

Ultra-Stripped Supernovae における 56Ni 生成と fallback 質量降着について

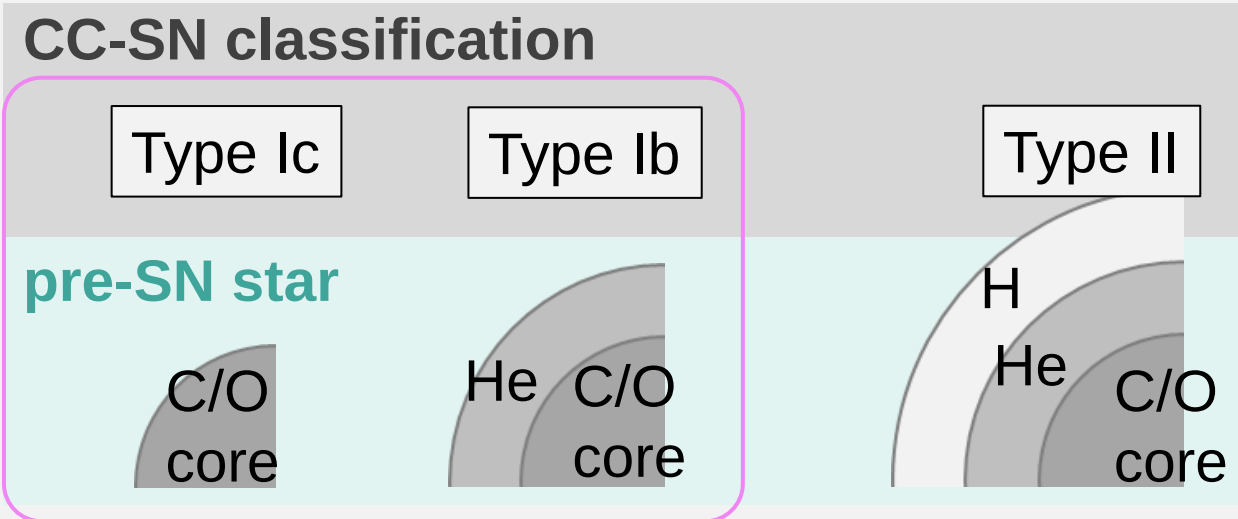
澤田 涼 (Univ. of Tokyo/ JSPS fellow PD)

共同研究者

諏訪 雄大 (Univ. of Tokyo & YITP, Kyoto Univ.)

檜山 和己 (Univ. of Tokyo)

重力崩壊型超新星爆発 (CC-SNe : $M_{\text{ZAMS}} > 8M_{\odot}$)

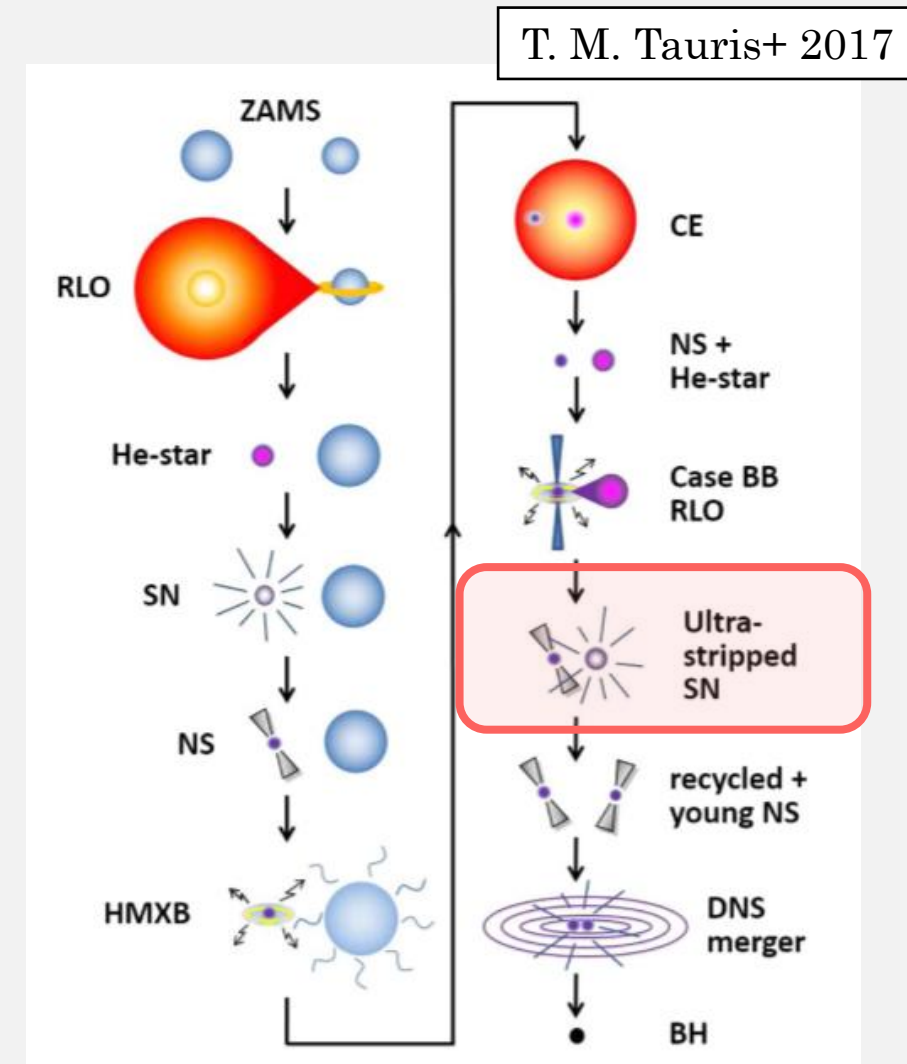


Stripped envelope SN ($M_{\text{ejecta}} \sim 2 - 5M_{\odot}$)

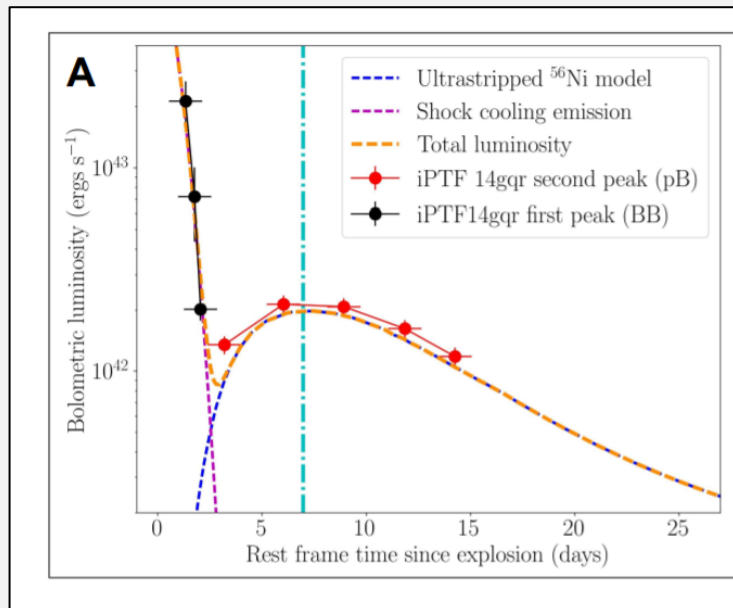
近年、ejecta mass $M_{\text{ejecta}} < 1M_{\odot}$ の観測例

- iPTF 14gqr ($M_{\text{ejecta}} = 0.2M_{\odot}$; De+2018)
- SN 2019dge ($M_{\text{ejecta}} \approx 0.33M_{\odot}$; Yao+2020)

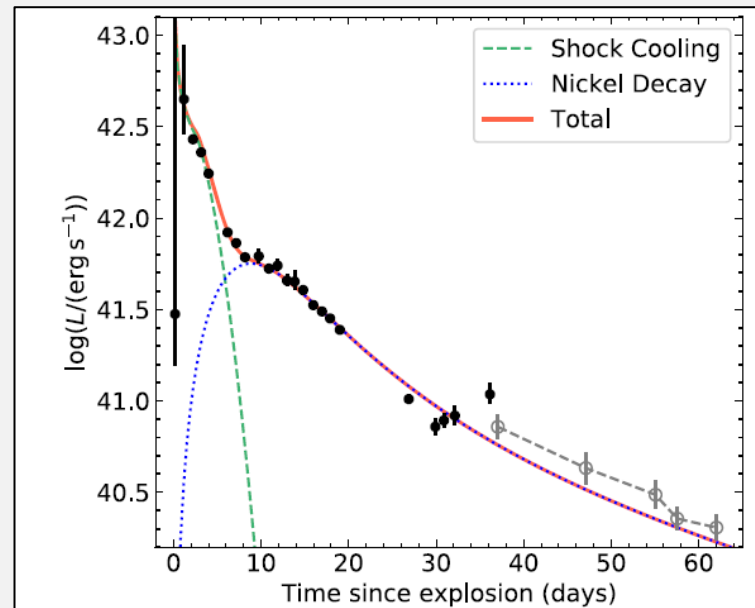
⇒ **extreme stripping pre-SN star.** で起こる超新星爆発
→ **Ultra-stripped SN (USSN)**



• iPTF 14gqr (De+2018)



• SN 2019dge (Yao+2020)

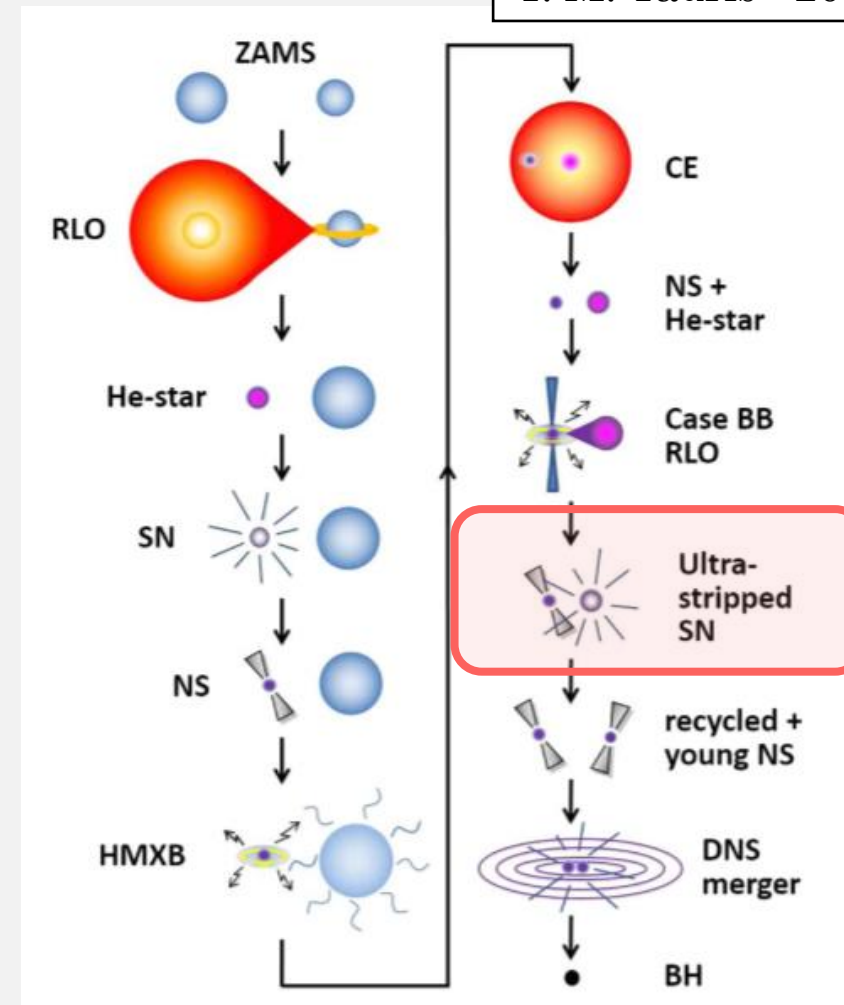


From LC-modeling...

- $M_{\text{ejecta}} = 0.2M_{\odot}$
- $E_{\text{kin}} = 0.2 \times 10^{51} \text{ergs}$
- $M_{^{56}\text{Ni}} = 0.05M_{\odot}$

- $M_{\text{ejecta}} \approx 0.33M_{\odot}$
- $E_{\text{kin}} = 0.13 \times 10^{51} \text{ergs}$
- $M_{^{56}\text{Ni}} = 0.015M_{\odot}$

T. M. Tauris+ 2017



- Remnant = Neutron Star(NS) を期待

重力崩壊型超新星で ^{56}Ni はどれだけ合成されるか？

$$M(^{56}\text{Ni}) \approx [\text{peak 温度} > 5.0 \times 10^9 \text{ [K] の経験領域質量}] - [\text{中心コンパクト天体質量}]$$

$$\approx r_{56\text{Ni}} = 3.7 \times 10^8 (E_{\text{expl.}}/10^{51})^{1/3} \text{ cm}$$

に含まれる質量

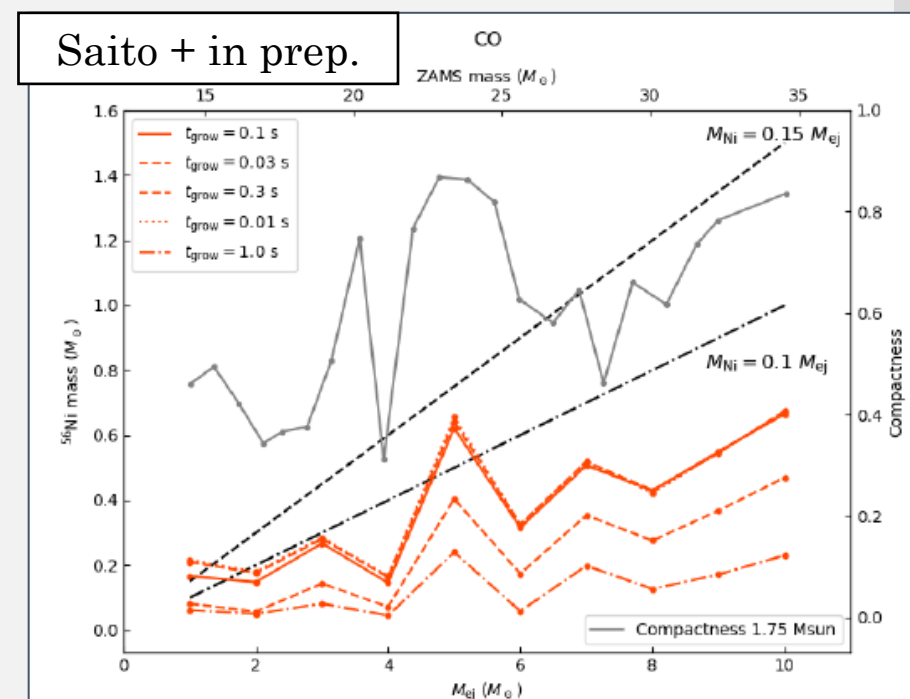
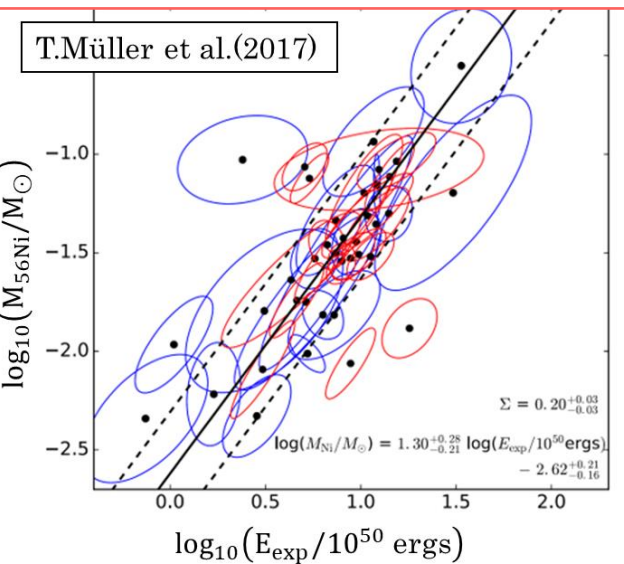
- (1) radiation dominant,
- (2) isothermal @post-shock,
- (3) adiabatic expansion.

$$E_{\text{expl.}} = (aT^4) \times \left(\frac{4\pi}{3} r_{\text{shock}}^3 \right)$$

より、

$$r_{56\text{Ni}} = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} \times \frac{(E_{\text{expl.}})}{a(5 \times 10^9)^4}}$$

^{56}Ni 生成量 $\propto$ 爆発エネルギー



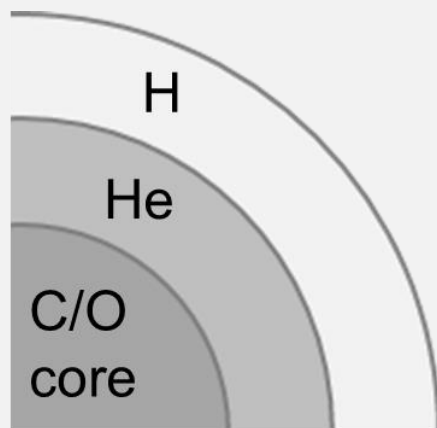
^{56}Ni 生成量 $\propto$ 親星中心部の質量(compactness)

重力崩壊型超新星で ^{56}Ni はどれだけ合成されるか？

$$M(^{56}\text{Ni}) \approx [\text{peak 温度} > 5.0 \times 10^9 \text{ [K] の経験領域質量}] - [\text{中心コンパクト天体質量}]$$

• Canonical-SN explosion

Type II

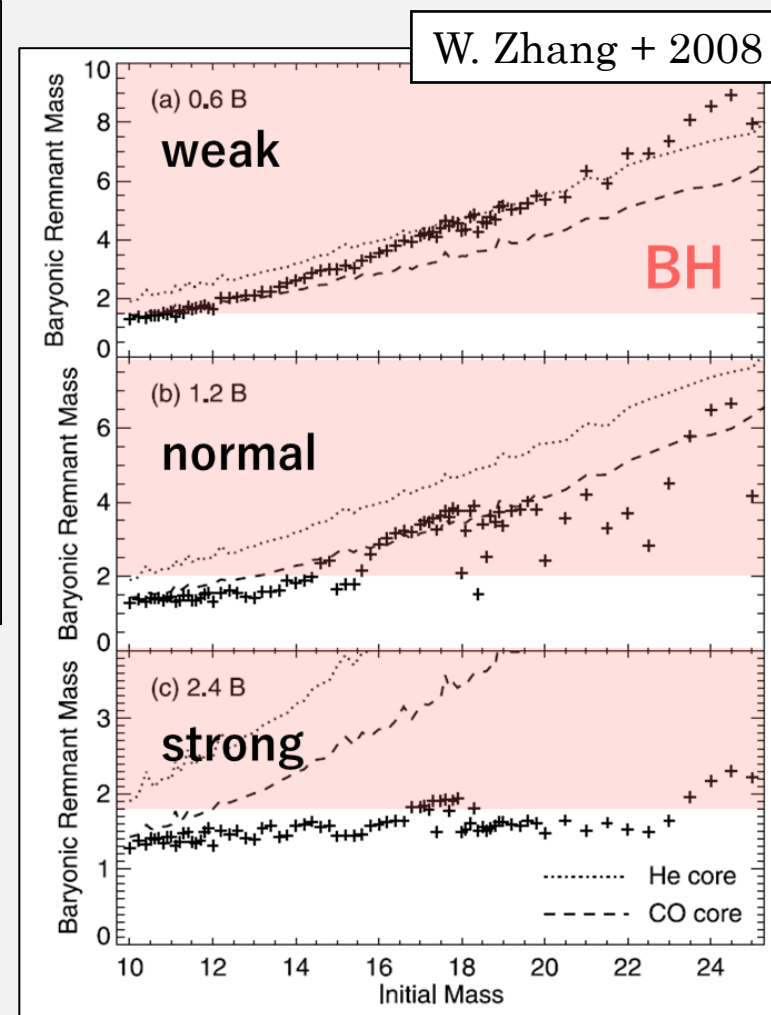
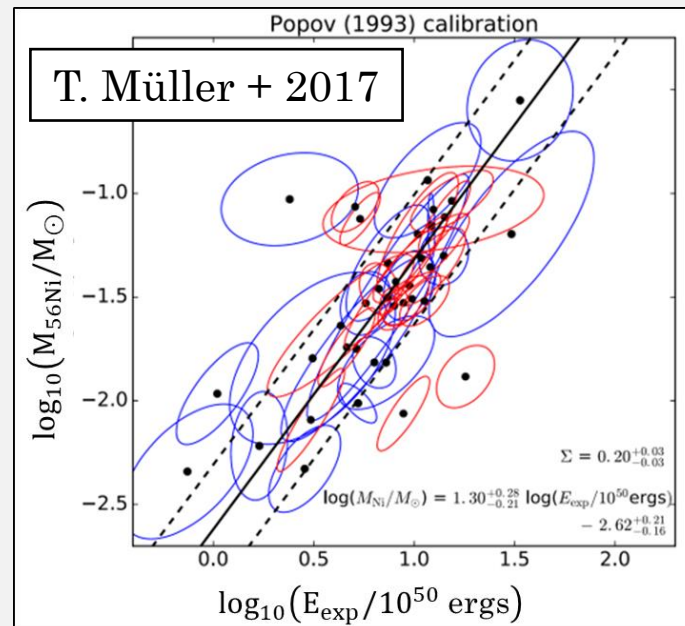


normal

$$\begin{aligned} \bullet E_{\text{kin}} &\sim 1.0 \times 10^{51} \text{ ergs} \rightarrow M_{56\text{Ni}} \sim 0.05 M_{\odot} \\ &\rightarrow \text{Remnant} = \text{NS/or BH} \end{aligned}$$

weak (predict)

$$\begin{aligned} \bullet E_{\text{kin}} &\sim 0.1 \times 10^{51} \text{ ergs} \rightarrow M_{56\text{Ni}} \lesssim 0.01 M_{\odot} \\ &\rightarrow \text{Remnant} \approx \text{BH by late-phase fallback} \end{aligned}$$



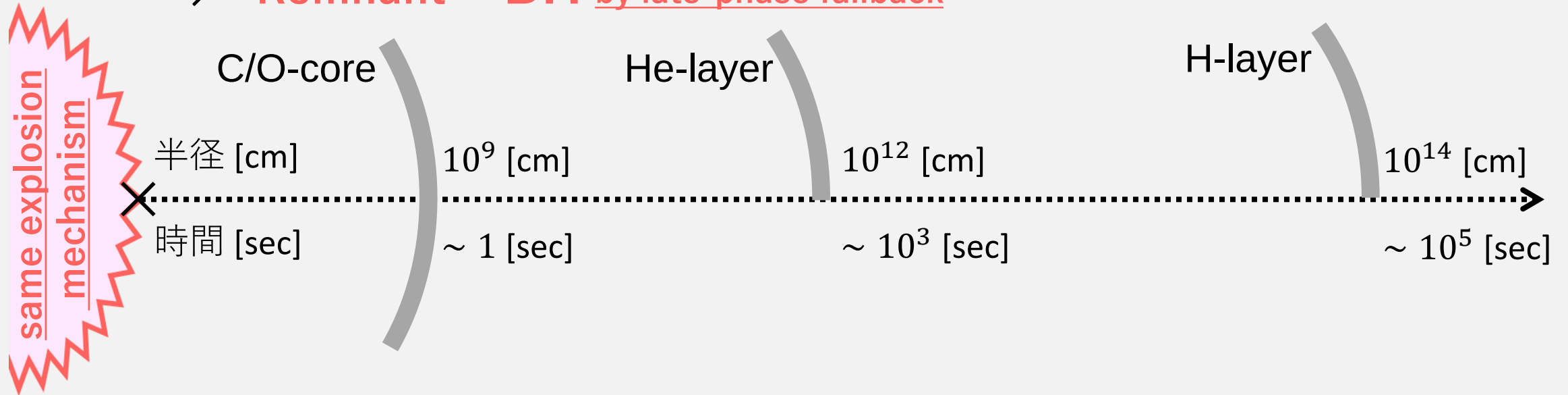
Canonical-SN explosion v.s. USSN

- weak : $E_{\text{kin}} \sim 0.1 \times 10^{51} \text{ergs}$

Type II

- $M_{56\text{Ni}} \lesssim 0.01 M_{\odot}$ Observation.; (T. Müller + 2017)

- **Remnant = BH** by late-phase fallback Simulation.;(W. Zhang + 2008)



USSN

- $E_{\text{kin}} \sim 0.1 \times 10^{51} \text{ergs}$ iPTF 14gqr ; De+2018

- $M_{56\text{Ni}} \sim 0.05 M_{\odot}$

- **Remnant = NS**

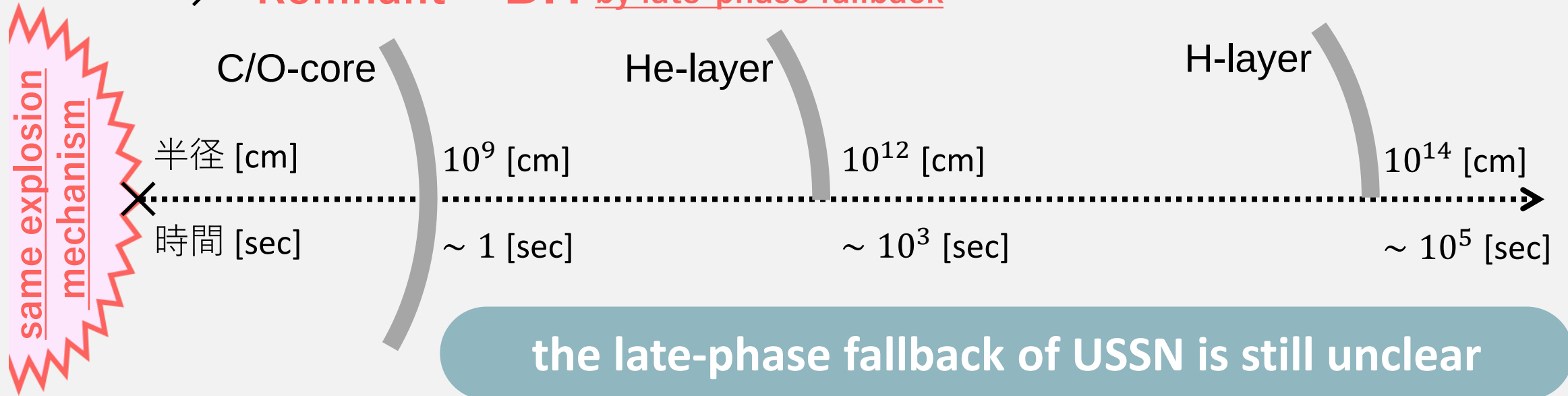
Canonical-SN explosion v.s. USSN

- weak : $E_{\text{kin}} \sim 0.1 \times 10^{51} \text{ ergs}$

Type II

- $M_{56\text{Ni}} \lesssim 0.01 M_{\odot}$ Observation.; (T. Müller + 2017)

- **Remnant = BH** by late-phase fallback Simulation.; (W. Zhang + 2008)



USSN

- $E_{\text{kin}} \sim 0.1 \times 10^{51} \text{ ergs}$ iPTF 14gqr ; De+2018

- $M_{56\text{Ni}} \sim 0.05 M_{\odot}$... Can it really be ejected?

- **Remnant = NS** ... Can we ignore the effects of the late-phase fallback?

本研究の目的

motivation



simulation

後期段階のフォールバック降着までを加味したうえで、
USSNは観測を再現する56Ni量を生成/放出できるのか？

1次元流体/元素合成計算
 + 計算結果を用いた光度曲線計算

✓ Hydrodynamics :

1D Eulerian hydrodynamics code.

based on “hydro-1d” code. (<http://zingale.github.io/hydro1d/>)

+ tracer-particles ($\Delta M = 10^{-4} M_{\odot}$)

+ Nucleosynthesis (post-process) : 640-isotopes

✓ Expl model : Thermal bombを用いて、
 第一原理計算 (Suwa+2015) を再現するよう設定

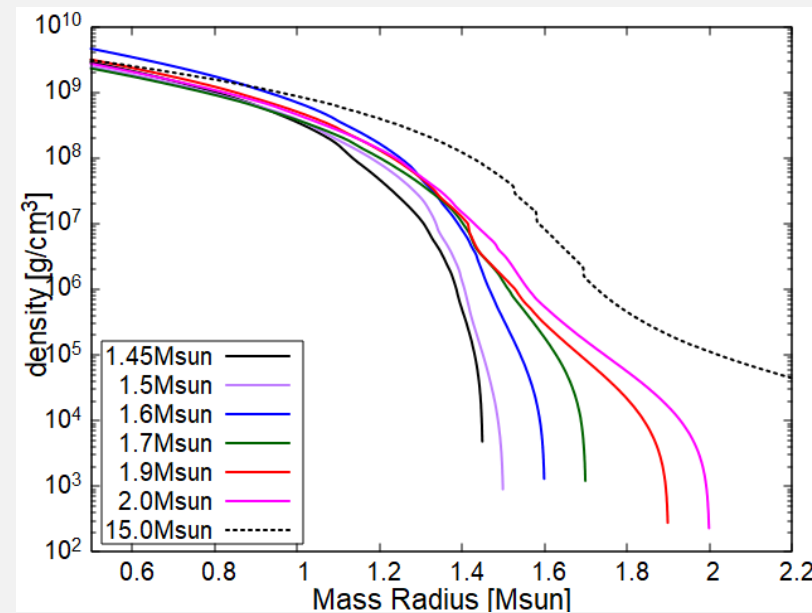
✓ progenitor : $M_{CO} = 1.45, 1.5 - 2.0 M_{\odot}$ の 7 model

✓ Light-curve calculation :

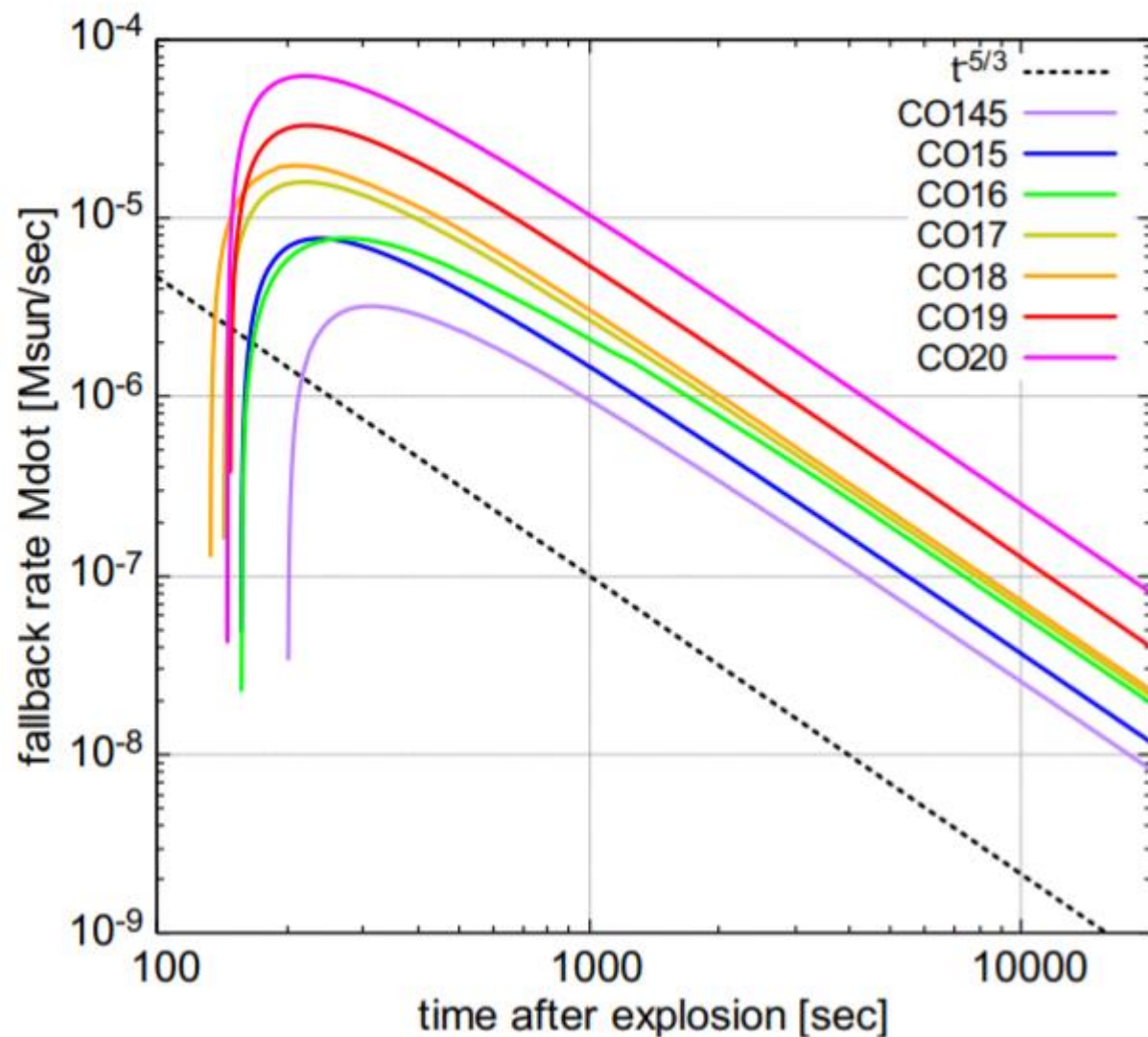
Based on One-zone Arnett model. (Arnett 1982)

Table 1. Properties of the explosion models.

Model	Our work			Suwa et al. (2015)	
	M_{CO} ($M_{\odot}$)	$E_{expl.}$ (Bethe)	$M_{PNS,i}$ ($M_{\odot}$)	$E_{expl.}$ (Bethe)	M_{PNS} ($M_{\odot}$)
CO145	1.45	0.17	1.35	0.177	1.35
CO15	1.5	0.15	1.36	0.153	1.36
CO16	1.6	0.12	1.42	0.124	1.42
CO17	1.7	0.12	1.45	-	-
CO18	1.8	0.12	1.49	0.120	1.49
CO19	1.9	0.12	1.54	-	-
CO20	2.0	0.12	1.60	-	1.60



hydrodynamics



radius $R_c = 10^{10}$ cm にて、

$$\dot{M}_{\text{fb}}(t) = 4\pi R_c^2 \rho_c(t) (-v_{r,c}(t))$$

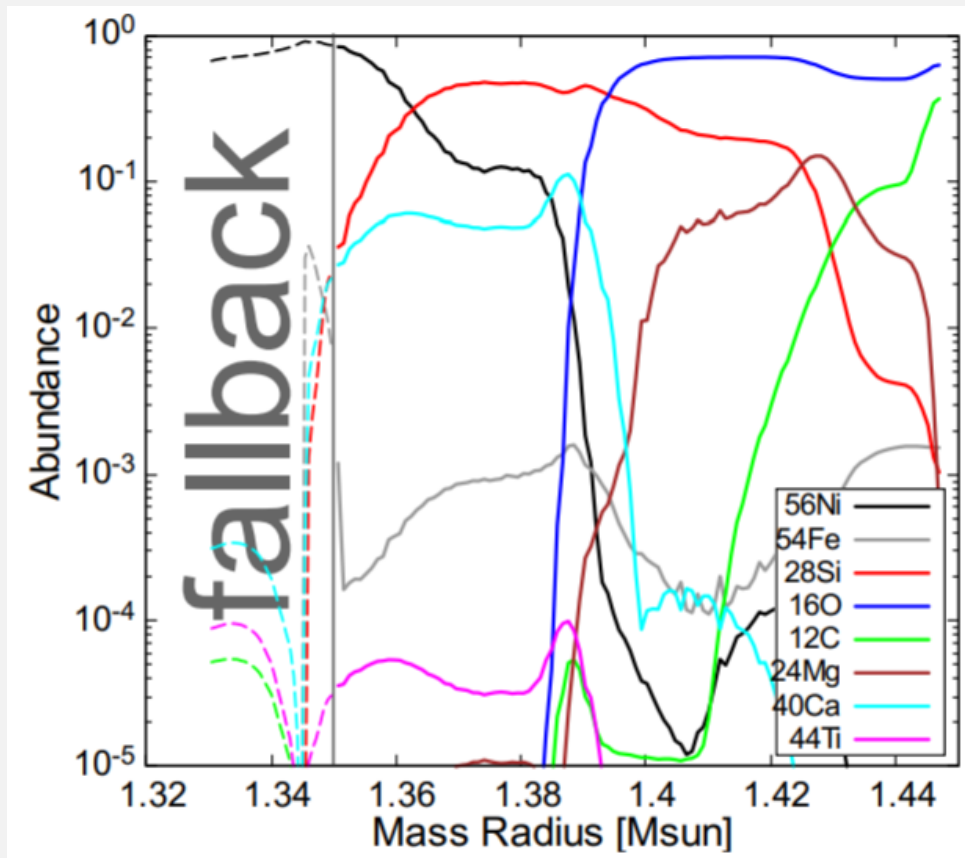
で評価 ($t = 0$: shock reach to surface)

- フォールバック降着の結果は、
「Ⅱ型超新星 (canonical-SN)」
の衝撃波がCOコア伝搬時と似た結果。
(Janka et al. 2021.)
- COコア質量 $\propto \dot{M}_{\text{fb}}(t)$

結果：元素合成計算と ^{56}Ni 生成量

nucleosynthesis

- $M_{\text{CO}} = 1.45 M_{\odot}$

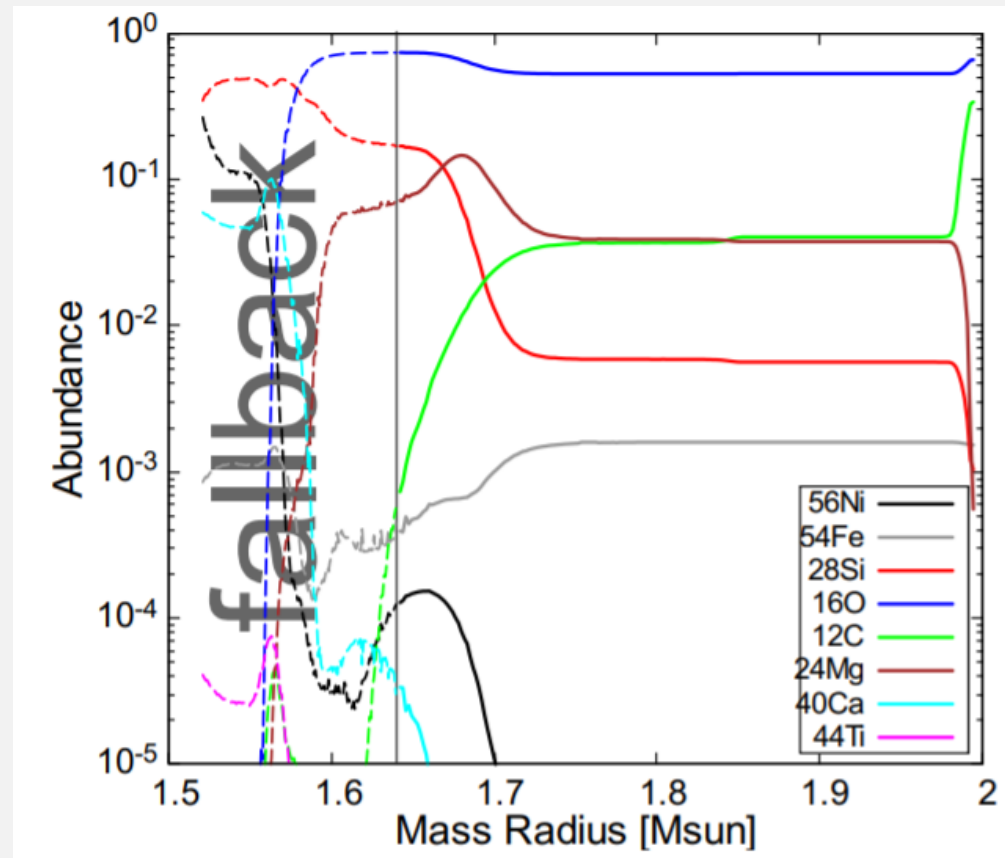


56Ni最大

$$M_{^{56}\text{Ni}} = 0.0163 M_{\odot}$$

⇒ iPTF 14gqr (De+2018) の $M_{^{56}\text{Ni}} = 0.05 M_{\odot}$ は再現困難

- $M_{\text{CO}} = 2.0 M_{\odot}$



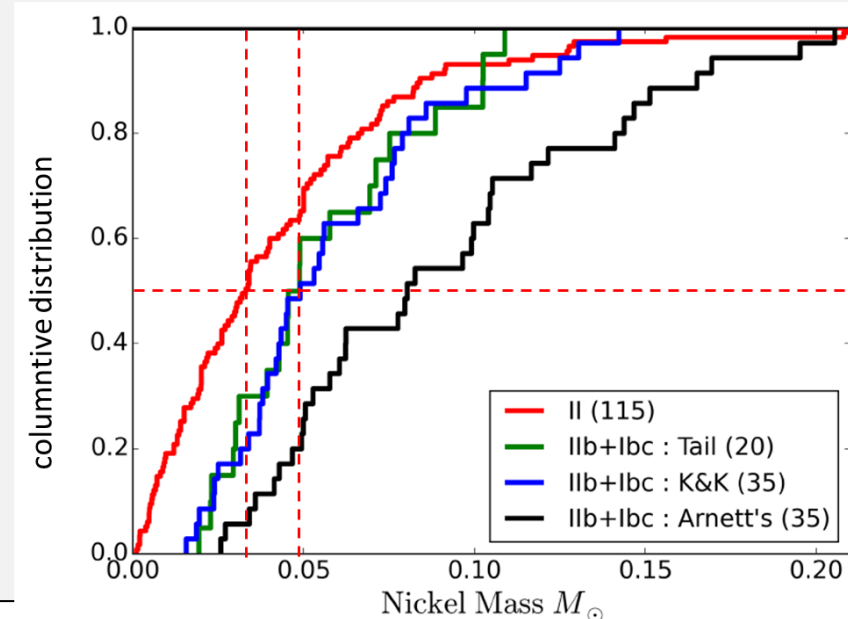
56Ni最小

$$M_{^{56}\text{Ni}} = 7.8 \times 10^{-5} M_{\odot}$$

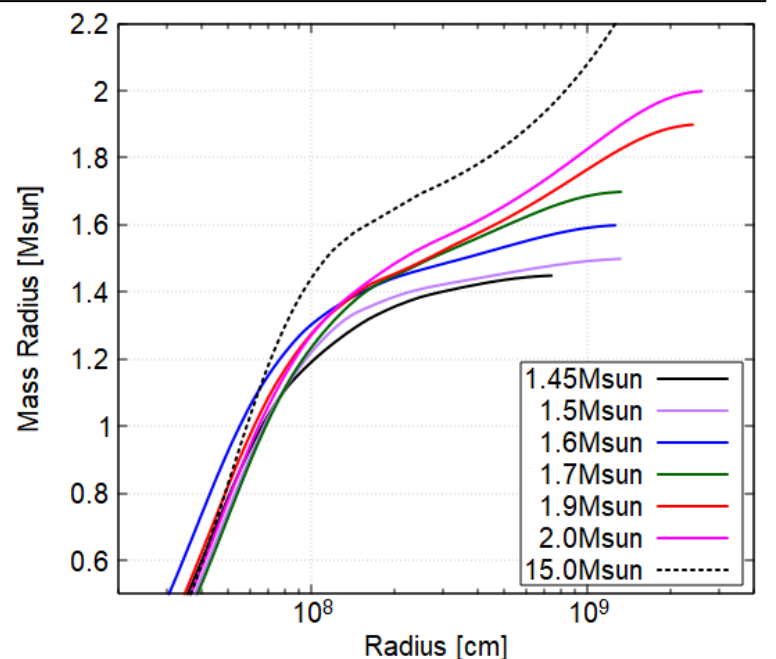
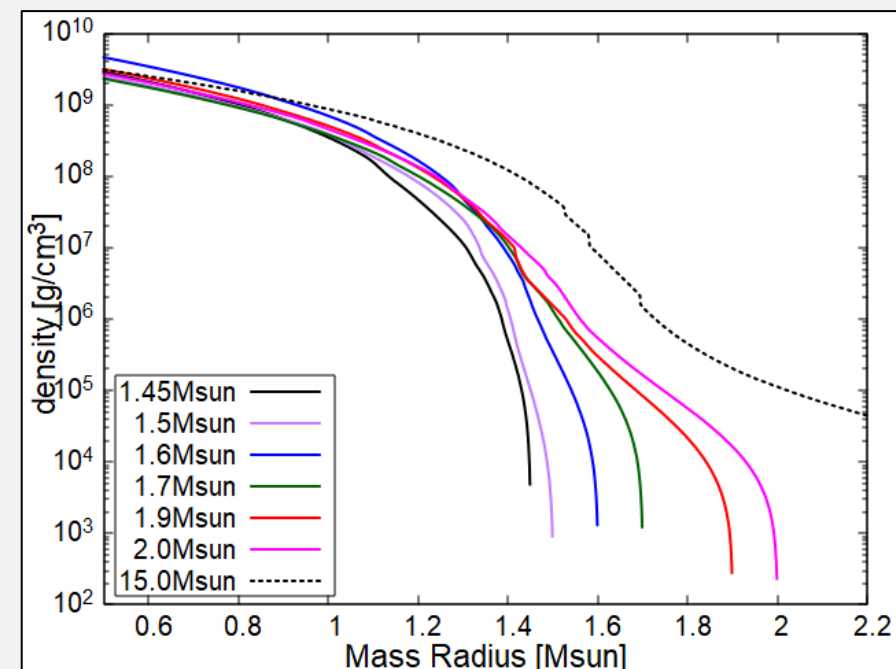
結果：元素合成計算と ^{56}Ni 生成量

	median	minimum
type II	$0.036 M_{\odot}$	$\lesssim 0.001 M_{\odot}$
type IIb+Ibc	$0.05 M_{\odot}$	$0.025 M_{\odot}$

- iPTF 14gqr ($M_{^{56}\text{Ni}} = \mathbf{0.05} M_{\odot}$; De+2018)
- SN 2019dge ($M_{^{56}\text{Ni}} = 0.015 M_{\odot}$; Yao+2020)



Meza & Andersons (2021)



結果：One-zoneモデルによる光度曲線計算

Light-curve model

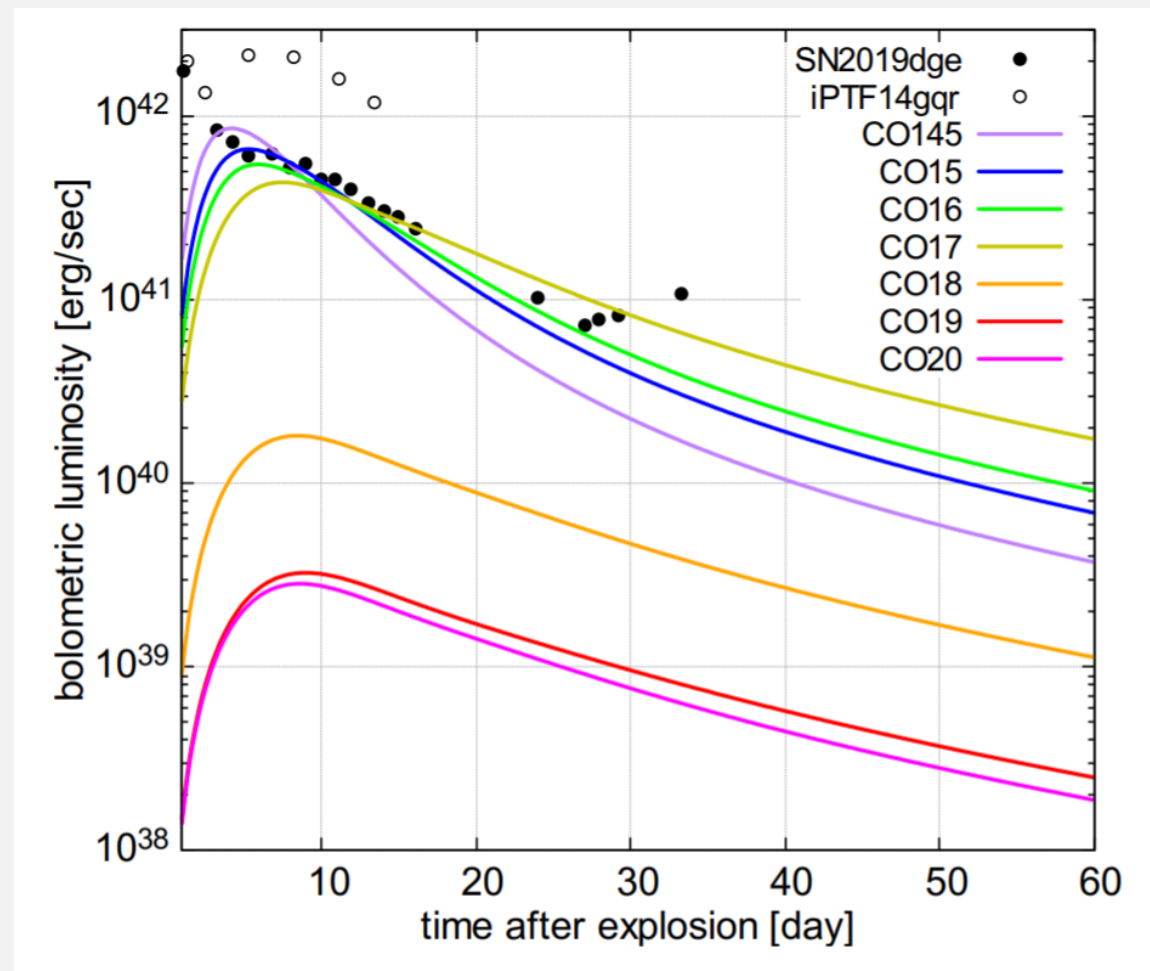
$$\frac{\partial E_{\text{int}}(t)}{\partial t} = -\frac{E_{\text{int}}(t)}{t_{\text{dyn}}} + \dot{Q}(t) - E_{\text{int}} \cdot \frac{t_{\text{dyn}}}{t_{\text{diff}}^2}$$

$$\frac{\partial E_{\text{kin}}(t)}{\partial t} = \frac{E_{\text{int}}(t)}{t_{\text{dyn}}}$$

$$\dot{Q}(t) = f_{\text{dep}} \cdot [M(^{56}\text{Ni}) \cdot q_{\text{Ni}}(t)]$$

Table 2. Summary of simulation results.

Model	$E_{\text{expl.}}$ (Bethe)	M_{ej} ($M_{\odot}$)	$M(^{56}\text{Ni})$ ($M_{\odot}$)	$\dot{M}_{\text{fb},0}$ ($M_{\odot}/\text{s}$)	ΔM_{fb} ($M_{\odot}$)	$M_{\text{NS},f}$ ($M_{\odot}$)
CO145	0.17	0.097	1.63×10^{-2}	9.56×10^{-7}	0.0030	1.35
CO15	0.15	0.136	1.38×10^{-2}	1.48×10^{-6}	0.0054	1.37
CO16	0.12	0.151	1.20×10^{-2}	1.80×10^{-6}	0.0056	1.43
CO17	0.12	0.225	1.09×10^{-2}	2.69×10^{-6}	0.0104	1.46
CO18	0.12	0.277	4.80×10^{-4}	4.24×10^{-6}	0.0123	1.50
CO19	0.12	0.307	9.19×10^{-5}	5.39×10^{-6}	0.0211	1.56
CO20	0.12	0.286	7.78×10^{-5}	1.21×10^{-5}	0.0402	1.64



iPTF 14gqr (De+2018)

- $M_{\text{ejecta}} = 0.2 M_{\odot}$
- $E_{\text{kin}} = 0.2 \times 10^{51} \text{ ergs}$
- $M_{56\text{Ni}} = 0.05 M_{\odot}$

SN 2019dge (Yao+2020)

- $M_{\text{ejecta}} \approx 0.33 M_{\odot}$
- $E_{\text{kin}} = 0.13 \times 10^{51} \text{ ergs}$
- $M_{56\text{Ni}} = 0.015 M_{\odot}$

考察：フォールバック降着が光度曲線に及ぼす影響

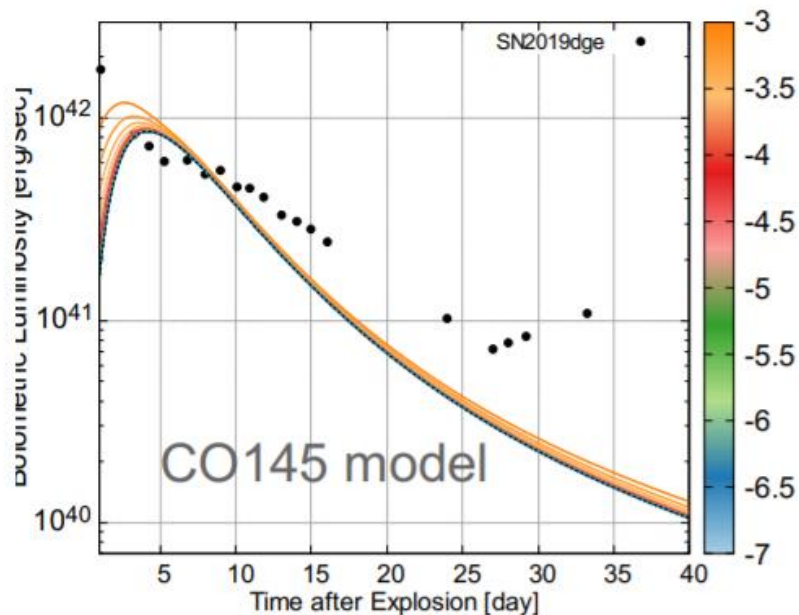
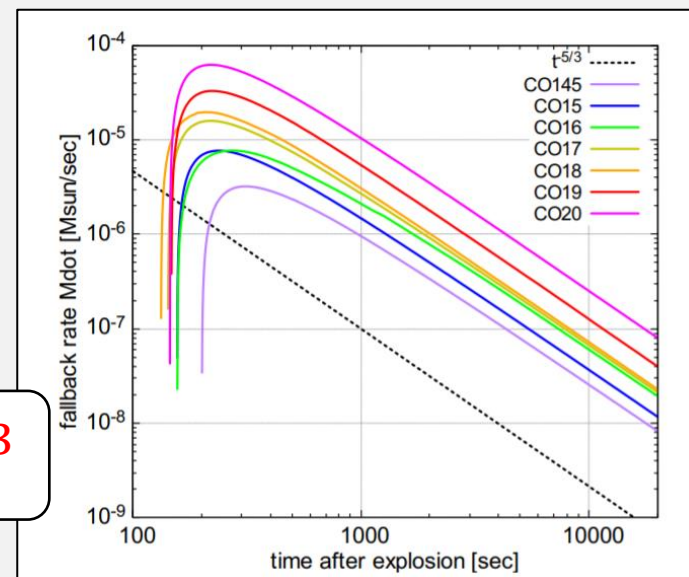
Light-curve model

$$\frac{\partial E_{\text{int}}(t)}{\partial t} = -\frac{E_{\text{int}}(t)}{t_{\text{dyn}}} + \dot{Q}(t) - E_{\text{int}} \cdot \frac{t_{\text{dyn}}}{t_{\text{diff}}^2}$$

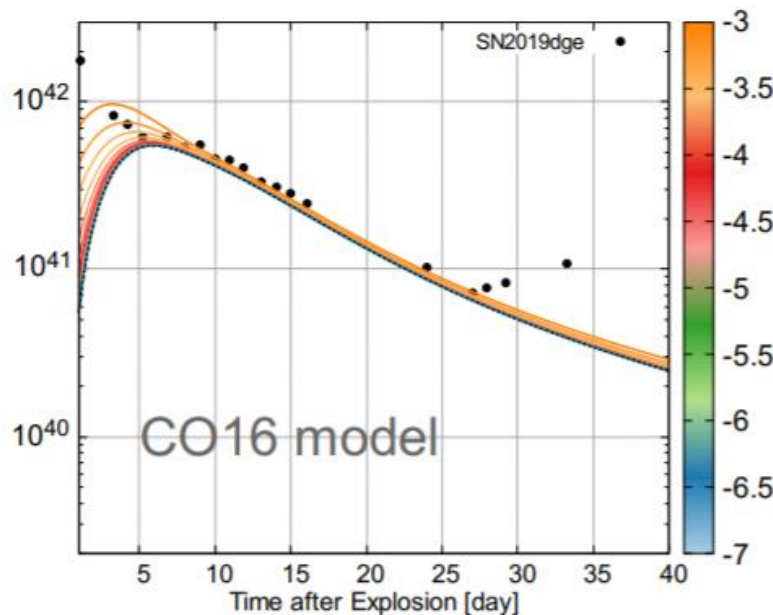
$$\frac{\partial E_{\text{kin}}(t)}{\partial t} = \frac{E_{\text{int}}(t)}{t_{\text{dyn}}}$$

$$\dot{Q}(t) = f_{\text{dep}} \cdot [M(^{56}\text{Ni}) \cdot q_{\text{Ni}}(t)] + \eta \cdot \dot{M}_{\text{fb}}(t)c^2$$

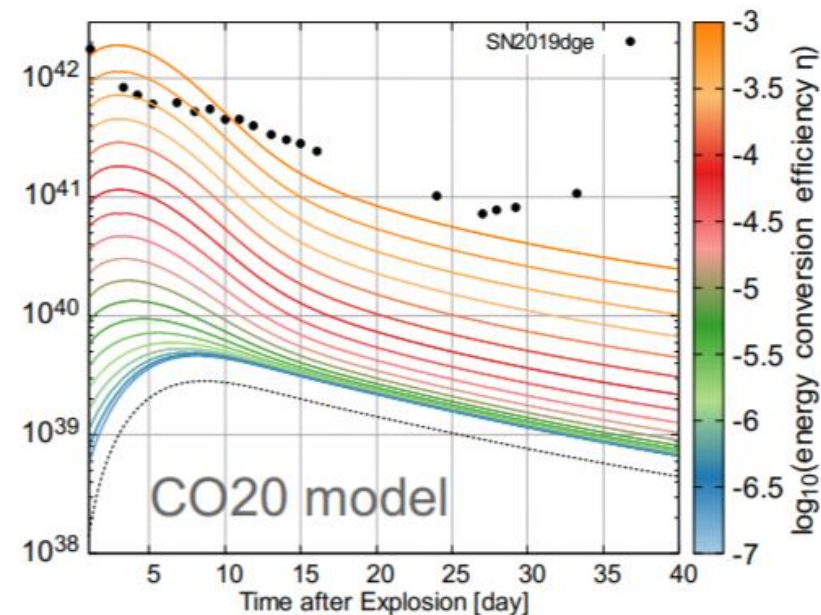
$$\eta = 10^{-7} - 10^{-3}$$



(a) CO145 model



(b) CO16 model



(c) CO20 model

考察：観測との比較

Compered to obs.

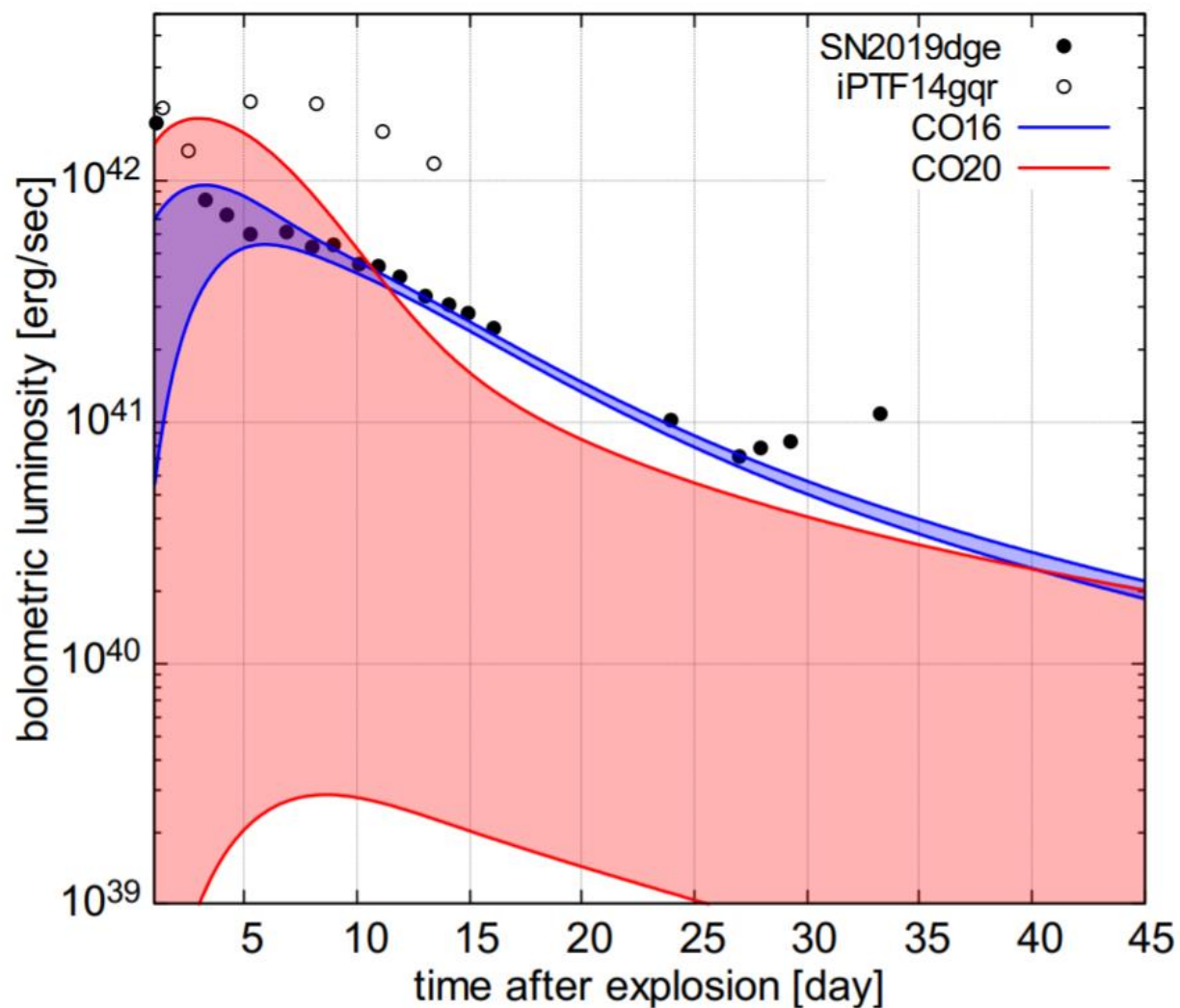


Table 2. Summary of simulation results.

Model	$E_{\text{expl.}}$ (Bethe)	M_{ej} ($M_{\odot}$)	$M(^{56}\text{Ni})$ ($M_{\odot}$)	$\dot{M}_{\text{fb},0}$ ($M_{\odot}/\text{s}$)	ΔM_{fb} ($M_{\odot}$)	$M_{\text{NS},f}$ ($M_{\odot}$)
CO145	0.17	0.097	1.63×10^{-2}	9.56×10^{-7}	0.0030	1.35
CO15	0.15	0.136	1.38×10^{-2}	1.48×10^{-6}	0.0054	1.37
CO16	0.12	0.151	1.20×10^{-2}	1.80×10^{-6}	0.0056	1.43
CO17	0.12	0.225	1.09×10^{-2}	2.69×10^{-6}	0.0104	1.46
CO18	0.12	0.277	4.80×10^{-4}	4.24×10^{-6}	0.0123	1.50
CO19	0.12	0.307	9.19×10^{-5}	5.39×10^{-6}	0.0211	1.56
CO20	0.12	0.286	7.78×10^{-5}	1.21×10^{-5}	0.0402	1.64

SN 2019dge (Yao+2020) は別Parameterで再現成功

- $M_{\text{ejecta}} \approx 0.33 M_{\odot}$
- $E_{\text{kin}} = 0.13 \times 10^{51} \text{ ergs}$
- $M_{56\text{Ni}} = 0.015 M_{\odot}$

iPTF 14gqr (De+2018) は再現困難

- $M_{\text{ejecta}} = 0.2 M_{\odot}$
- $E_{\text{kin}} = 0.2 \times 10^{51} \text{ ergs}$
- $M_{56\text{Ni}} = 0.05 M_{\odot}$

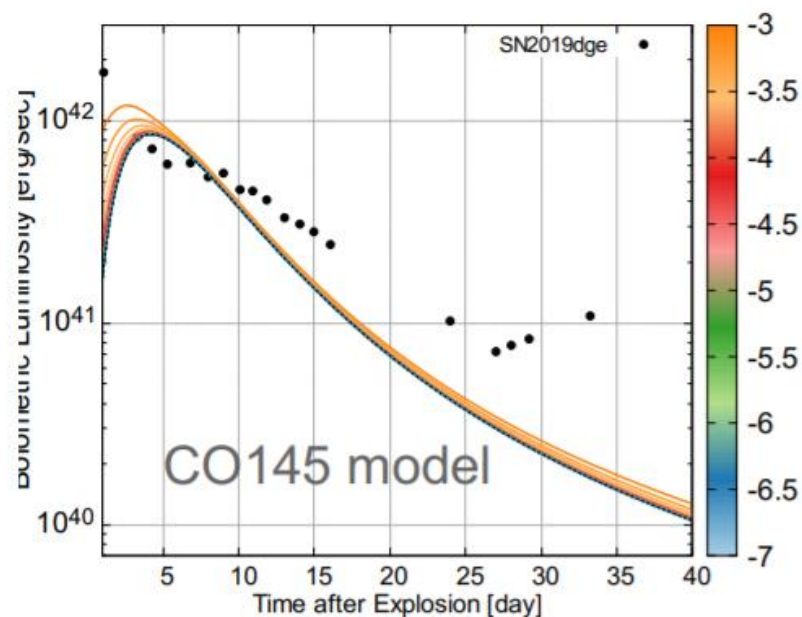
✓ iPTF 14gqr (De+2018) は ^{56}Ni 量／光度曲線の再現が困難

✓ Central-compact objectが中性子星の場合のフォールバック加熱効率/機構は不明

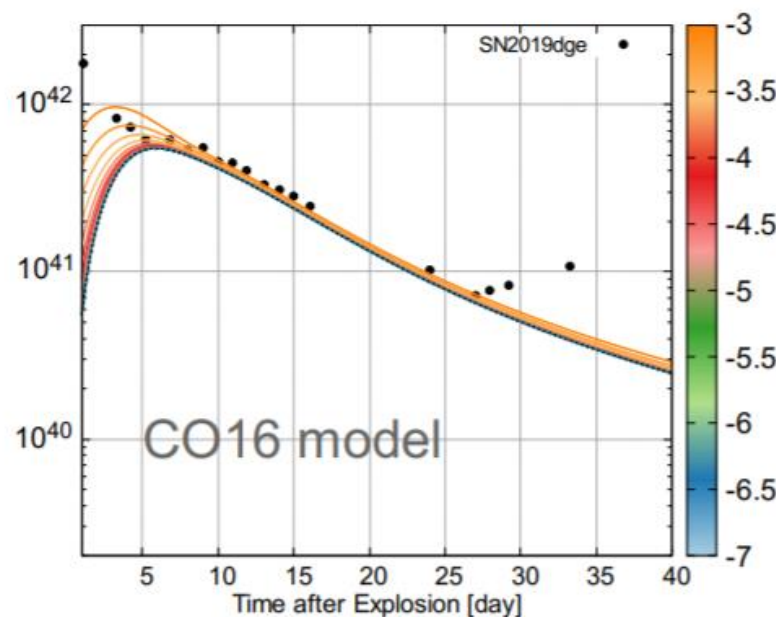
$$\dot{Q}(t) = f_{dep} \cdot [M(^{56}\text{Ni}) \cdot q_{\text{Ni}}(t)] + \eta \cdot \dot{M}_{\text{fb}}(t)c^2$$

$$\eta = 10^{-7} - 10^{-3}$$

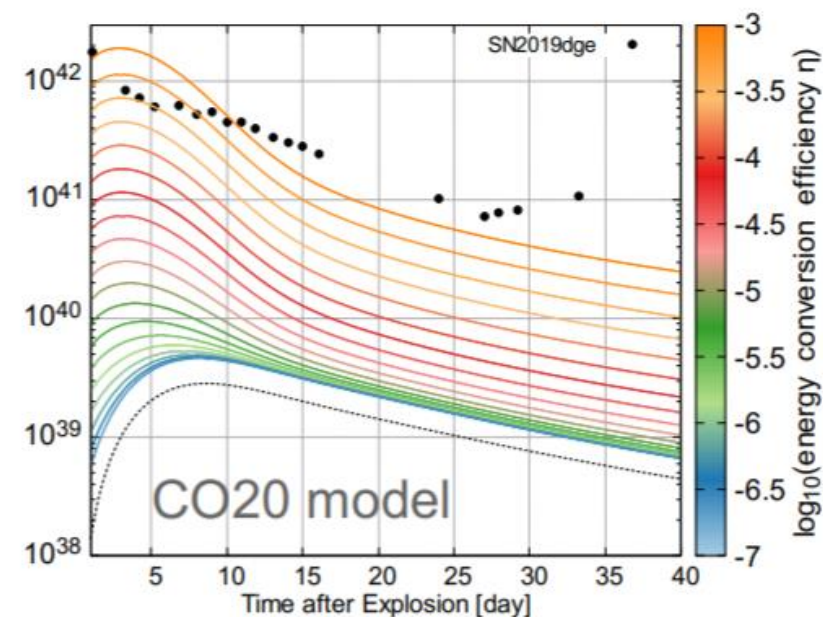
✓ ^{56}Ni -free + fallback-heating のstripped-envelope supernova : rapid-transient の候補？



(a) CO145 model



(b) CO16 model



(c) CO20 model