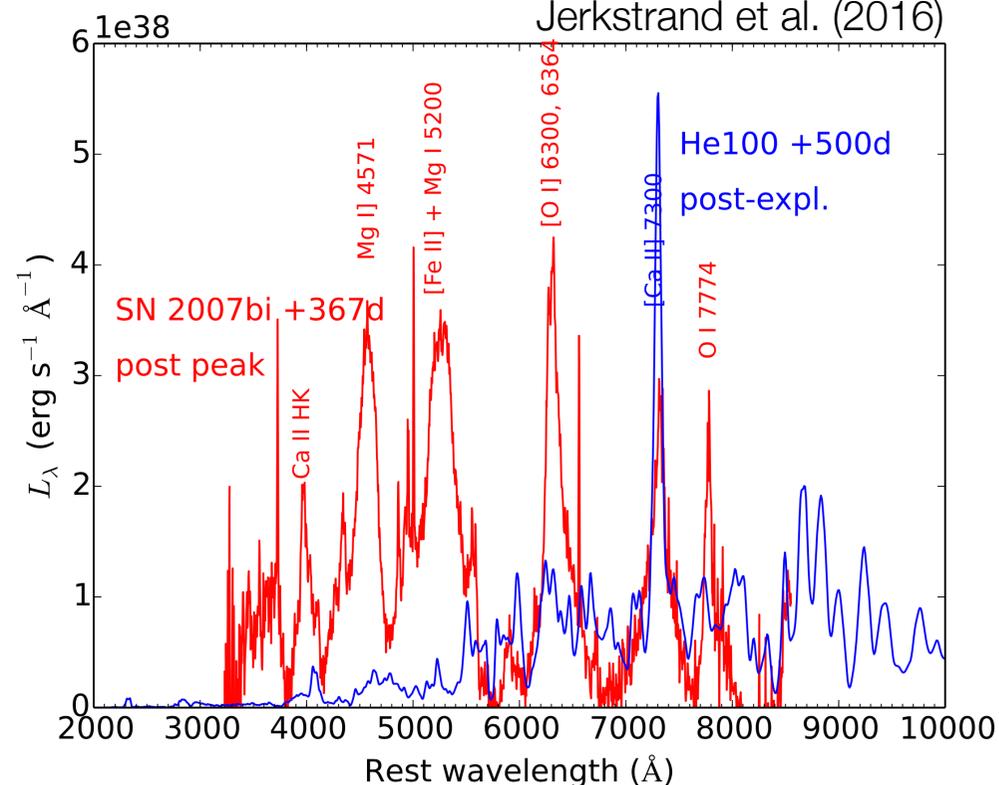
必要なニッケル56は典型的に10 Msun以上

- 重力崩壊型超新星だとどうしようもない
- pair-instability SNeのモデルとも合わない
- 星周物質との衝突の兆候もはっきり見えてない

Umeda & Nomoto (2008)

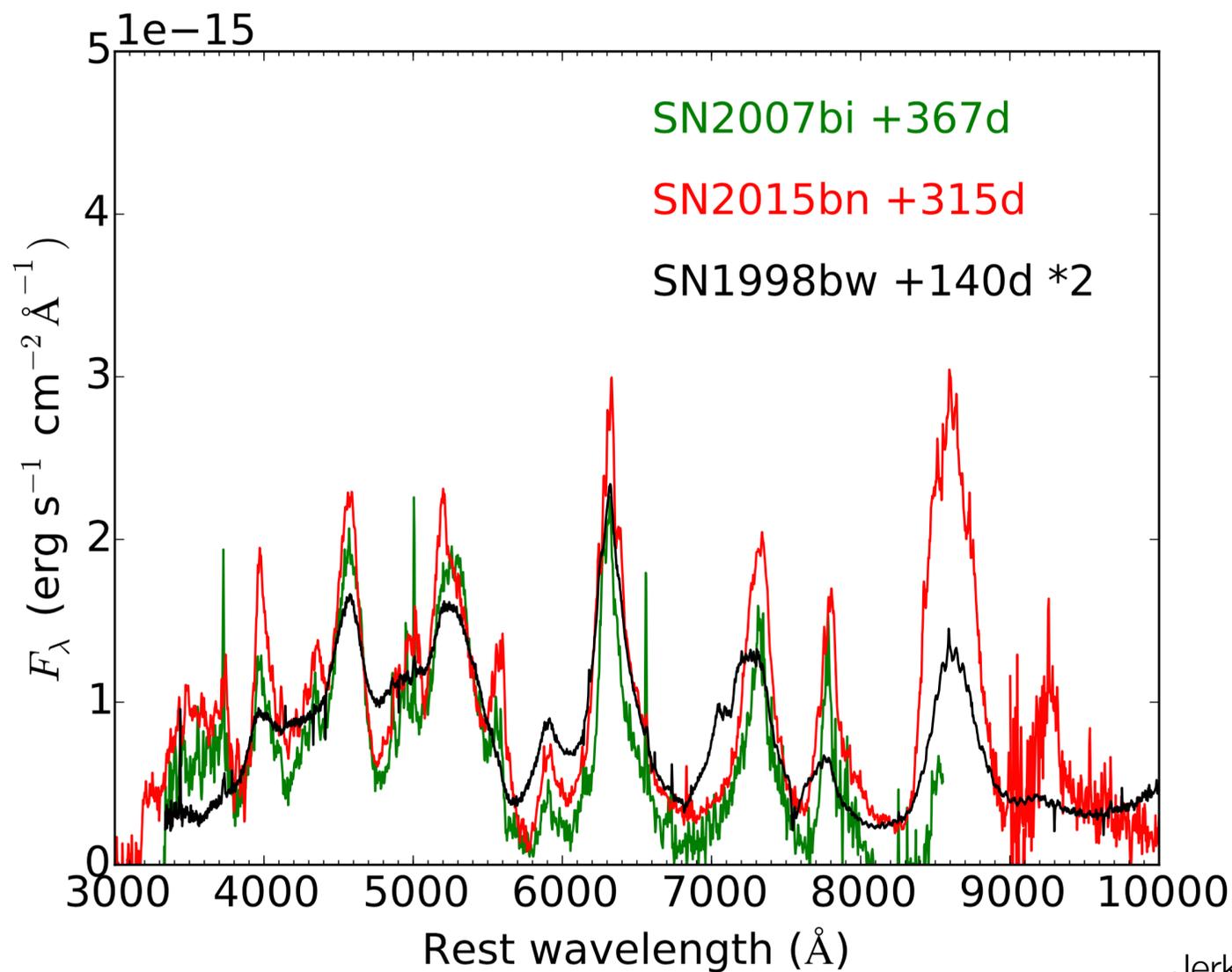


Jerkstrand et al. (2016)

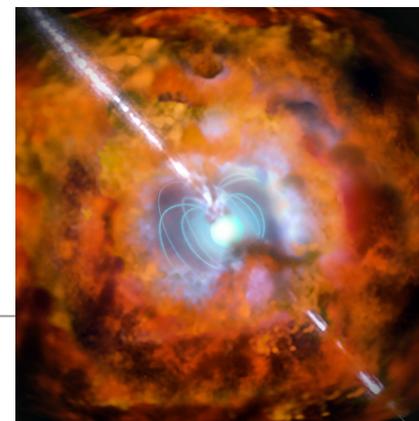


後期スペクトルが「極超新星」に良く似ている

- 何らかの中心エンジンが存在？



マグネター



- 高磁場高速回転中性子星

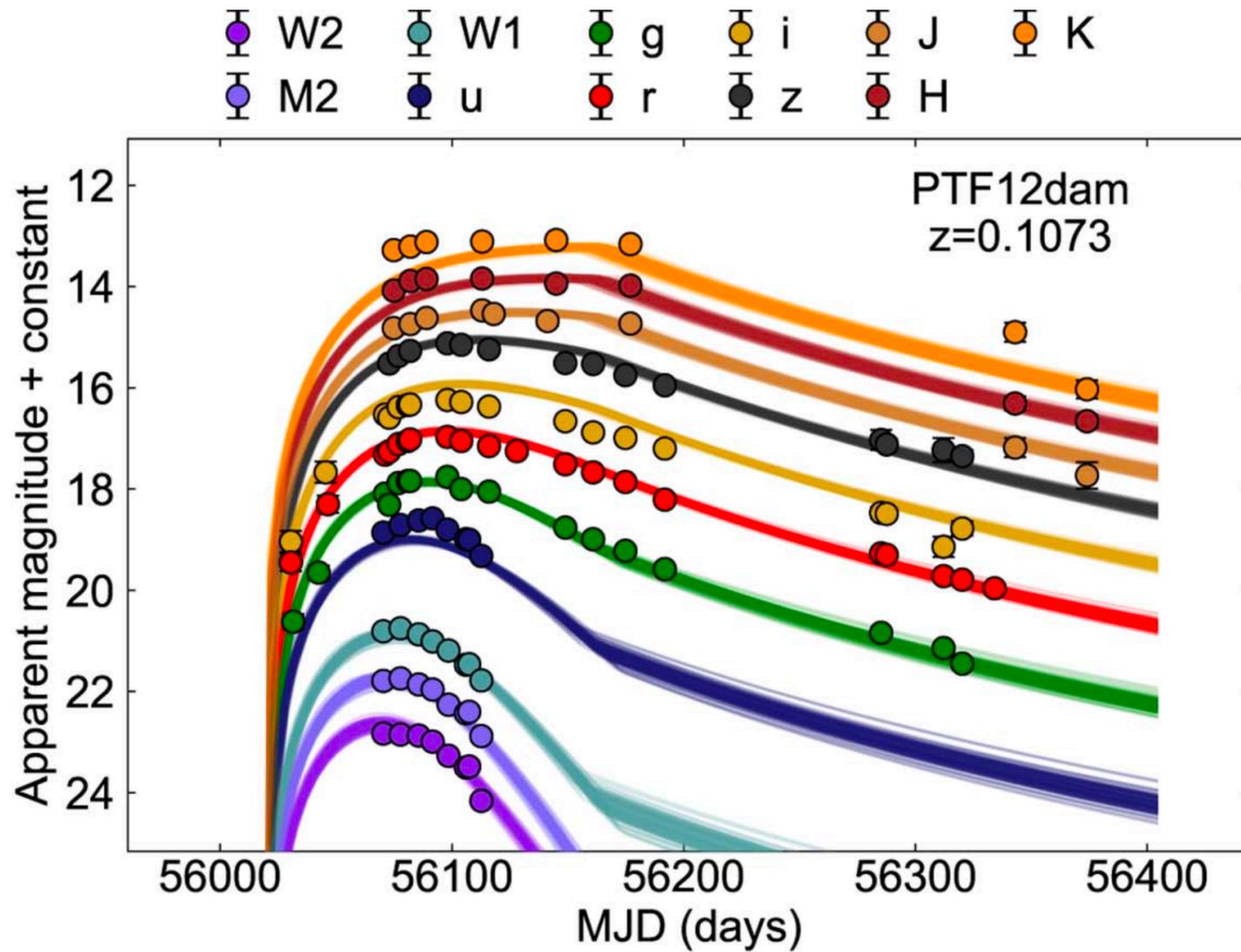
- 回転エネルギー： $E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} I_{\text{NS}} \Omega^2 \simeq 2 \times 10^{52} \left(\frac{P}{1 \text{ ms}} \right)^{-2} \text{ erg}$

- スピンドアウン時間： $t_m = \frac{6 I_{\text{NS}} c^3}{B_{\text{dipole}}^2 R_{\text{NS}}^6 \Omega^2} \simeq 5 \left(\frac{B_{\text{dipole}}}{10^{14} \text{ G}} \right)^{-2} \left(\frac{P}{1 \text{ ms}} \right)^2 \text{ days}$

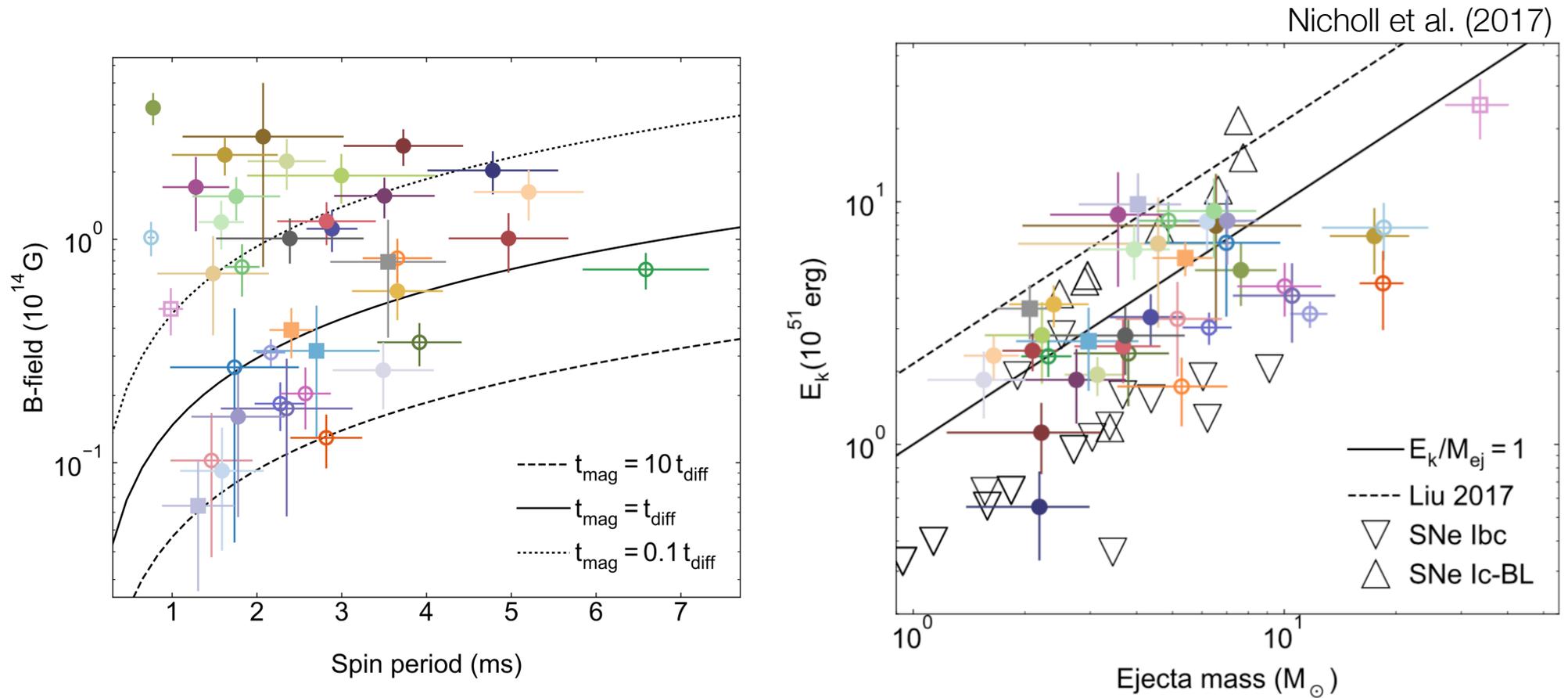
$$L_{\text{mag}} = \frac{(l-1) E_{\text{rot}}}{t_m} \left(1 + \frac{t}{t_m} \right)^{-l}$$

- $B \sim 10^{14} - 10^{13} \text{ G}$ なら、スピンドアウン時間が $\sim 10 - 100$ 日となる
 - GRBの場合は $B \sim 10^{15} - 10^{16} \text{ G}$

マグネター

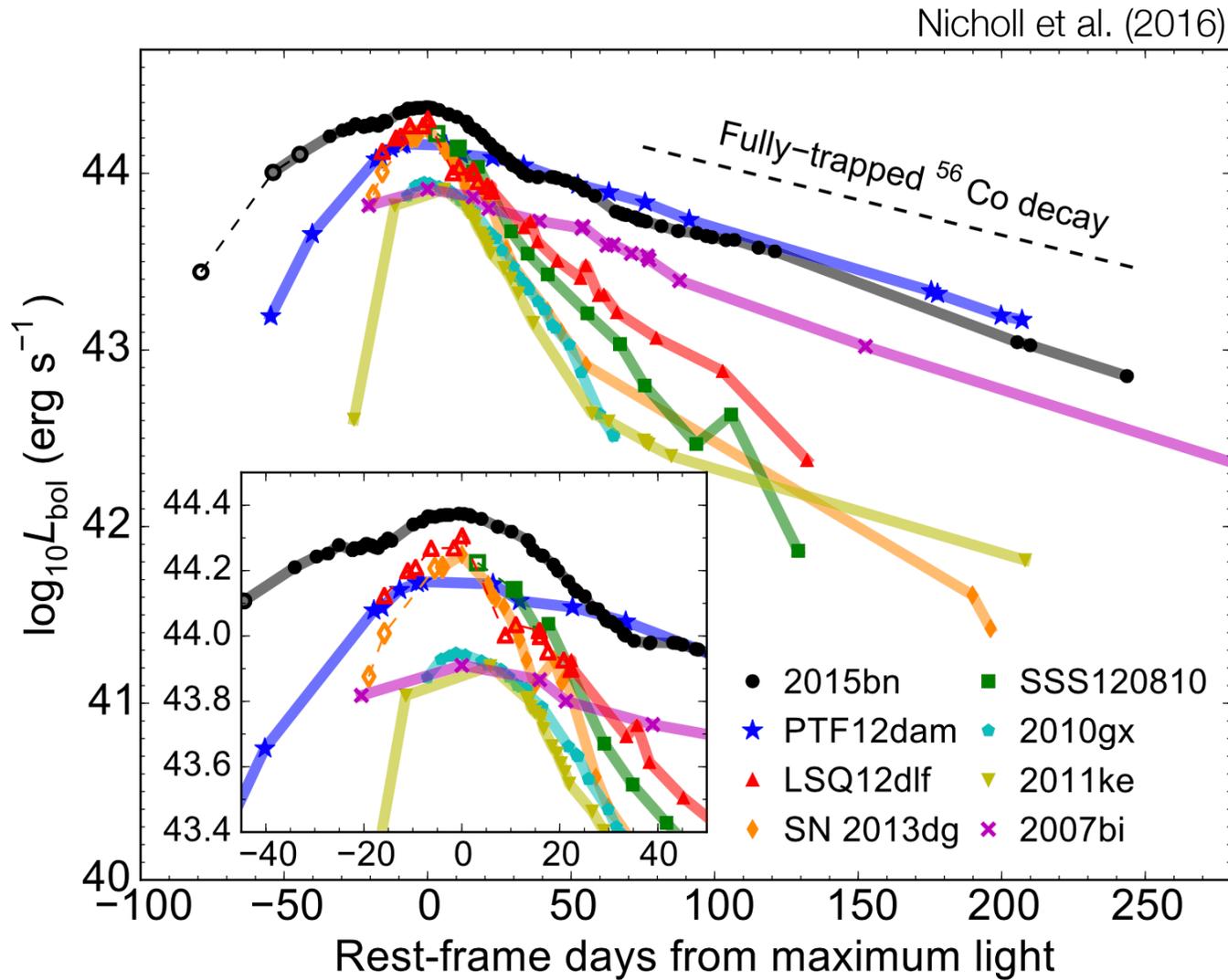


マグネター



- X線や電波での増光が予言されているが、捉えられていない
- 他の中心光源も検討されている
- fallback accretionではないかも？ (Moriya et al. 2018)

中心エンジンだけではダメ？

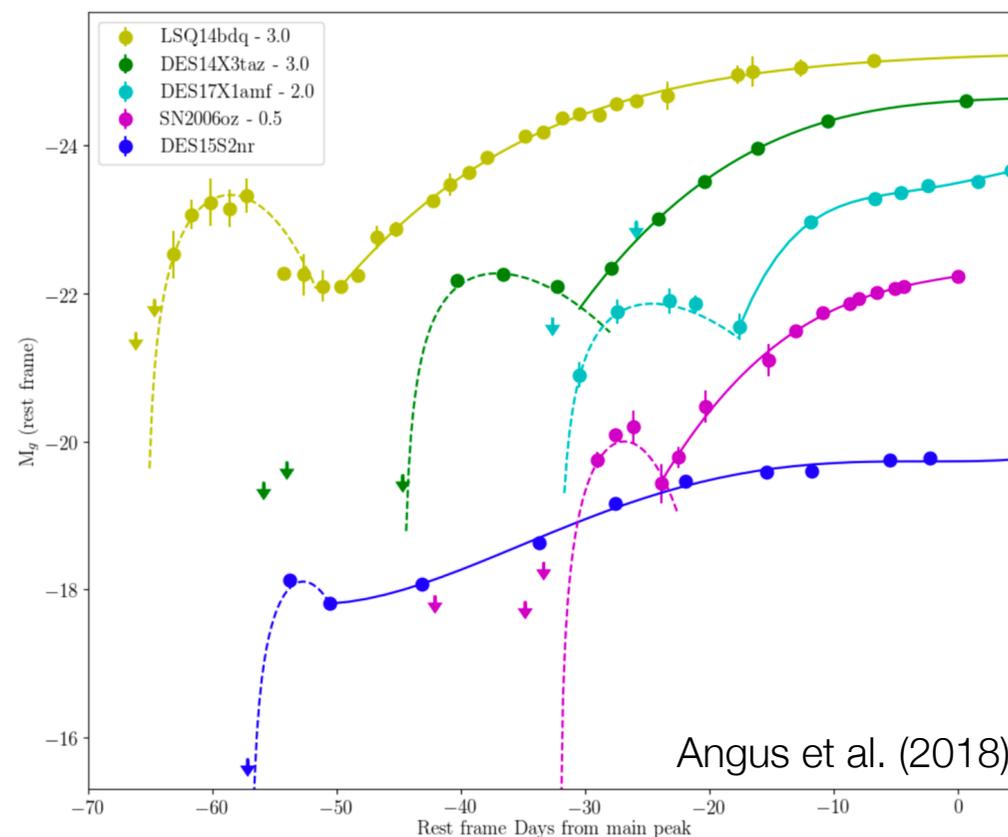


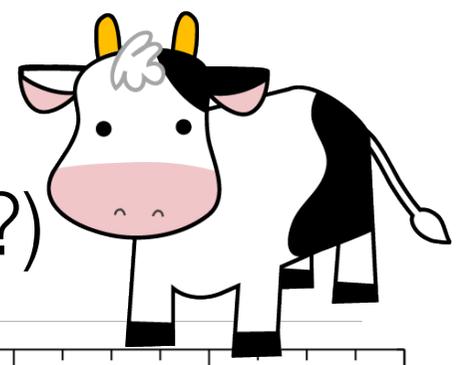
密度カットの起源

- 外層が減速を受けた？
 - 高密度星周物質が存在？
 - 超高輝度超新星のプリカーサーはこの減速に由来？



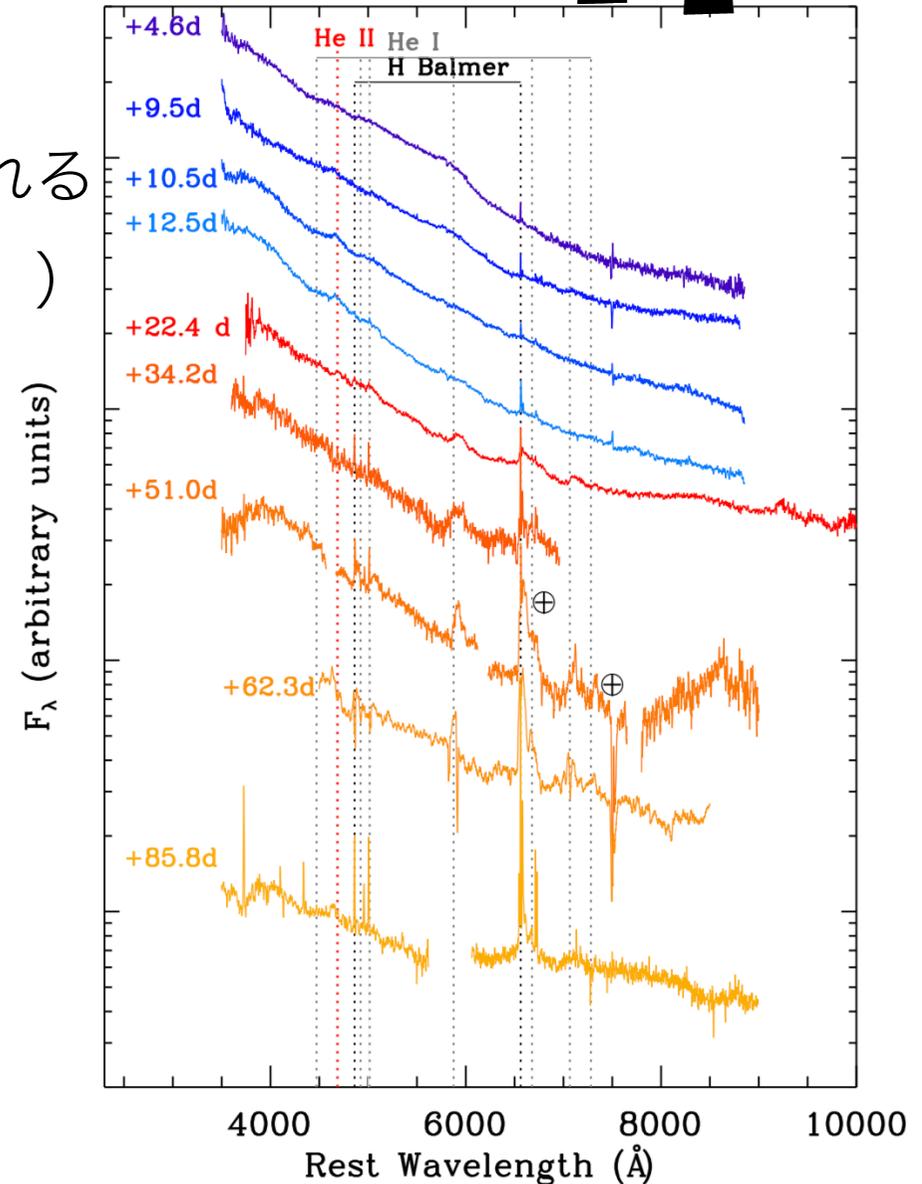
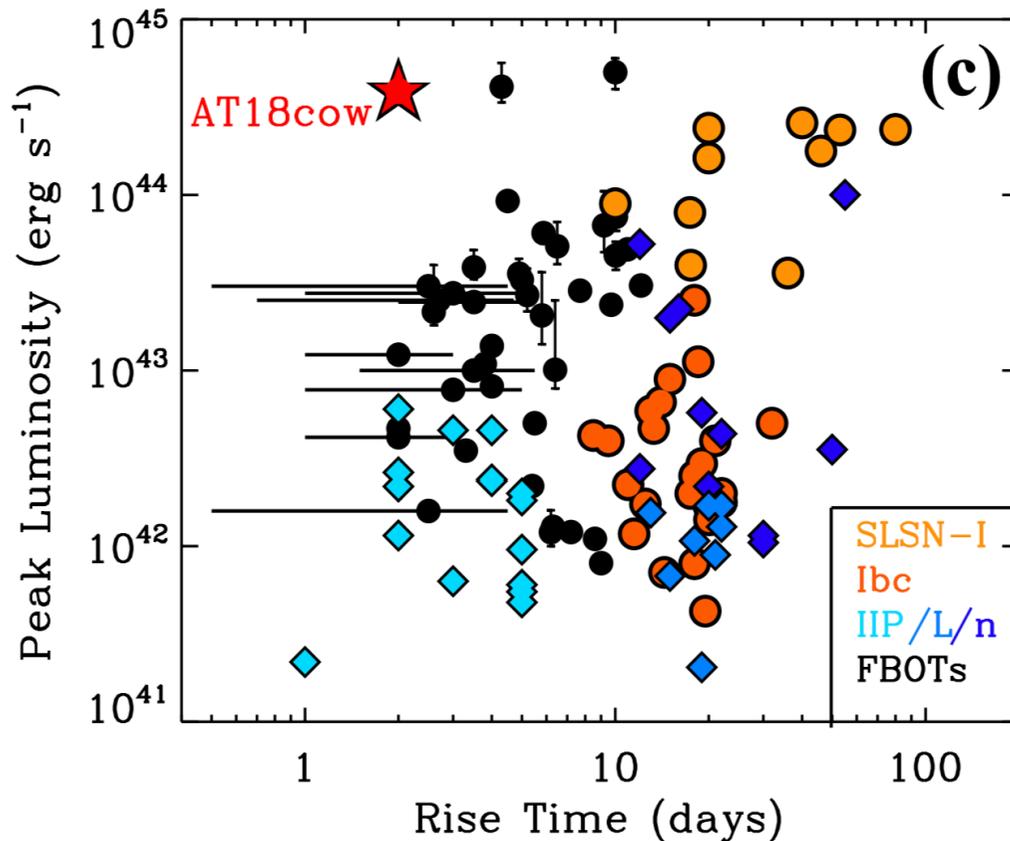
- **超高輝度超新星**
 - 中心光源がありそう
 - 外にも何かありそう





牛 — まだまだ出てくる標準外の超新星(?)

- AT 2018cow
 - 電波からガンマ線まで密に観測される
 - (観測情報が多すぎてしんどい。)



まとめ

- 標準的な超新星：標準的な恒星進化論とも合っていた
- 標準外の超新星
 - 重力崩壊型超新星の親星、爆発、光源の多様性を示す
 - 多様な星の進化、爆発時に起こる現象を反映している
 - 標準外の超新星が大きな寄与をすることも(NS-NS binary)
- faint & fast
 - 親星の非標準的進化
- luminous & fast
 - 高密度星周物質の存在？ — 未知の質量放出機構？
- 超高輝度超新星
 - 謎の光源
- まだ発見されていない新種の超新星はまだまだある