

A Consistent Modeling of Neutrino-driven Wind with Accretion Flow onto a Protoneutron Star and Its Implications for ^{56}Ni Production

「原始中性子星への質量降着を伴うニュートリノ駆動風モデルの構築と ^{56}Ni 生成量への示唆」

Ryo Sawada (澤田 涼)

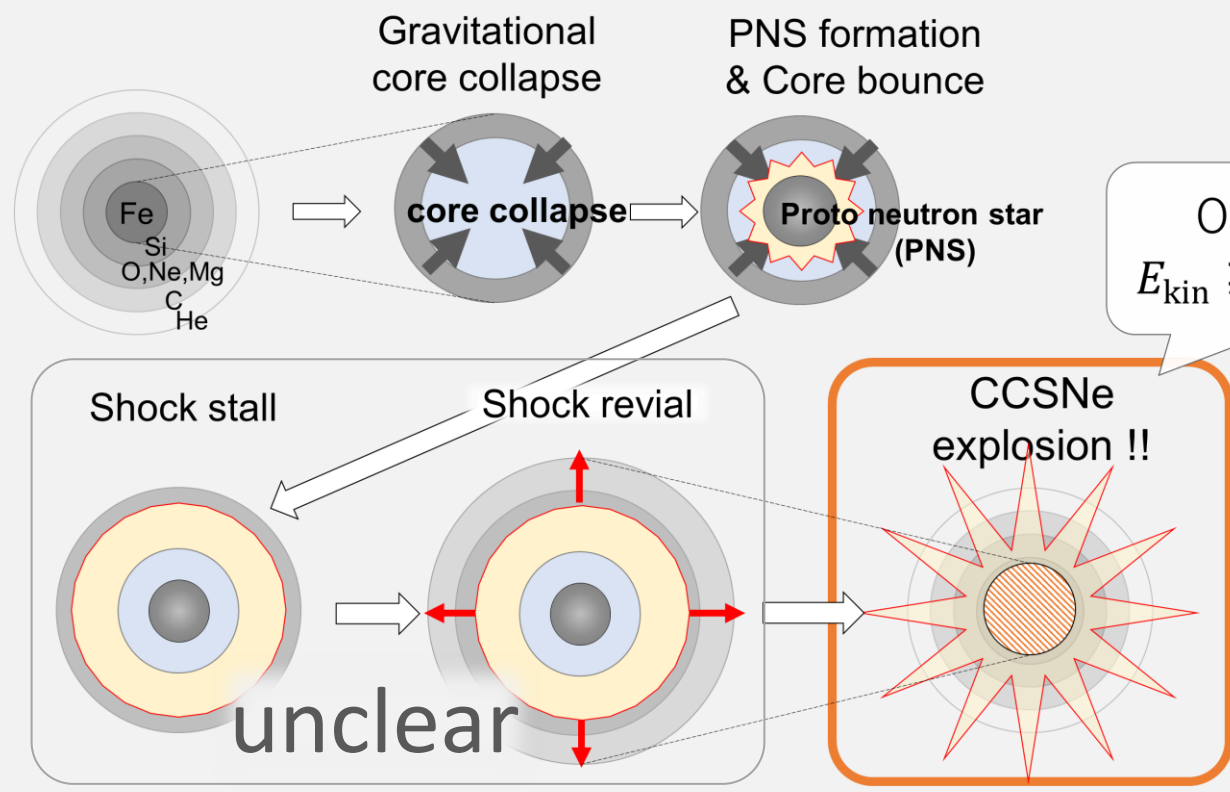
(Univ. of Tokyo/ JSPS fellow PD)

Yudai Suwa (諏訪 雄大)

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

重力崩壊型超新星の爆発メカニズム

• neutrino-driven explosion



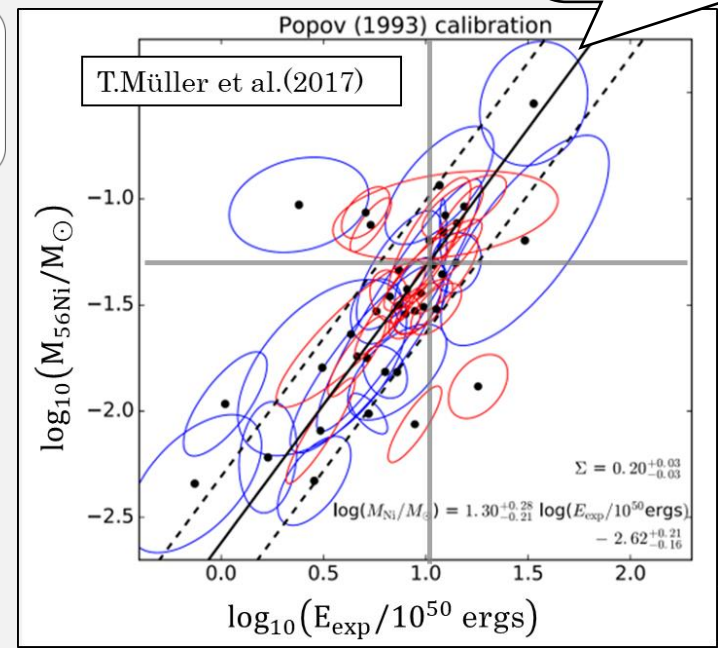
Observed
 $E_{kin} \approx 10^{51}$ ergs

observed property

$E_{kin} \sim 10^{51}$ erg

$M_{56Ni} \sim 0.07 M_{\odot}$

• observation



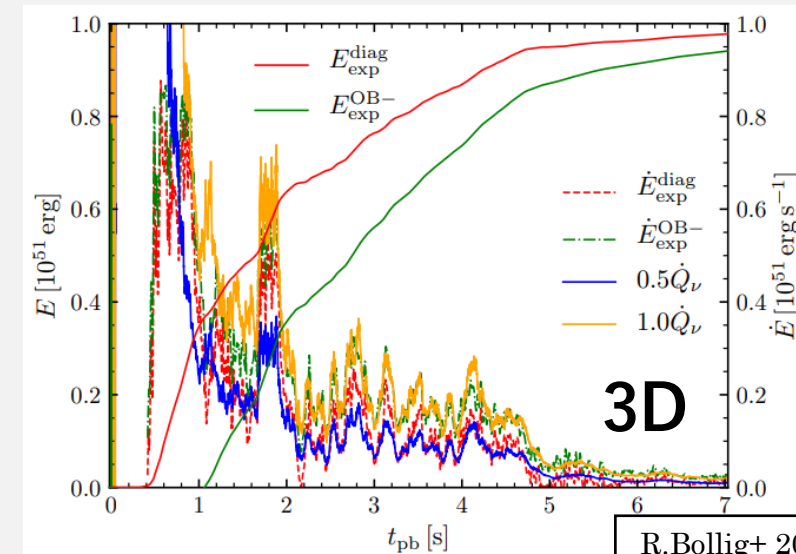
*unclear :

- 1). 爆発エネルギー 10^{51} erg に到達しうるか？
- 2). 十分な $56Ni$ 量を生成できるのか？

56Ni生成量問題 (Ni problem) とは？

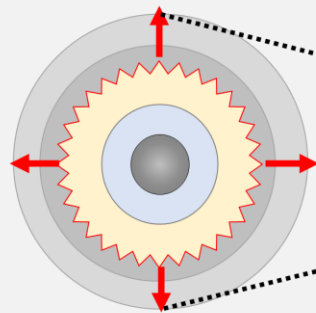
• 10^{51} erg に到達しうるか？ :

(e.g. Takiwaki+ 2012, Borriws+2020, Bollig+2020arxiv)

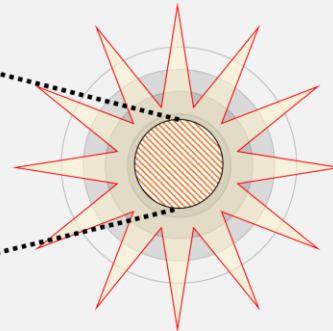


R. Bollig+ 2020

• 第一原理計算

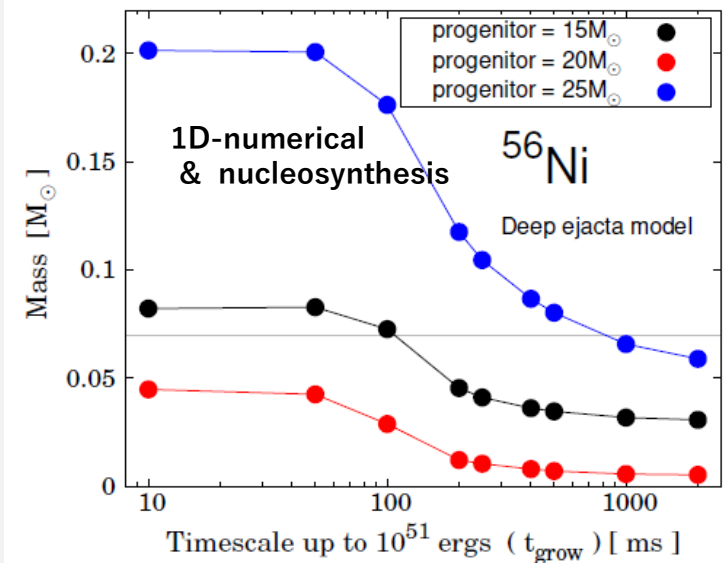


• 中心をモデル化



• 十分な56Ni量を生成できるのか？

(Suwa+ 2019, Sawada & Maeda 2019)



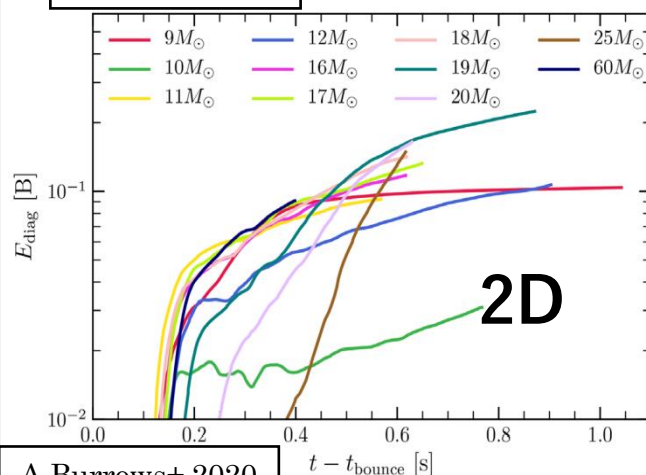
Sawada & Maeda (2019)

• ab-initio simulation :

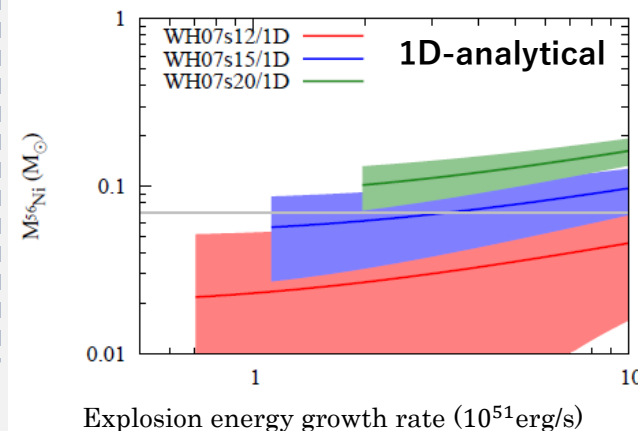
爆発エネルギー再現できる傾向

◆ 爆発エネルギーの成長率：

$$\dot{E}_{\text{expl.}} \sim \mathcal{O}(0.1) [10^{51} \text{ erg/s}]$$



A. Burrows+ 2020



Suwa, Tominaga & Maeda (2019)

• recent suggestion :

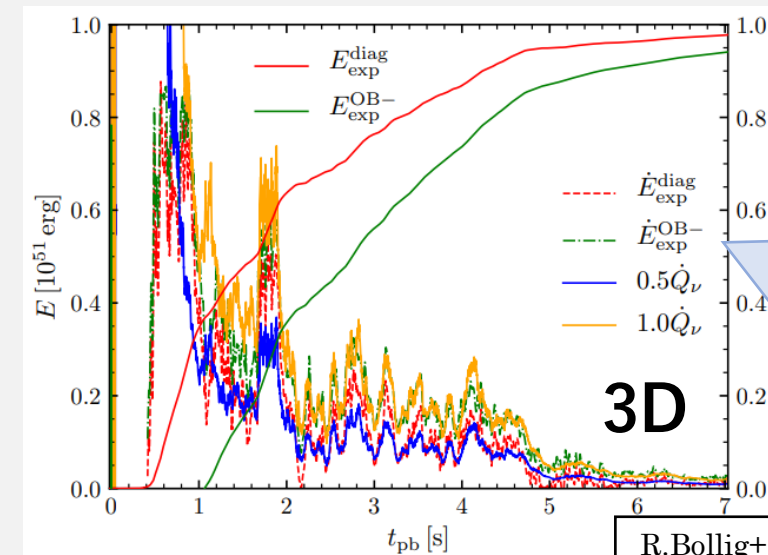
^{56}Ni の典型値($0.07M_{\odot}$)生成には、

- ◆ 爆発エネルギーよりも“成長率”が重要
- ◆ $\dot{E}_{\text{expl.}} \geq \mathcal{O}(1) [10^{51} \text{ erg/s}]$ が必要とされる

56Ni生成量問題 (Ni problem) とは？

• 10^{51} erg に到達しうるか？ :

(e.g. Takiwaki+ 2012, Borriws+2020, Bollig+2020arxiv)



3D

R. Bollig+ 2020

• 第一原理計算

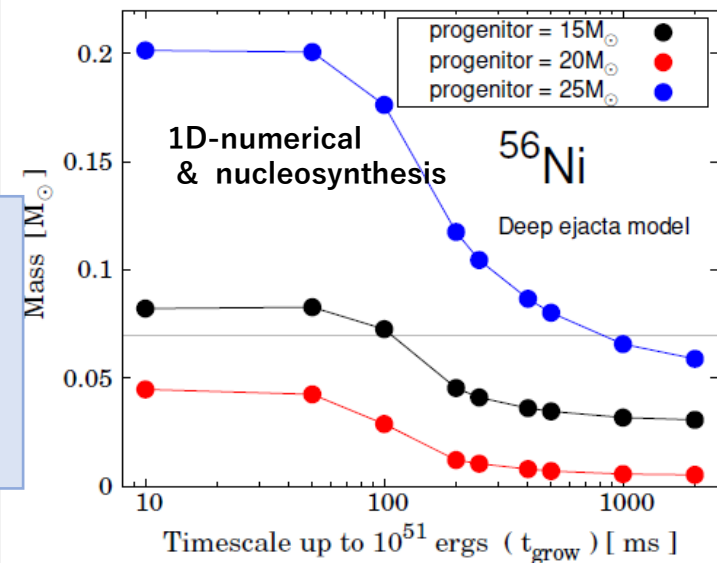
• 中心をモデル化

第一原理計算が再現する“超新星爆発”は
十分な56Niを生成できていない？

→ ‘nickel mass problem’ (Ni problem)

• 十分な56Ni量を生成できるのか？

(Suwa+ 2019, Sawada & Maeda 2019)



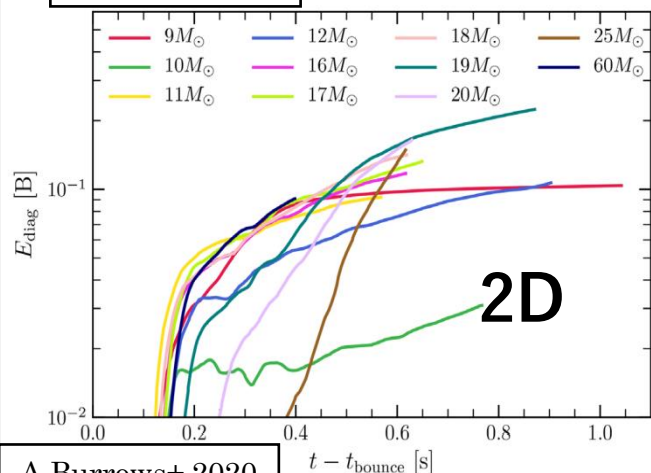
Sawada & Maeda (2019)

• ab-initio simulation :

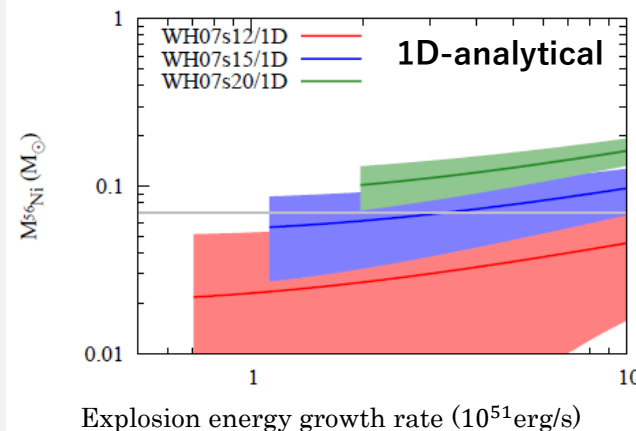
爆発エネルギー再現できる傾向

◆ 爆発エネルギーの成長率：

$$\dot{E}_{\text{expl.}} \sim \mathcal{O}(0.1) [10^{51} \text{ erg/s}]$$



A. Burrows+ 2020



Suwa, Tominaga & Maeda (2019)

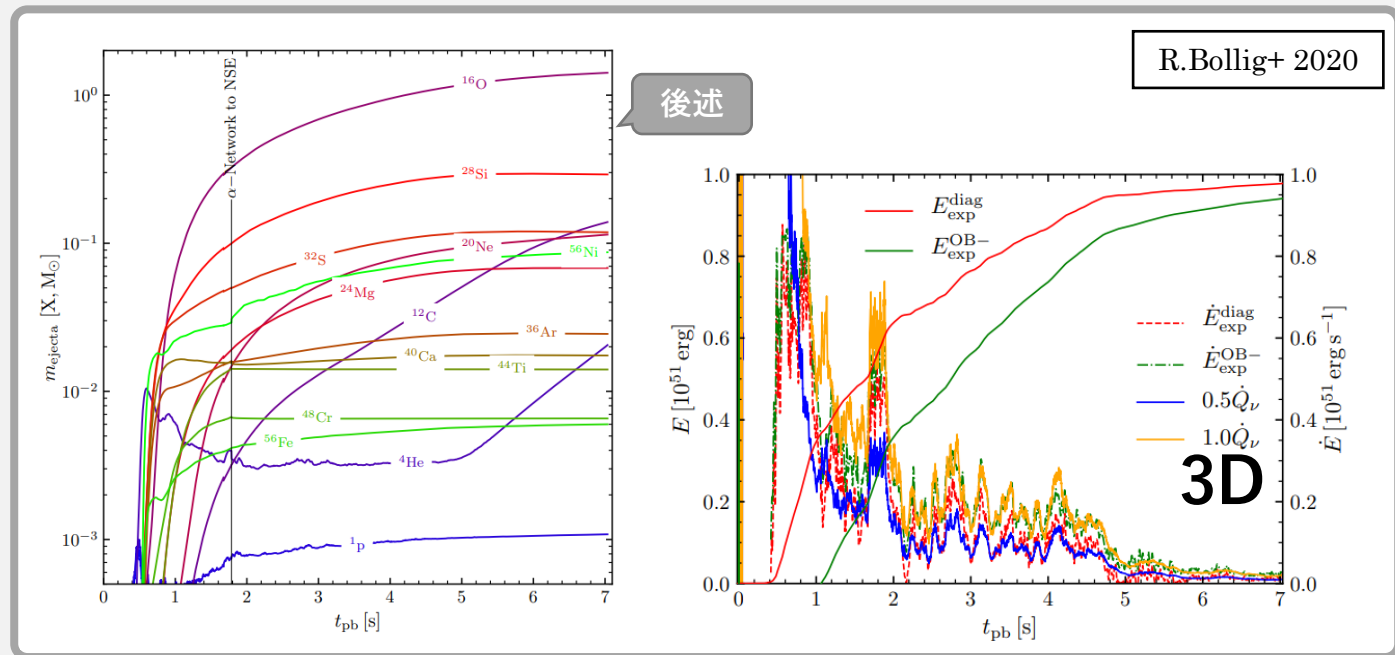
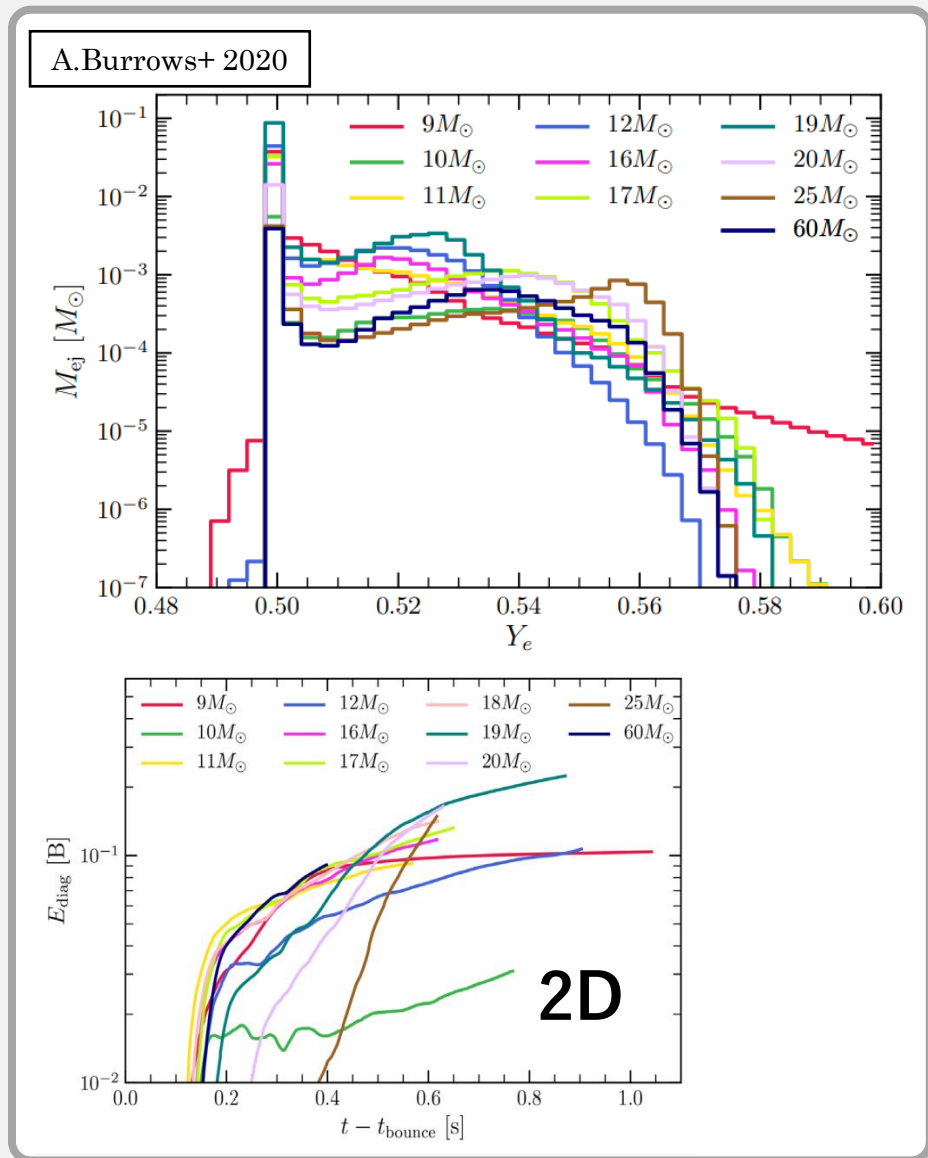
• recent suggestion :

56Niの典型値($0.07 M_{\odot}$)生成には、

◆ 爆発エネルギーよりも“成長率”が重要

◆ $\dot{E}_{\text{expl.}} \geq \mathcal{O}(1) [10^{51} \text{ erg/s}]$
が必要とされる

Note : 第一原理計算での ^{56}Ni 生成量



NOTE :

第一原理計算でも、

- 幾つかのモデルではCCSNeの ^{56}Ni の典型的な質量 $0.07M_{\odot}$ の生成に成功。
- ^{56}Ni 生成量 \Leftrightarrow 爆発エネルギー成長率 ($\dot{E}_{\text{expl.}}$)の相関性は確認

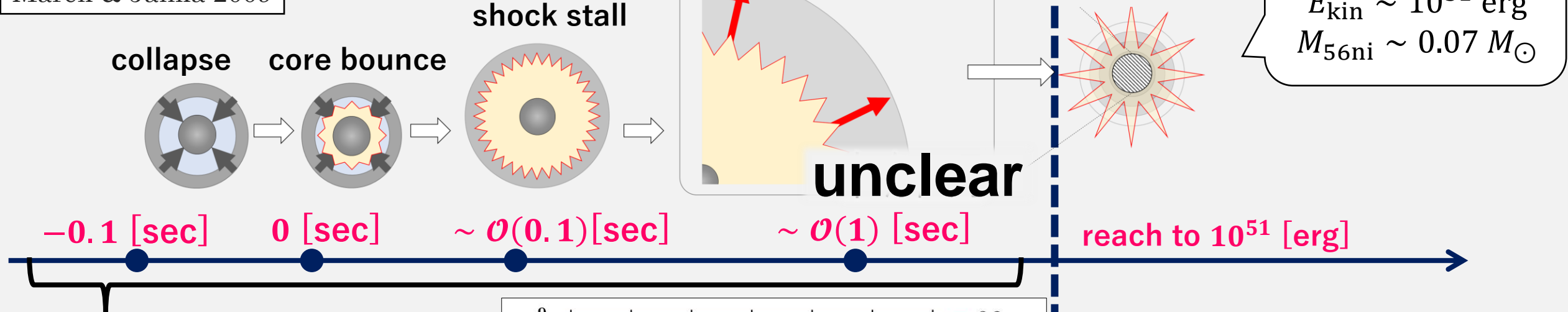
' ^{56}Ni 生成量問題'(Ni problem) :

→ (現在の) カノニカルな爆発では、 ^{56}Ni 生成量が観測値に比べて不足

重力崩壊型超新星の爆発メカニズム

neutrino-driven explosion

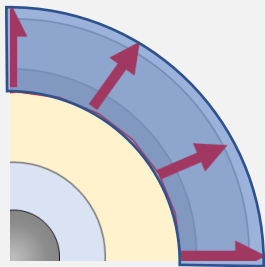
Marek & Janka 2009



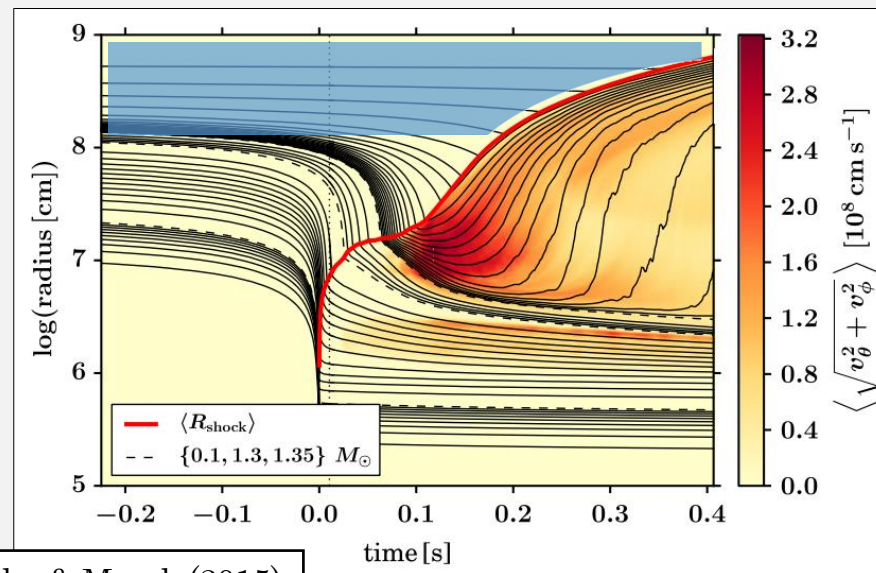
第一原理計算でのシミュレーション時間

→ ^{56}Ni 生成量不足
(Ni problem)

Explosive
Nucleosynthesis



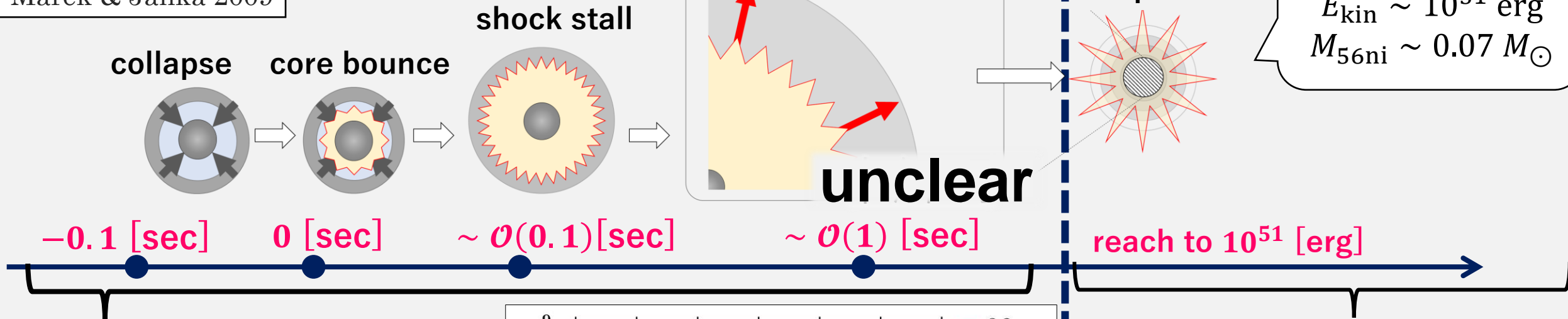
Melson, Janka & Marek (2015)



重力崩壊型超新星の爆発メカニズム

neutrino-driven explosion

Marek & Janka 2009

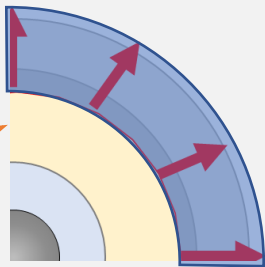


第一原理計算でのシミュレーション時間

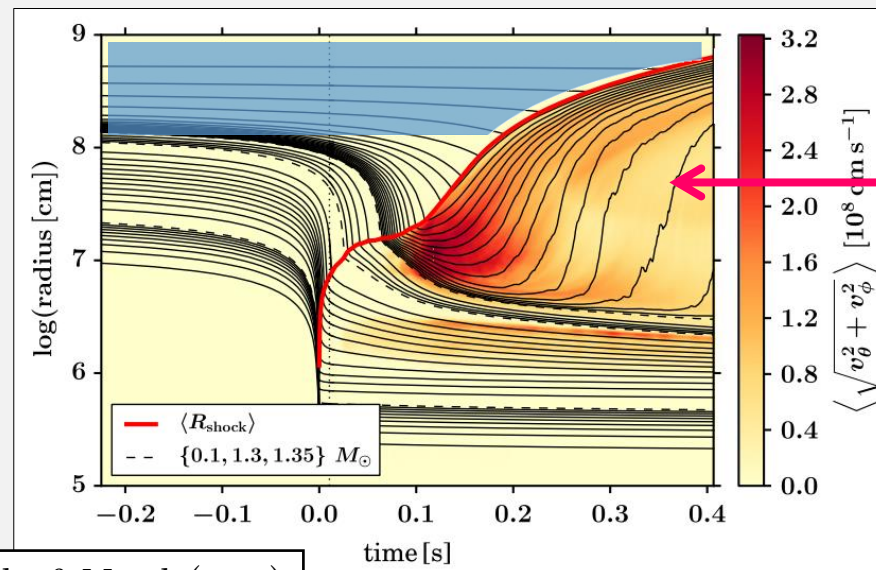
→ ^{56}Ni 生成量不足
(Ni problem)

Explosive Nucleosynthesis

blowing wind



Melson, Janka & Marek (2015)



「ニュートリノ駆動風」
が約1~20秒続く。

→特に、第一原理計算の
シミュレーション時間の後段階で
「ニュートリノ駆動風」
 ^{56}Ni を補填する可能性アリ

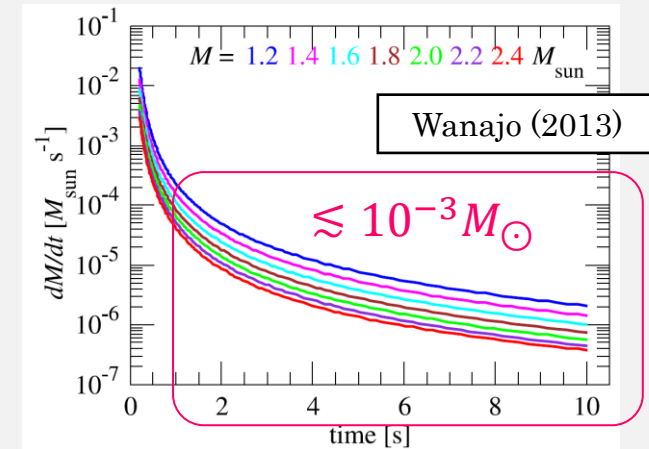
先行研究の問題点・本研究の目的

motivation

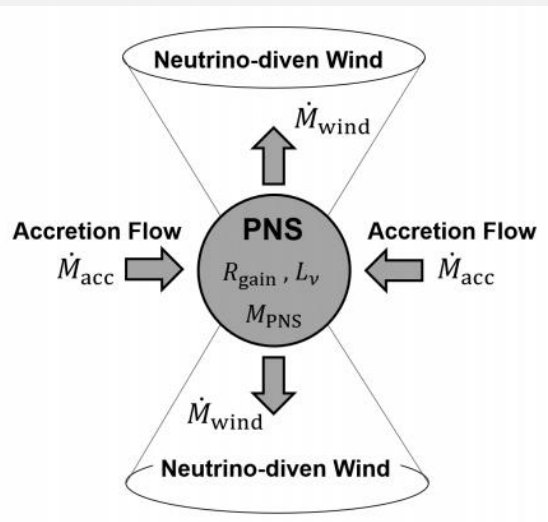
特に**爆発後期段階**で「ニュートリノ駆動風」が補填する ^{56}Ni 量を定量的に評価したい

problem

- **1D** (e.g.,Wanajo2013) :
ニュートリノ光度の減衰が早くNi problemの解決には Δ な放出量
→ multi-Dによるエネルギー補充が重要 (?)
- **multi-D** (e.g.,Wanajo+2018) :
Ni problem解決を示唆する放出量
→しかし計算時間の制約あり。爆発後期段階まで追えば解決しうる？

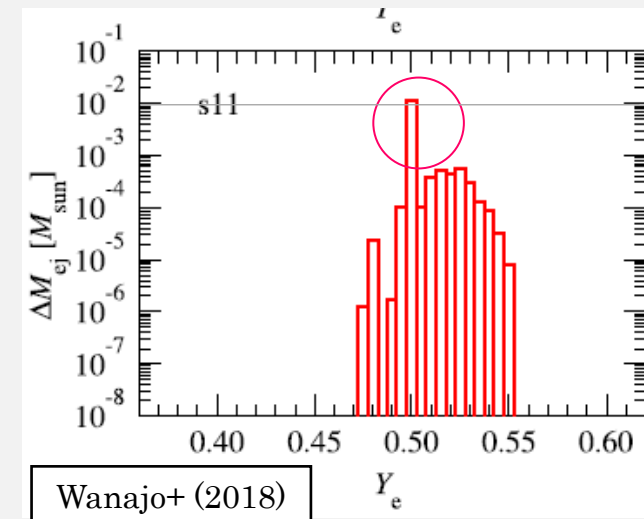


Ni problemには $\geq 0.01 M_{\odot}$ の放出が必要



our work

1. 「PNSへの降着流を伴うニュートリノ駆動風」の一貫した物理モデルを構築。
2. そして、ニュートリノ駆動風が「Ni-problem」を解決する可能性を検討。

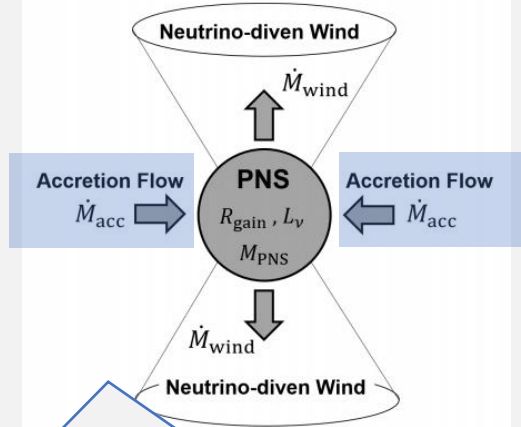


本研究の物理モデルの概観

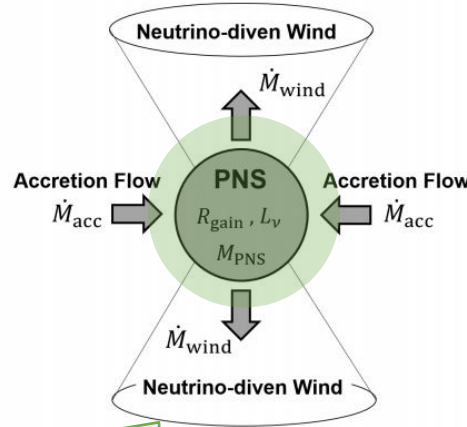
our work

「PNSへの降着流を伴うニュートリノ駆動風」の一貫した物理モデルを構築。

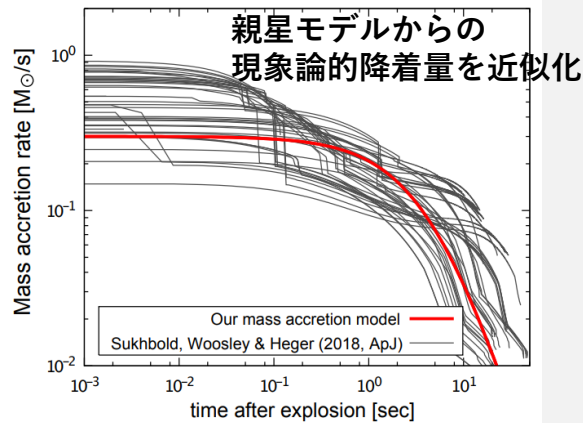
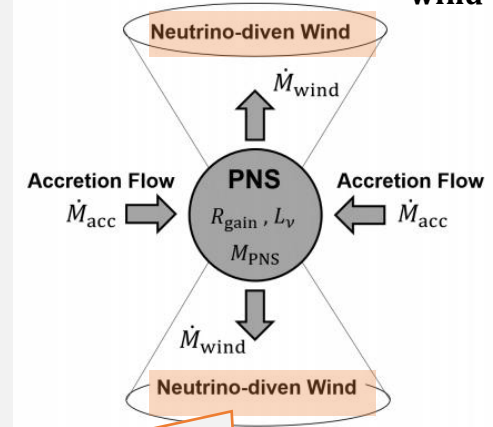
① PNSへの降着流はfree-fallを仮定



② 降着流をニュートリノ/PNS情報に変換



③ 球対称定常風解から \dot{M}_{wind} を導出



$$\dot{M}_{acc,iso}(t) = \dot{M}_{acc,0} \left(\frac{t}{t_0} + 1 \right)^{-2}, \quad (8)$$

ニュートリノ光度
 $= \eta \times (\text{降着流の重力解放エネルギー})$

Müller +2016

$$L_{\nu_e} \approx L_{\nu,acc} = \eta \frac{GM_{PNS}\dot{M}_{acc}}{R_{PNS}}, \quad (12)$$

Windの初期半径 (gain半径) : 第一原理計算の近似式

$$R_{gain} \approx 40 \text{ km} \left(\frac{\dot{M}_{acc}}{0.1 M_{\odot} \text{ s}^{-1}} \right)^{1/3} \left(\frac{M_{PNS}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{-1}. \quad (11)$$

3パラメータ ($L_{\nu}, R_{gain}, M_{PNS}$) $\Rightarrow \dot{M}_{wind,iso}$ の近似式

$$\dot{M}_{wind,iso} \approx 8.3 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ s}^{-1} \times \left(\frac{L_{\nu_e}}{10^{52} \text{ erg s}^{-1}} \right)^{7/4} \left(\frac{R_{gain}}{4 \times 10^6 \text{ cm}} \right)^{5/2} \left(\frac{M_{PNS}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{-7/2}. \quad (22)$$

④ 幾何効果項

$$\dot{M}_{wind} = f_{\Omega} \dot{M}_{wind,iso}, \quad (9)$$

$$\dot{M}_{acc} = (1 - f_{\Omega}) \dot{M}_{acc,iso}. \quad (10)$$

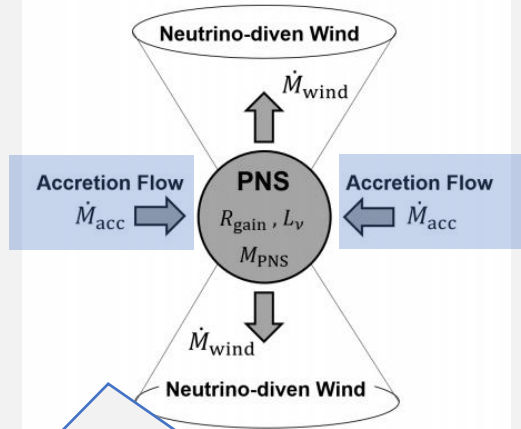
を加起来、式を接続

本研究の物理モデルの概観

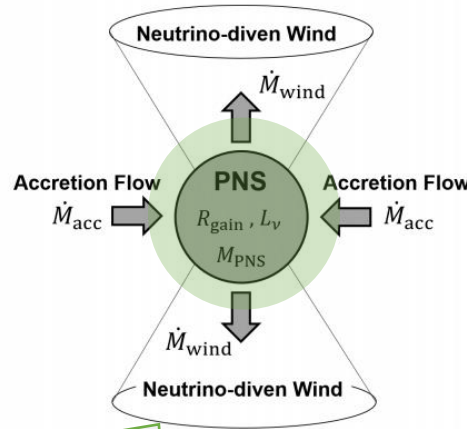
our work

「PNSへの降着流を伴うニュートリノ駆動風」の一貫した物理モデルを構築。

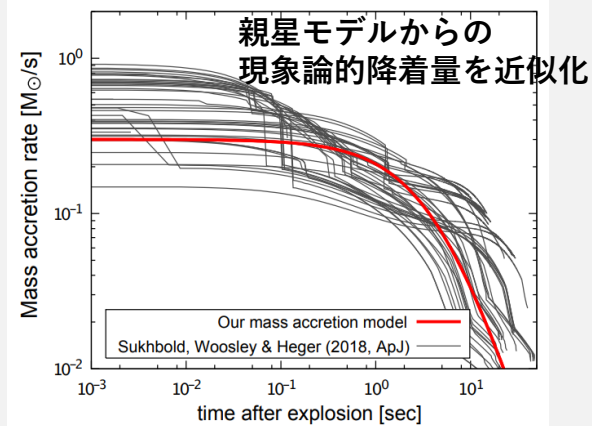
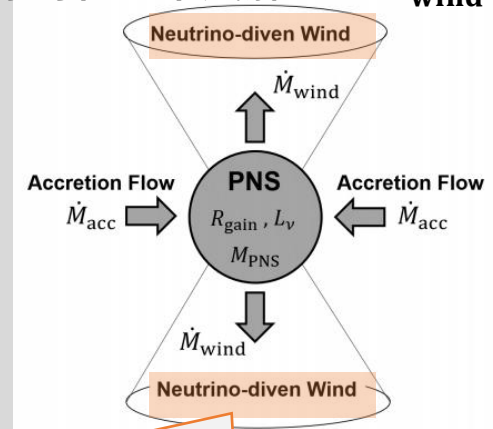
① PNSへの降着流はfree-fallを仮定



② 降着流をニュートリノ/PNS情報に変換



③ 球対称定常風解から M_wind を導出



$$\dot{M}_{\text{acc,iso}}(t) = \dot{M}_{\text{acc,0}} \left(\frac{t}{t_0} + 1 \right)^{-2}, \quad (8)$$

ニュートリノ光度
= $\eta \times$ (降着流の重力解放エネルギー)

Müller +2016

$$L_{\nu_e} \approx L_{\nu,\text{acc}} = \eta \frac{GM_{\text{PNS}} \dot{M}_{\text{acc}}}{R_{\text{PNS}}}, \quad (12)$$

Windの初期半径 (gain半径) : 第一原理計算の近似式

$$R_{\text{gain}} \approx 40 \text{ km} \left(\frac{\dot{M}_{\text{acc}}}{0.1 M_{\odot} \text{ s}^{-1}} \right)^{1/3} \left(\frac{M_{\text{PNS}}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{-1}. \quad (11)$$

3パラメータ ($L_{\nu}, R_{\text{gain}}, M_{\text{PNS}}$) $\Rightarrow \dot{M}_{\text{wind,iso}}$ の近似式

$$\dot{M}_{\text{wind,iso}} \approx 8.3 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ s}^{-1} \times \left(\frac{L_{\nu_e}}{10^{52} \text{ erg s}^{-1}} \right)^{7/4} \left(\frac{R_{\text{gain}}}{4 \times 10^6 \text{ cm}} \right)^{5/2} \left(\frac{M_{\text{PNS}}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{-7/2}. \quad (22)$$

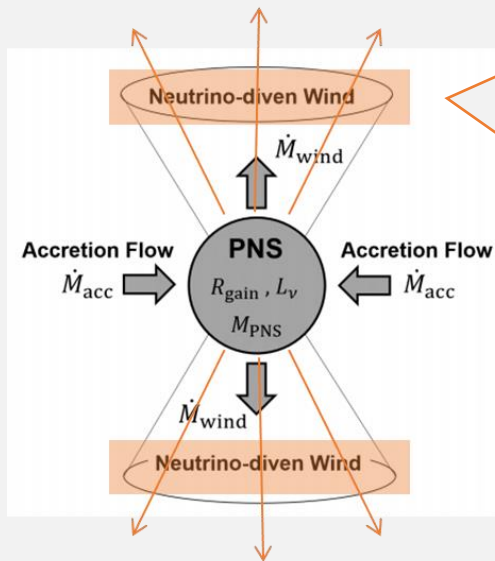
④ 幾何効果項

$$\dot{M}_{\text{wind}} = f_{\Omega} \dot{M}_{\text{wind,iso}}, \quad (9)$$

$$\dot{M}_{\text{acc}} = (1 - f_{\Omega}) \dot{M}_{\text{acc,iso}}. \quad (10)$$

を加えて、式を接続

球対称定常準解析解 とパラメータとの対応



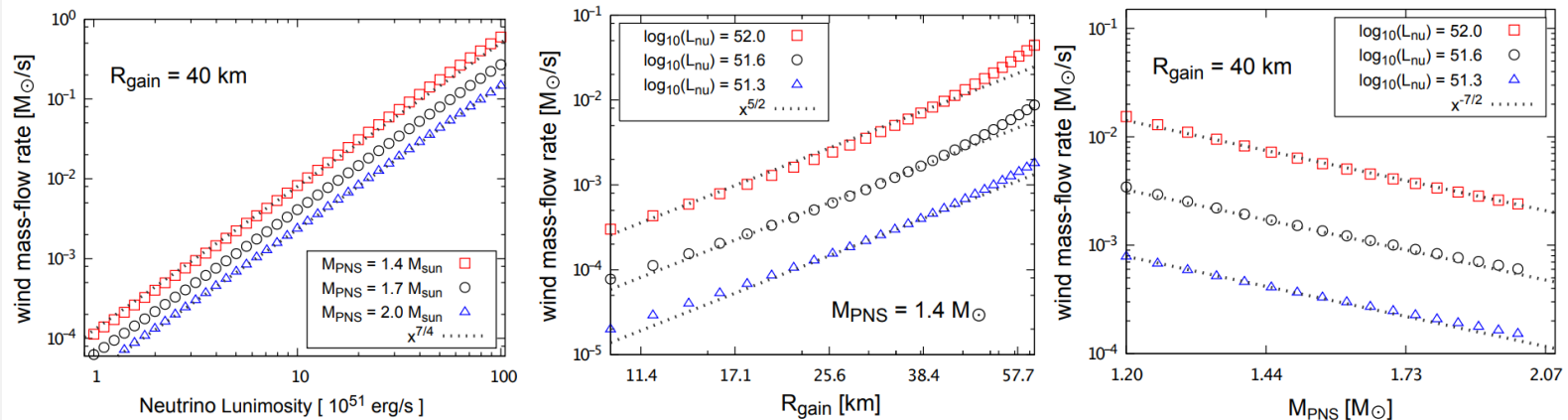
非球対称な衝撃波が掃いた低密度領域を、
「動径方向」にニュートリノ駆動風が吹くと仮定

- 球対称定常風を利用して、幾何項でコリメート
- ・パラメータの発展で時間進化を記述

球対称定常風解(e.g., Otsuki et al. 2000).

- ・初期条件の R_{gain}, ρ_0 が固定
- ・ $(R_{\text{gain}}, L_{\nu}, M_{\text{PNS}})$ の3パラメータ
⇒ 遷音速解 $v_{\text{tran}} \Leftrightarrow$ 最大 \dot{M}_{wind} に対応
∴ \dot{M}_{wind} の上限が得られる

計算結果



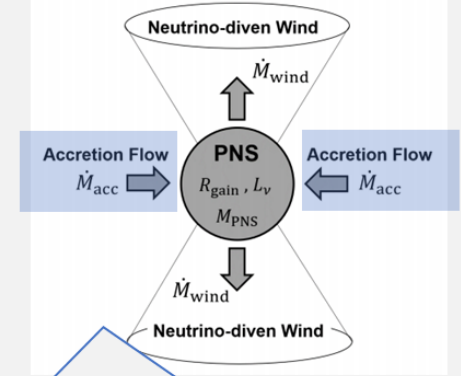
- $\dot{M} = 4\pi r^2 \rho v$, (1)
- $v \frac{dv}{dr} = -\frac{1 + (v/c)^2 - (2GM/c^2 r) \frac{dP}{dr} - \frac{GM_{\text{PNS}}}{r^2}}{\rho(1 + \epsilon/c^2) + P/c^2}$, (2)
- $\dot{Q} = v \left(\frac{d\epsilon}{dr} - \frac{P}{\rho^2} \frac{d\rho}{dr} \right)$, (3)
- Helmholtz EoS (Timmes & Swesty 2000),
- Boundary condition:
 $r = R_{\text{gain}} (\dot{Q} \approx 0)$
Given: $\rho_0 = 10^{10} \text{ g cm}^{-3} \cdot L_{\nu,51}^{1/2}$, (Fujibayashi+ 2015)
- $Y_e = \left[1 + \frac{L_{\nu_e}^n \langle \sigma_{\bar{\nu}_e p} \rangle}{L_{\nu_e}^n \langle \sigma_{\nu_e n} \rangle} \right]^{-1} = 0.5$, (4)
(e.g., Bliss+ 2018).

• spherical wind $\dot{M}_{\text{wind,iso}}$

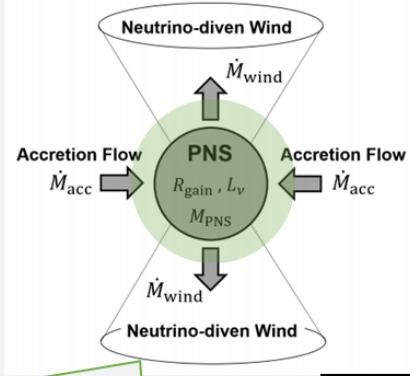
$$\dot{M}_{\text{wind,iso}} \approx 8.3 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ s}^{-1} \left(\frac{L_{\nu_e}}{10^{52} \text{ erg s}^{-1}} \right)^{\alpha} \left(\frac{R_{\text{gain}}}{4 \times 10^6 \text{ cm}} \right)^{\beta} \left(\frac{M_{\text{PNS}}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{\gamma}, \quad (5)$$

本研究の物理モデルの結果

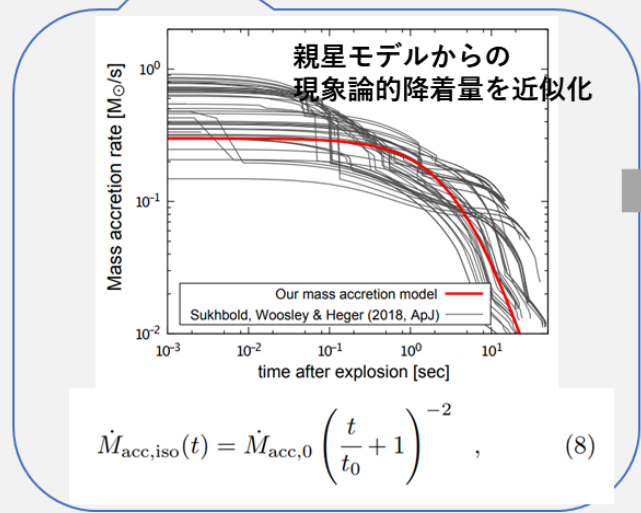
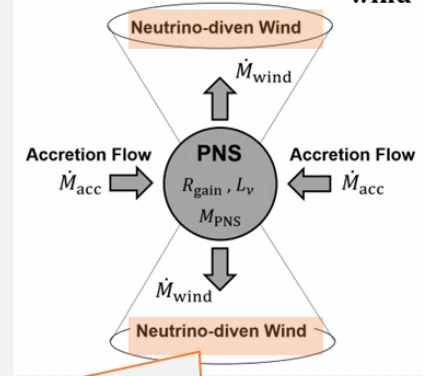
① PNSへの降着流はfree-fallを仮定



② 降着流をニュートリノ/PNS情報に変換



③ 球対称定常風解から M_wind を導出



ニュートリノ光度
= $\eta \times$ (降着流の重力解放エネルギー)

$$L_{\nu_e} \approx L_{\nu,acc} = \eta \frac{GM_{PNS}\dot{M}_{acc}}{R_{PNS}}, \quad (12)$$

Windの初期半径 (gain半径) : 第一原理計算の近似式

$$R_{gain} \approx 40 \text{ km} \left(\frac{\dot{M}_{acc}}{0.1 M_{\odot} s^{-1}} \right)^{1/3} \left(\frac{M_{PNS}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{-1}. \quad (11)$$

3パラメータ ($L_{\nu}, R_{gain}, M_{PNS}$) $\Rightarrow \dot{M}_{wind,iso}$ の近似式

$$\dot{M}_{wind,iso} \approx 8.3 \times 10^{-3} M_{\odot} s^{-1} \times \left(\frac{L_{\nu_e}}{10^{52} \text{ erg s}^{-1}} \right)^{7/4} \left(\frac{R_{gain}}{4 \times 10^6 \text{ cm}} \right)^{5/2} \left(\frac{M_{PNS}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{-7/2}. \quad (22)$$

our work

「PNSへの降着流を伴うニュートリノ駆動風」の一貫した物理モデル

$$\dot{M}_{wind} \approx 1.3 \times 10^{-2} M_{\odot} s^{-1} \times f_{\Omega} \left(\frac{(1 - f_{\Omega}) \dot{M}_{acc,iso}}{0.1 M_{\odot} s^{-1}} \right)^2 \left(\frac{M_{PNS,0}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{-5/2}.$$

• wind model w/ accretion flow (23)

ニュートリノ駆動風が0.07Mの56Niを放出できるか？

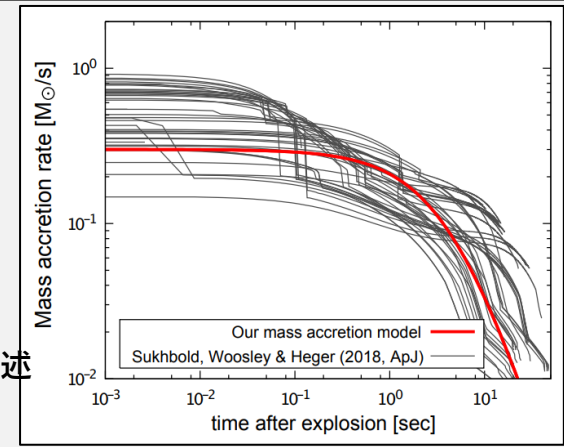
- 無限時間までの放出総量

$$M_{ej,\infty} = \int_0^\infty dt \dot{M}_{wind}$$

$$\approx 4.3 \times 10^{-3} M_\odot s^{-1} f_\Omega (1 - f_\Omega)^2 \left(\frac{\dot{M}_{acc,0}}{0.1 M_\odot s^{-1}} \right)^2 \left(\frac{M_{PNS,0}}{1.4 M_\odot} \right)^{-5/2} \leq 0.067 M_\odot$$

maximum parameter sets

- $M_{PNS,0} \geq 1.4 M_\odot$,
- $\dot{M}_{acc,0} < 1.0 M_\odot s^{-1}$
- Total accretion mass $< 0.7 M_\odot$



親星モデルからの
質量降着が時間発展を記述

- 累積放出量の時間発展

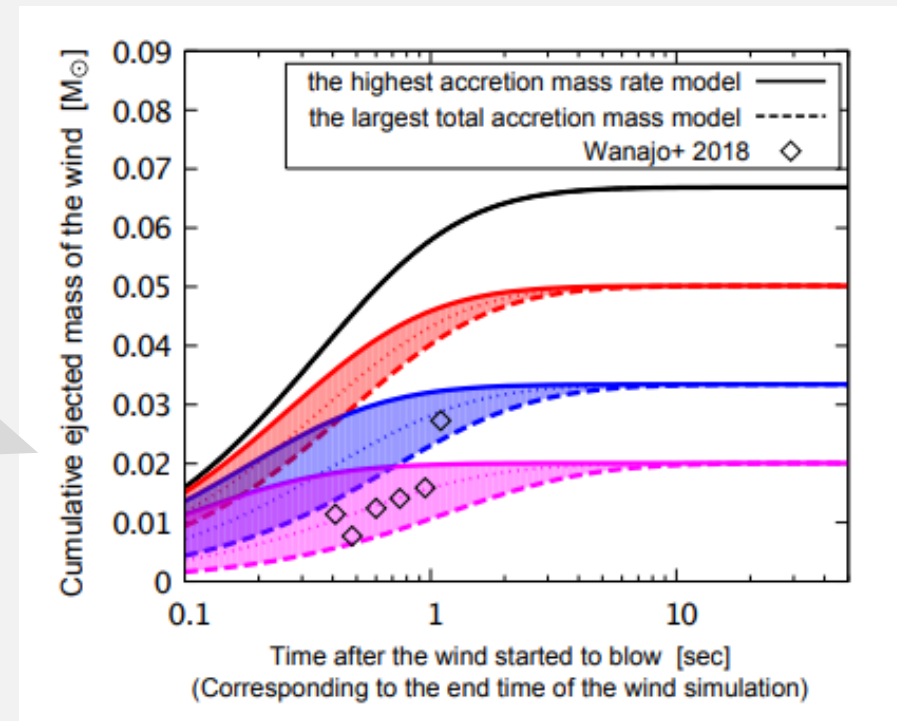
$$M_{ej}(t_e) = \int_0^{t_e} dt \dot{M}_{wind}$$

$$\approx 6.4 \times 10^{-4} M_\odot \left[1 - \left(\frac{t_0}{t_0 + t_e} \right)^3 \right] \times \left(\frac{t_0}{1s} \right) \left(\frac{\dot{M}_{acc,0}}{0.1 M_\odot s^{-1}} \right)^2 \left(\frac{M_{PNS,0}}{1.4 M_\odot} \right)^{-5/2}$$

- 結論

- 爆発開始から約~2秒で、放出しうる56Niの総量が決まる。
- 後期段階 ($t > 1$ 秒) での補填可能な56Ni質量は、高々 $M_{ej} < 0.01 M_\odot$ 程度

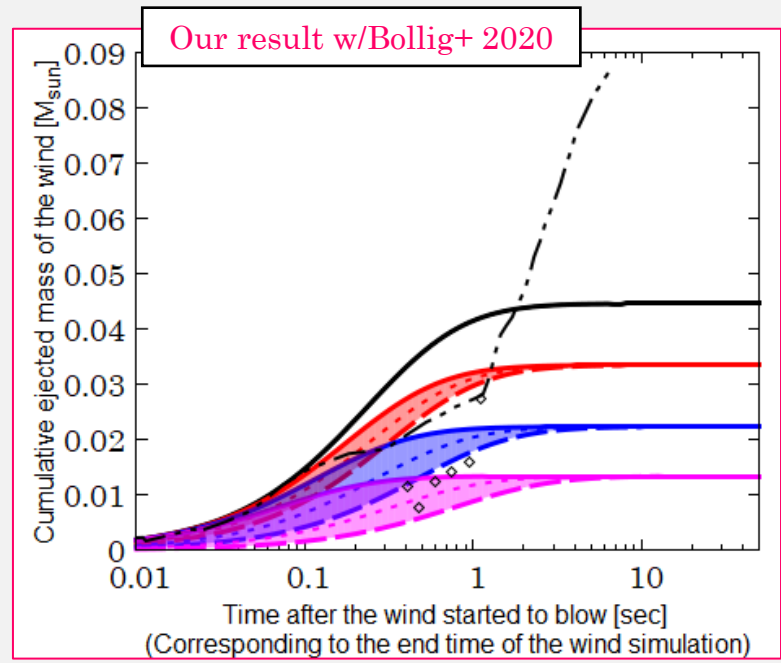
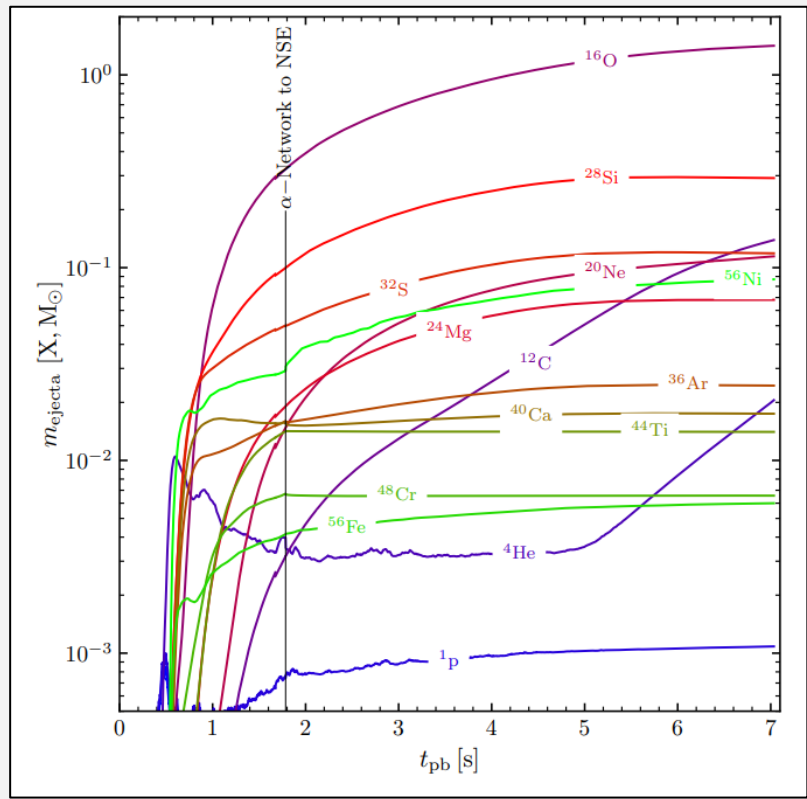
→爆発後期段階 ($t > 1$ 秒) のニュートリノ駆動風によって
「Ni-problem」の解決するのは難しい。



Note : 第一原理計算での⁵⁶Ni生成量

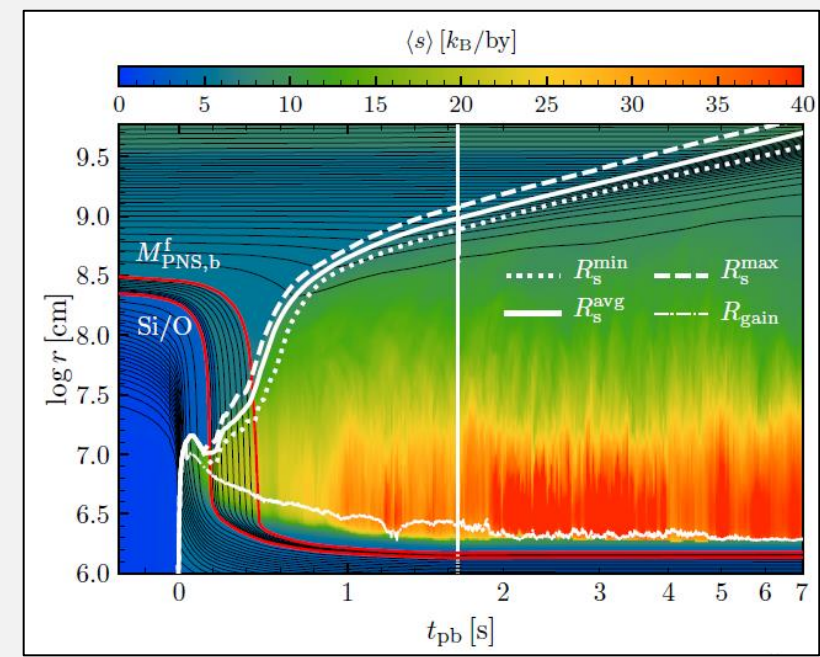
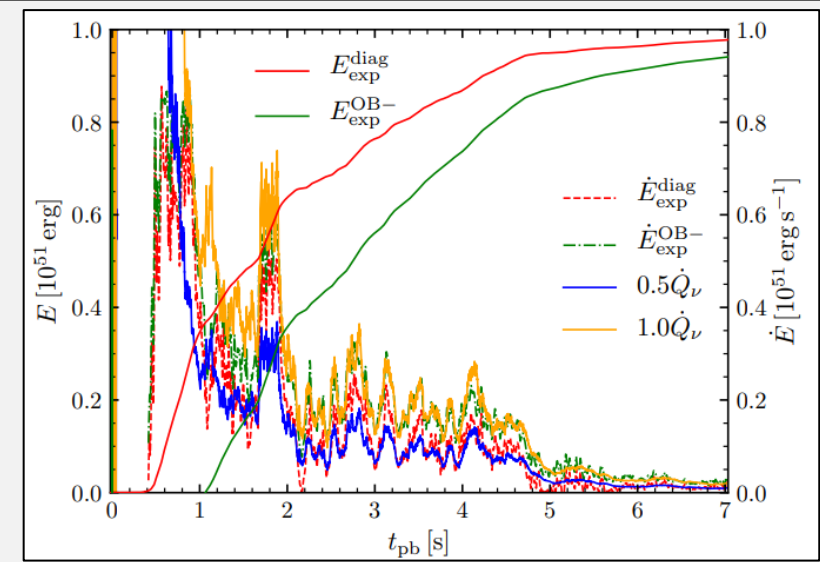
• **NOTE :** R.Bollig+ 2020

“The converged value of the explosion energy at infinity (with overburden subtracted) is roughly 1B and the ejected ⁵⁶Ni mass **up to 0.087** solar masses”
 “Our final ⁵⁶Ni mass is therefore an upper limit, and we expect the actual mass to be around **0.05 M**.
 Nevertheless, it demonstrates that ⁵⁶Ni masses in the ballpark of those of typical CCSNe can be ejected in 3D neutrino-driven explosions.”



Our work

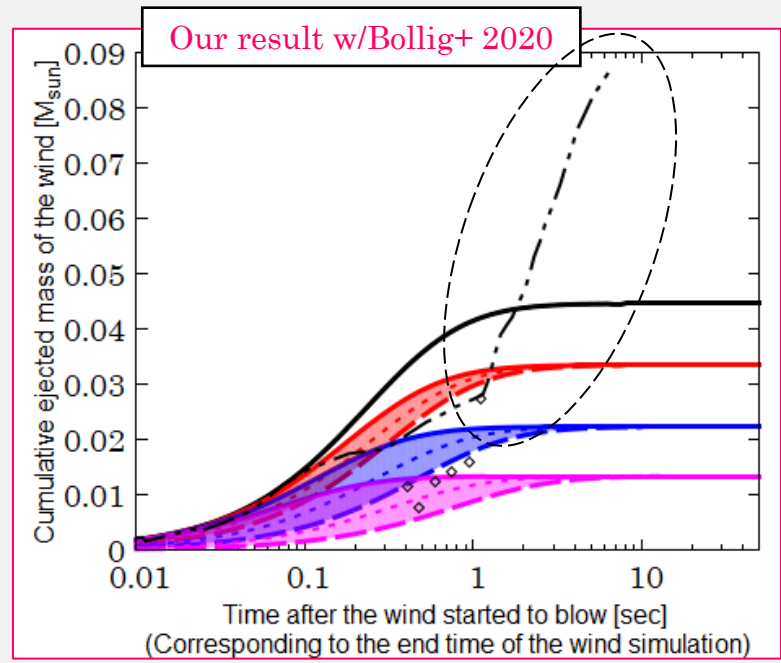
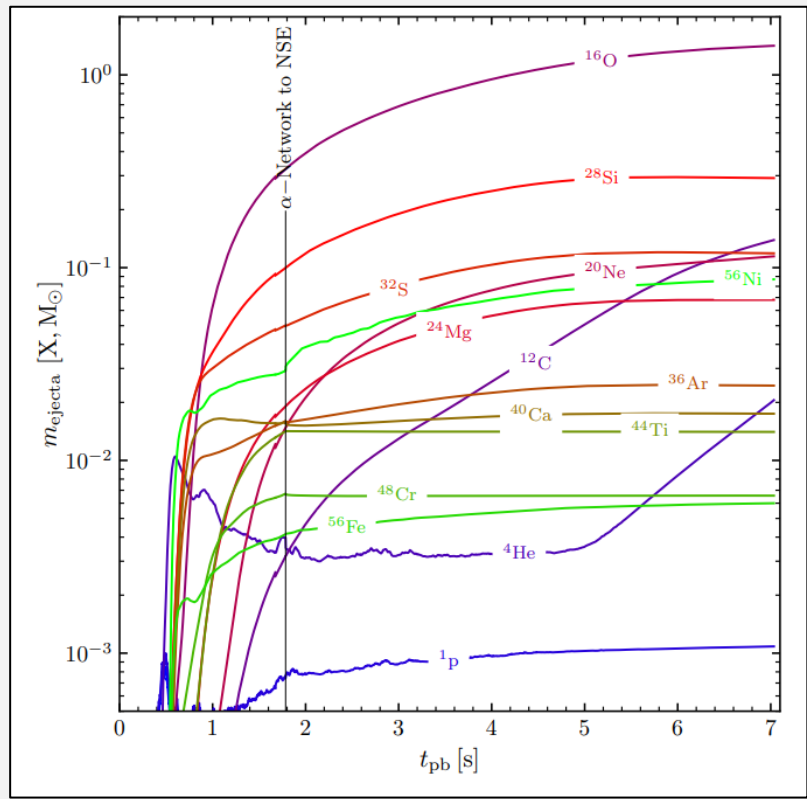
$$L_{\nu_e} \approx L_{\nu,acc} = \eta \frac{GM_{PNS} \dot{M}_{acc}}{R_{PNS}}, \quad (12)$$



Note : 第一原理計算での56Ni生成量

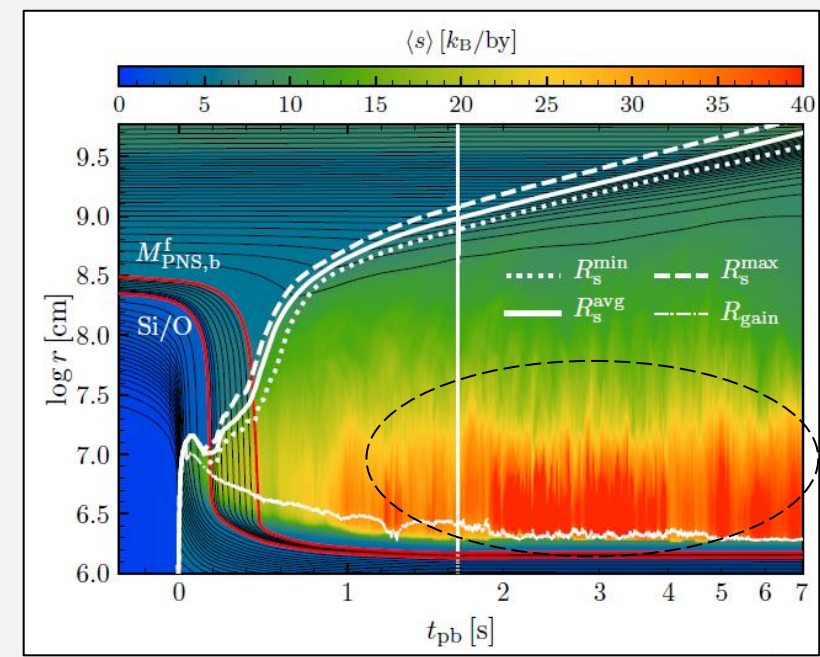
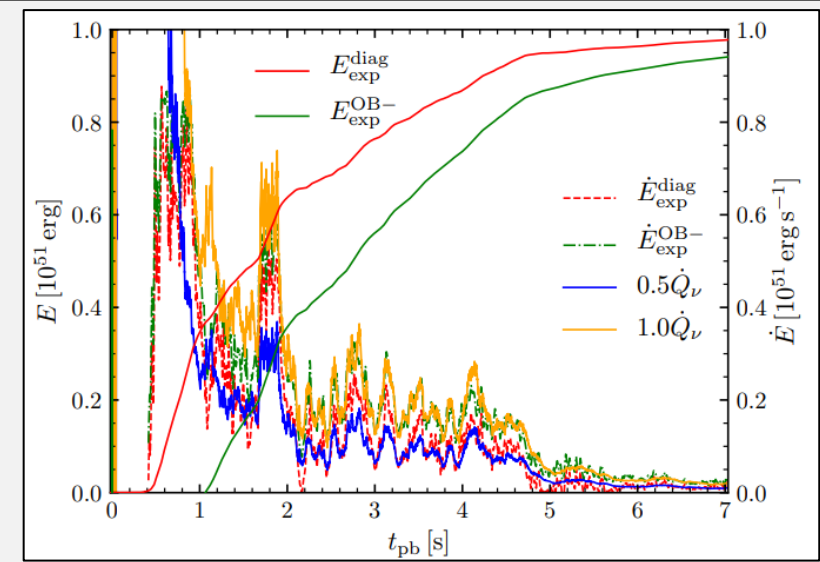
• **NOTE :** R.Bollig+ 2020

“The converged value of the explosion energy at infinity (with overburden subtracted) is roughly 1B and the ejected 56Ni mass **up to 0.087** solar masses”
 “Our final 56Ni mass is therefore an upper limit, and we expect the actual mass to be around **0.05 M**.
 Nevertheless, it demonstrates that 56Ni masses in the ballpark of those of typical CCSNe can be ejected in 3D neutrino-driven explosions.”



Our work

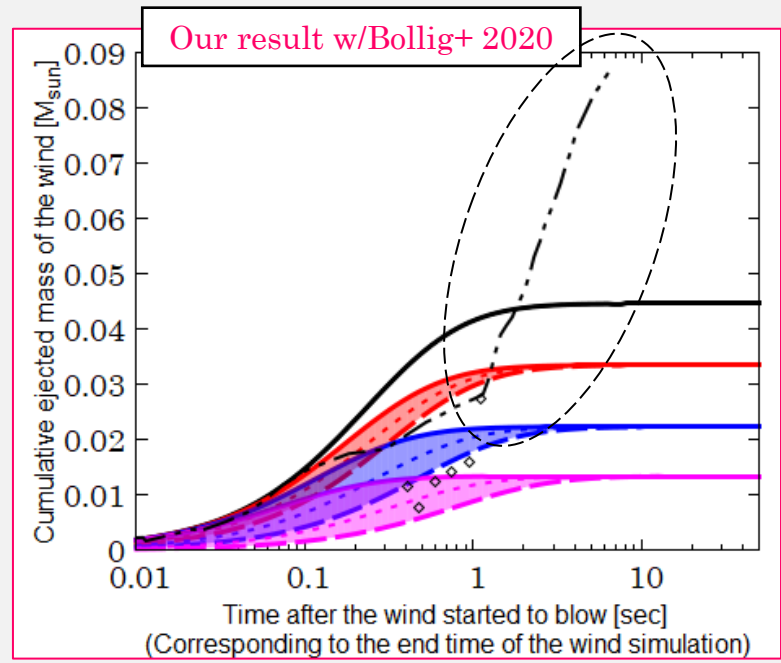
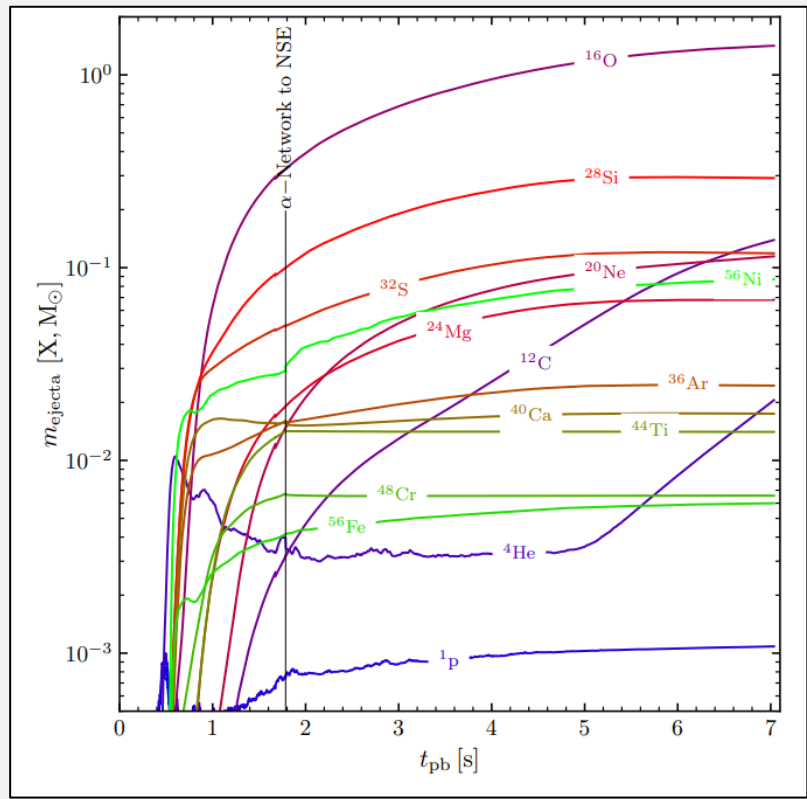
$$L_{\nu_e} \approx L_{\nu,acc} = \eta \frac{GM_{PNS} \dot{M}_{acc}}{R_{PNS}}, \quad (12)$$



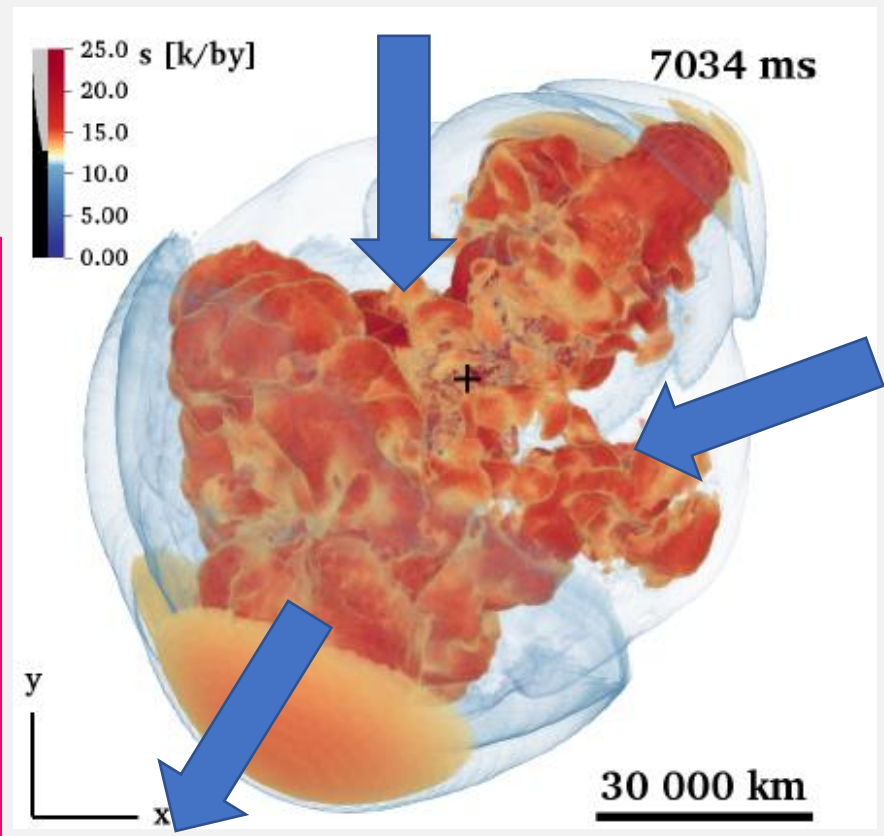
Note : 第一原理計算での⁵⁶Ni生成量

• **NOTE :** R.Bollig+ 2020

“The converged value of the explosion energy at infinity (with overburden subtracted) is roughly 1B and the ejected ⁵⁶Ni mass **up to 0.087** solar masses”
 “Our final ⁵⁶Ni mass is therefore an upper limit, and we expect the actual mass to be around **0.05 M**.
 Nevertheless, it demonstrates that ⁵⁶Ni masses in the ballpark of those of typical CCSNe can be ejected in 3D neutrino-driven explosions.”



$$L_{\nu_e} \approx L_{\nu,acc} = \eta \frac{GM_{PNS} \dot{M}_{acc}}{R_{PNS}}, \quad (12)$$



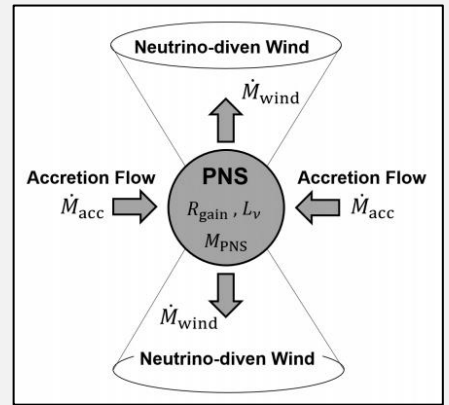
“downflow–outflow” system would produce smooth transition from the incoming flow to the outgoing flow??

Summary

1. 「PNSへの降着流を伴うニュートリノ駆動風」の一貫した物理モデルについて：

• spherical wind

$$\dot{M}_{wind,iso} \approx 8.3 \times 10^{-3} M_{\odot} s^{-1} \times \left(\frac{L_{\nu_e}}{10^{52} \text{erg s}^{-1}} \right)^{7/4} \left(\frac{R_{gain}}{4 \times 10^6 \text{cm}} \right)^{5/2} \left(\frac{M_{PNS}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{-7/2} \quad (22)$$



• wind model w/ accretion flow

$$\dot{M}_{wind} \approx 1.3 \times 10^{-2} M_{\odot} s^{-1} \times f_{\Omega} \left(\frac{(1 - f_{\Omega}) \dot{M}_{acc,iso}}{0.1 M_{\odot} s^{-1}} \right)^2 \left(\frac{M_{PNS,0}}{1.4 M_{\odot}} \right)^{-5/2} \quad (23)$$

2. 「PNSへの降着流を伴うニュートリノ駆動風」がNi-problemを解決する可能性について：

1. 爆発開始から約~ 2秒で、放出しうる⁵⁶Niの総量が決まる。
2. 後期段階 ($t > 1$ 秒) での補填可能な⁵⁶Ni質量は、高々 $M_{ej} < 0.01 M_{\odot}$ 程度

→爆発後期段階 ($t > 1$ 秒) のニュートリノ駆動風によって
「Ni-problem」の解決するのは難しい。

