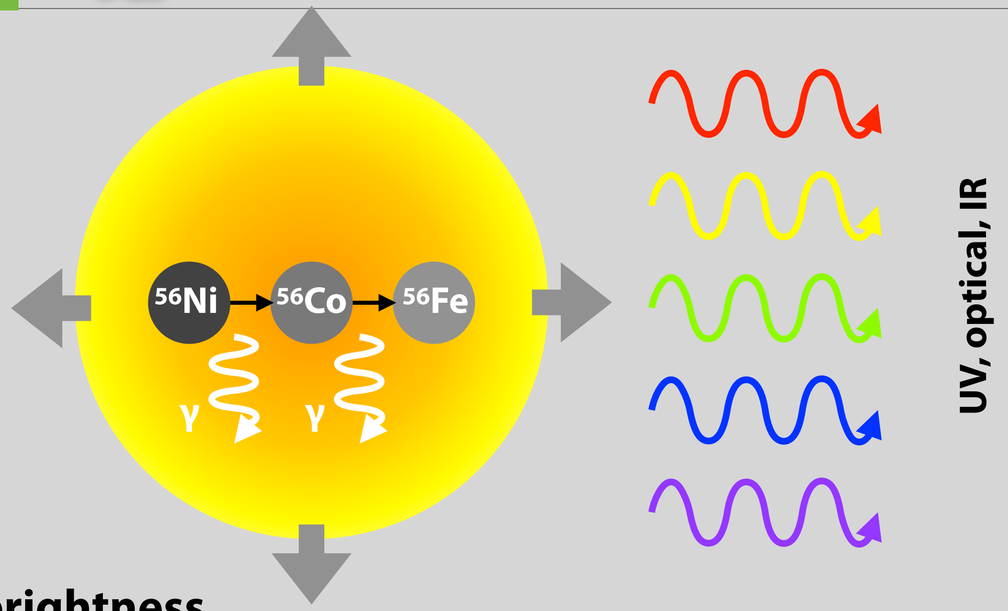
ニュートリノ加熱が駆動する
^{56}Ni枯渇と超新星初期光度曲線

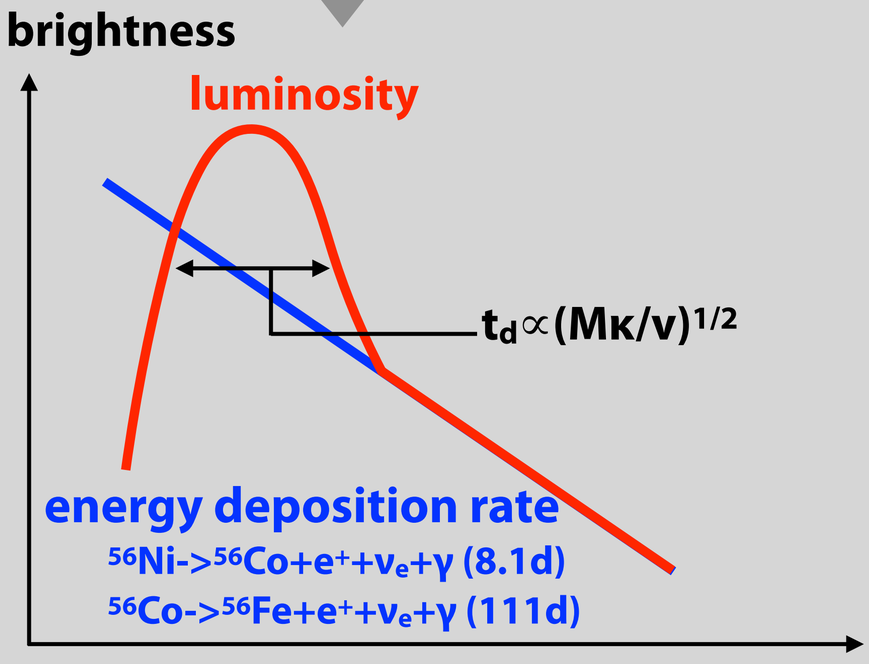
諏訪雄大（東大総文/京大基研）

共同研究者：西村信哉（工学院）、和南城伸也（京大基研）

^{56}Ni



UV, optical, IR



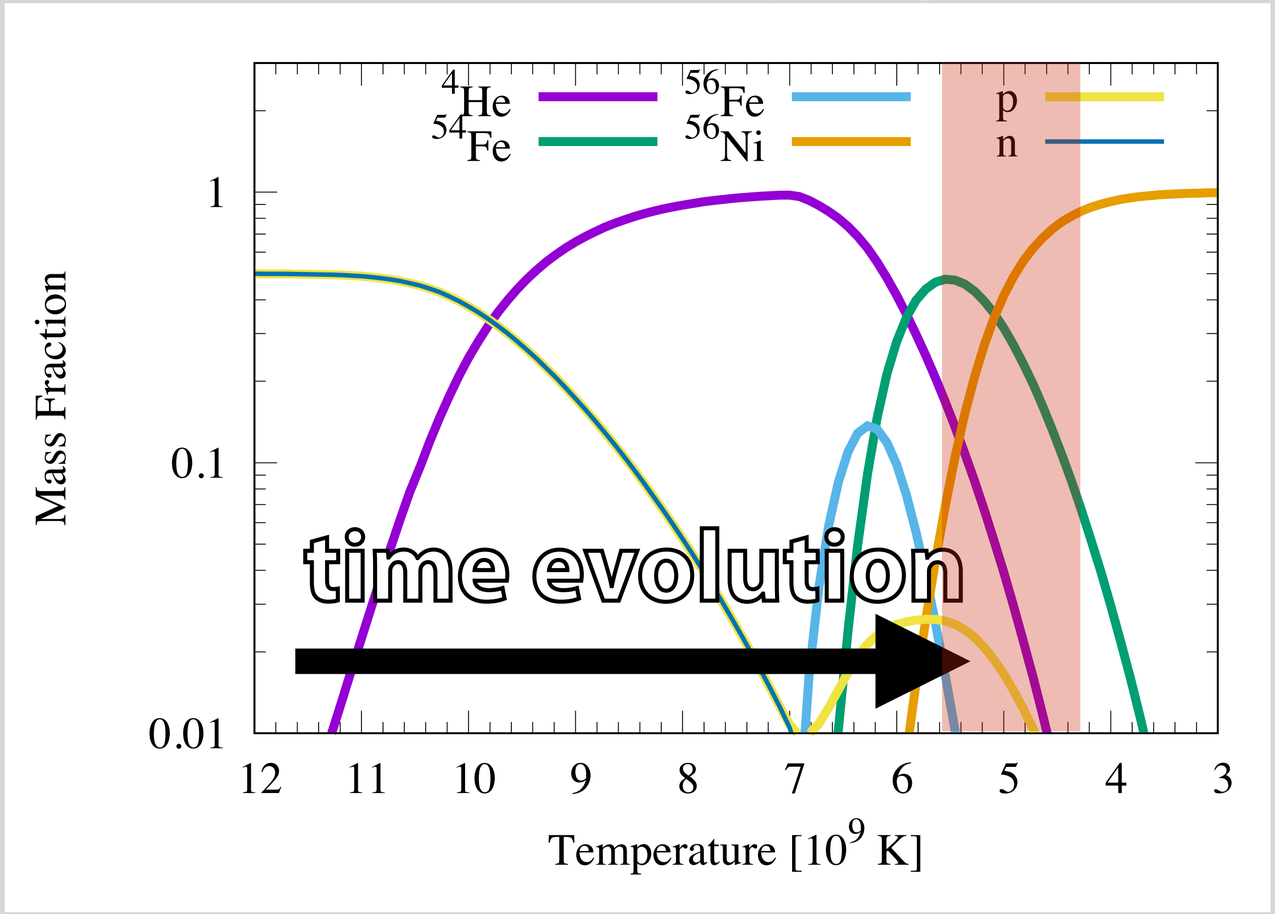
* $n_p \sim n_n$ ($Y_e \sim 0.5$)かつ$T \gtrsim 5\times10^9$Kで生成
* 超新星光度曲線
  - 初期：ガンマ線→可視光に下方散乱
  - 後期：ガンマ線のまま抜けてくる
* ガンマ線直接検出例
  - SN 1987A (CC, ^{56}Co, 51.4 kpc) [Matz+ 1988]
  - SN 2014J (Ia, ^{56}Ni, 3.6 Mpc) [Churazov+ 2015]
* 爆発機構と相関？

  [Suwa-Tominaga-Maeda 2019; Sawada-Maeda 2019; Sawada-Suwa 2021, 2023]

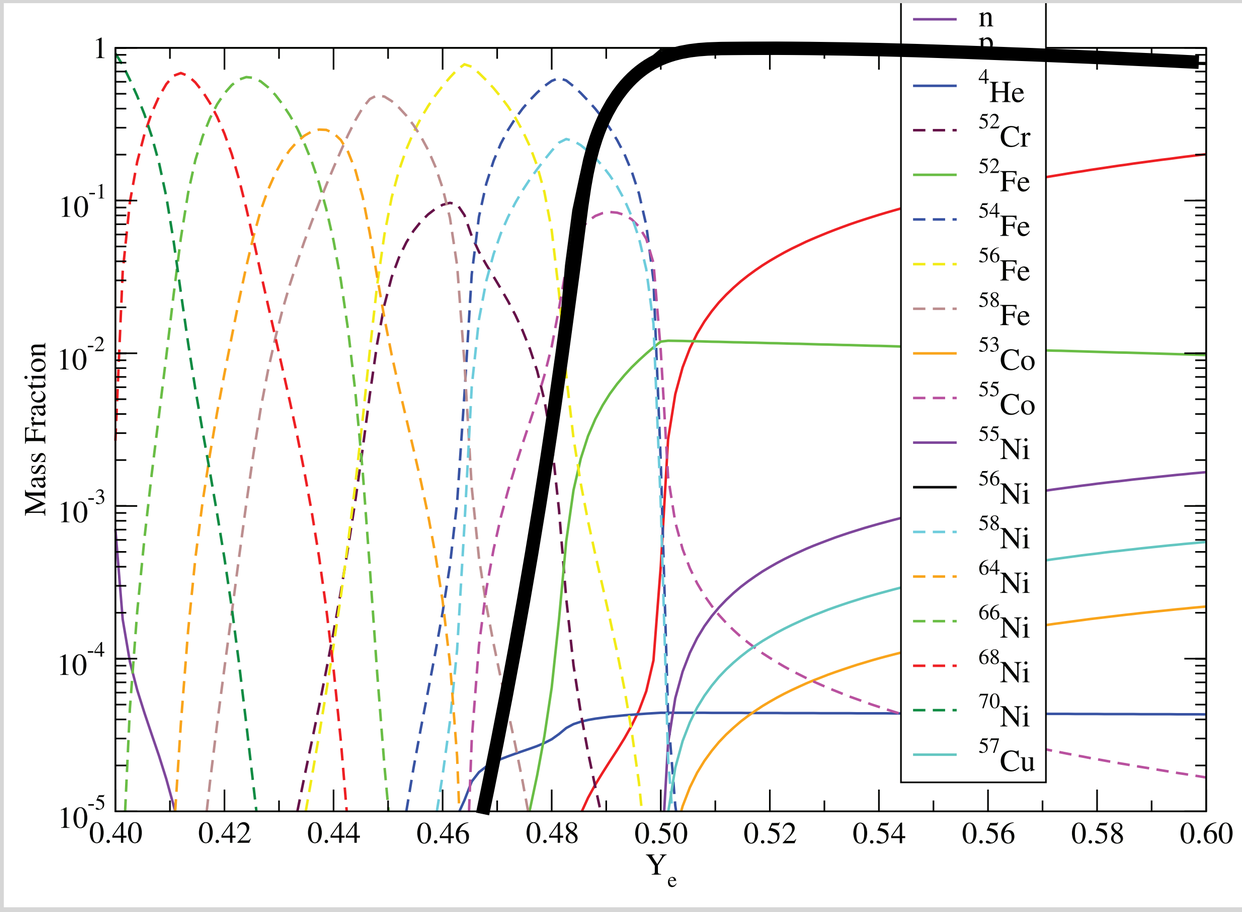
Nuclear Statistical Equilibrium (NSE)

NSE: chemical equilibrium of mixture of nucleons (n, p) and nuclei

ρ=10^7 g cm^{-3}、 Y_e=0.5



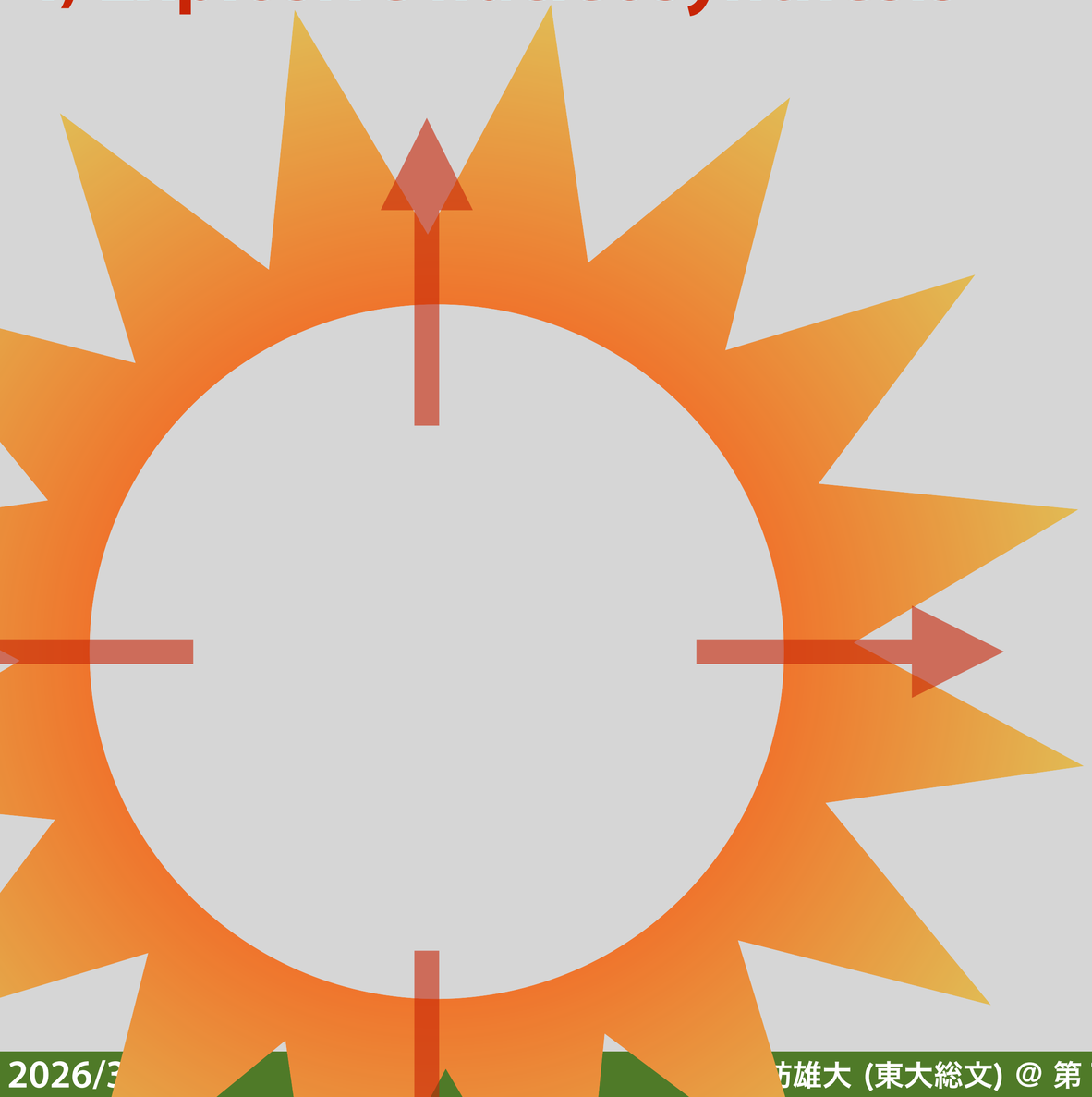
Seitenzahl+ 08 (ρ=10^7 g cm^{-3}、 T=3.5x10^9K)



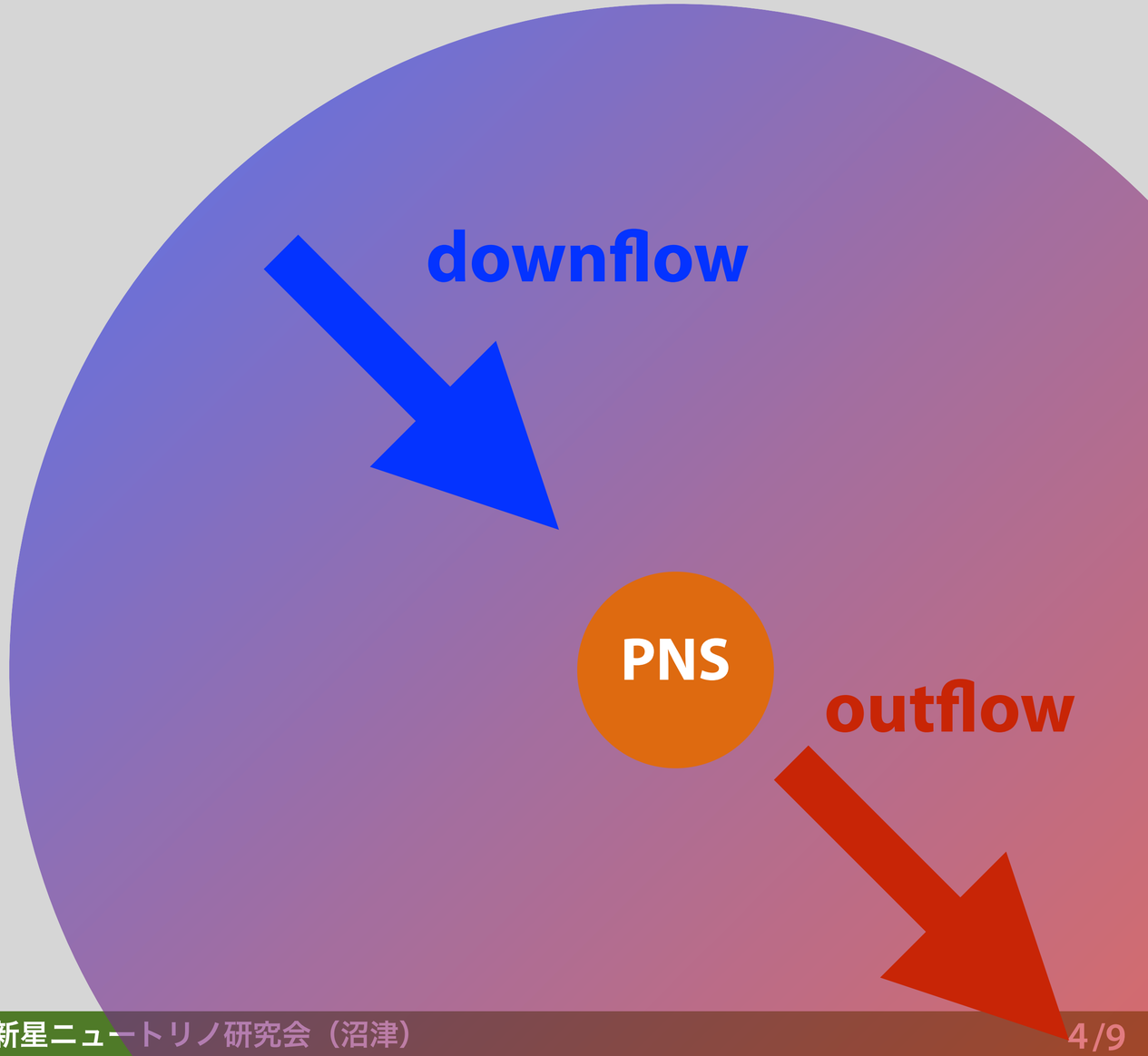
^{56}Ni is major element in SN ejecta for $Y_e \gtrsim 0.5$

^{56}Ni production site

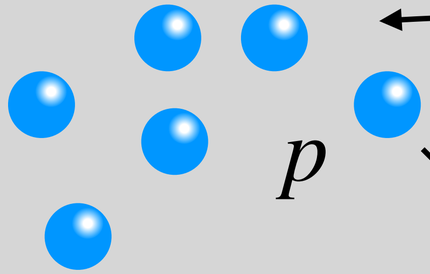
i) Explosive nucleosynthesis



ii) Downflow-outflow system



$^{56}Ni+n \rightarrow {}^{56}Co+p = {}^{56}Ni(n,p)^{56}Co$

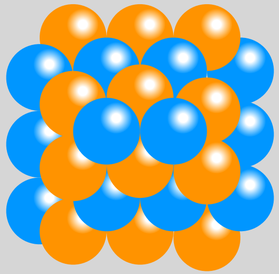


p

proton-rich environment (Ye>0.5)

n

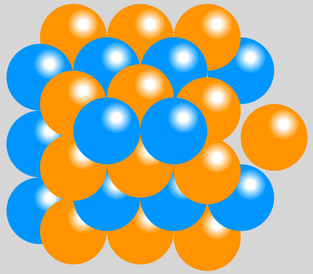
$\bar{\nu}_e$



^{56}Ni

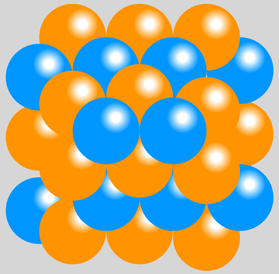
(28p+28n)

$t_{1/2}$=77.3d



^{56}Co

(27p+29n)



^{56}Fe

(26p+30n)

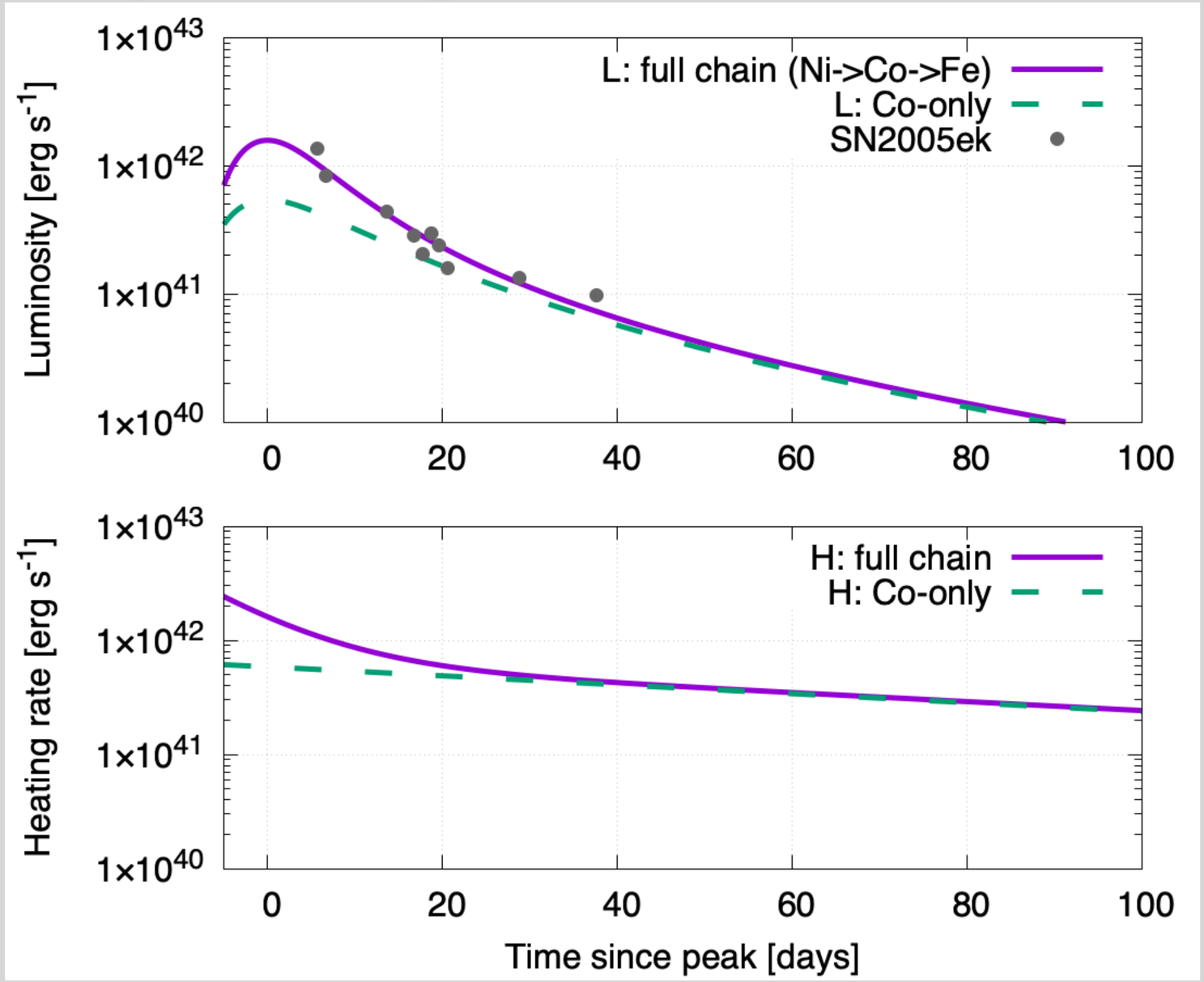
$$\dot{Y}_{\rm Ni} = -\lambda_{np}(T) Y_{\rm Ni} Y_n$$

$$\dot{Y}_n = -\lambda_{np}(T) Y_{\rm Ni} Y_n + \lambda_{\bar{\nu}_e p}(t) Y_p$$

$$\dot{Y}_p = +\lambda_{np}(T) Y_{\rm Ni} Y_n - \lambda_{\bar{\nu}_e p}(t) Y_p$$

Result: ^{56}Ni can be depleted

Impacts of ^{56}Ni(n,p)^{56}Co on Lightcurve



$E_{\rm expl} = 3.8 \times 10^{50}\,{\rm erg}$

$M_{\rm ej} = 0.24 M_\odot$

$M_{^{56}{\rm Ni}} = 0.042 M_\odot$

Probing the explosion mechanism w/ gamma rays from ^{56}Ni decay

Summary

* **^{56}Niは超新星元素合成で最重要**
* **どこで作られる？二つの候補**
  - 衝撃波での**爆発的元素合成**
  - 原始中性子星への**ダウンフロー→アウトフロー**（最近のシミュレーションはこちらを支持）
* **^{56}Ni+n → ^{56}Co+p という新規のネットワークフロー**
  - ダウンフロー＋アウトフローシナリオだと、^{56}Niとして出てこられない？
  - ultra-stripped SNのような早進化超新星のピーク付近が説明困難
* **M$^{56}_{\mathrm{Ni}}$とM$^{56}_{\mathrm{Co}}$の独立測定による爆発機構への新しい制限**