

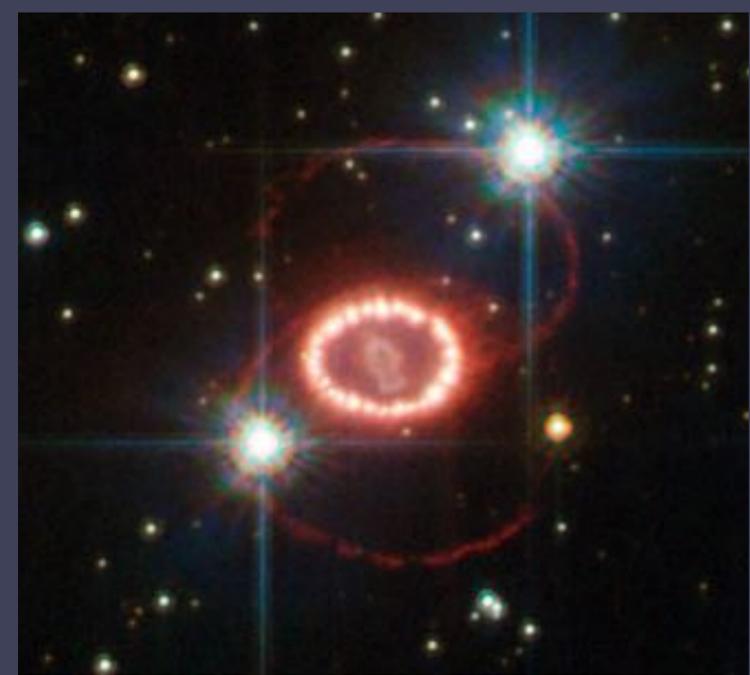
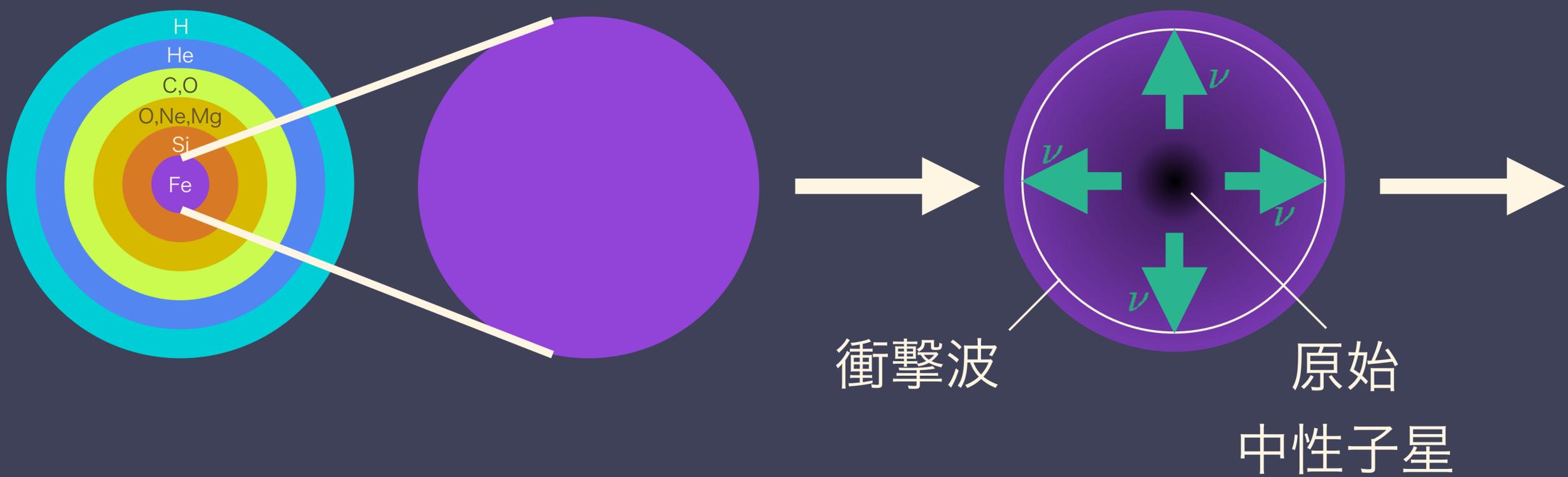
ボルツマン輻射流体シミュレーションで探る 超新星爆発での核物質状態方程式の役割

原田了 (理研 iTHEMS)

共同研究者: 長倉洋樹(Princeton)、岩上わかな、大川博督、山田章一(早稲田大)、
古澤峻(関東学院大)、松古栄夫(KEK)、住吉光介(沼津高専)

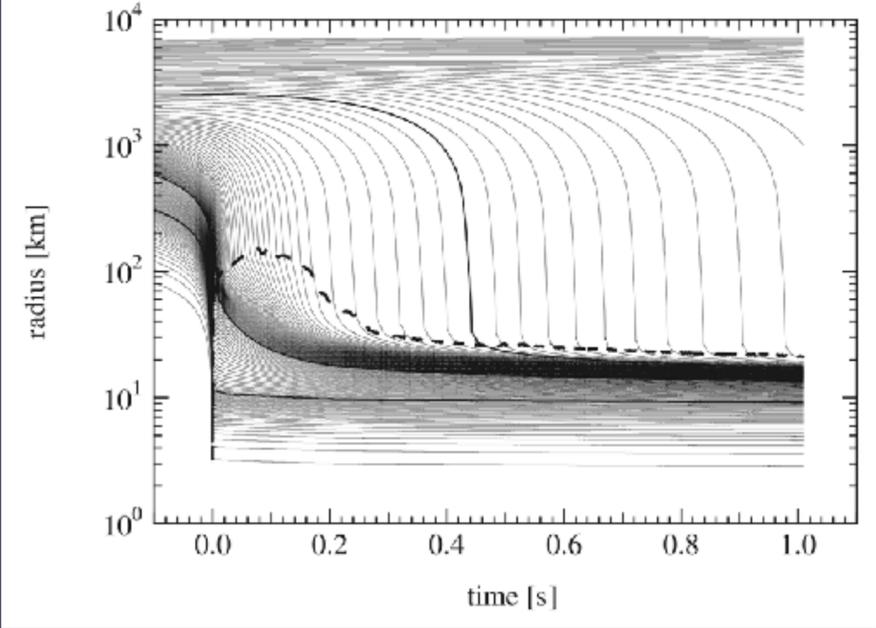
超新星爆発メカニズム

- ・ 重力崩壊→コアバウンス→衝撃波停滞
- ・ 中心の原始中性子星からのニュートリノ放射
- ・ 衝撃波がニュートリノ加熱によって復活→ニュートリノ加熱メカニズム

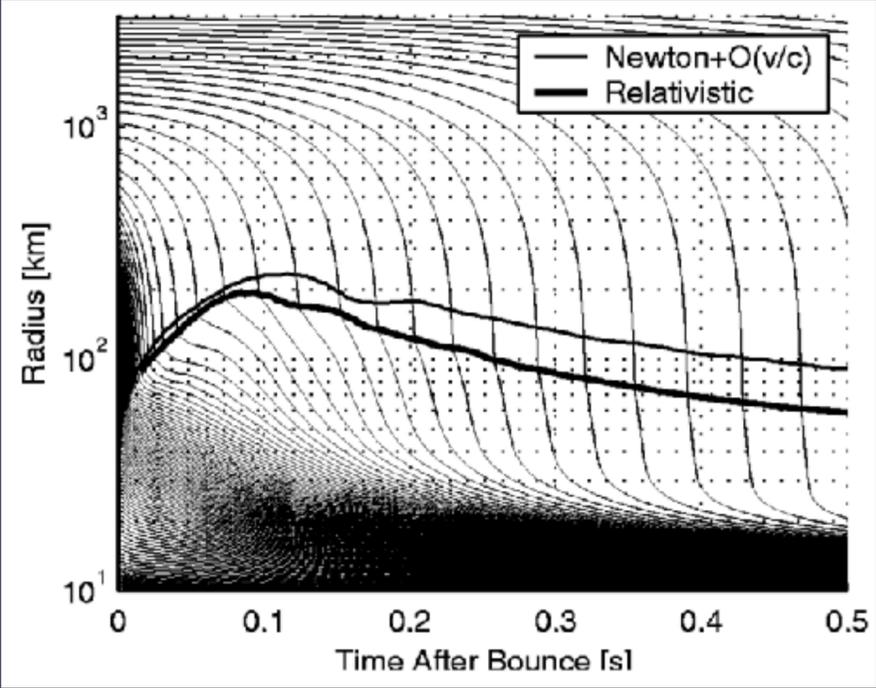


SN1987A

超新星シミュレーション



Sumiyoshi+ (2005)

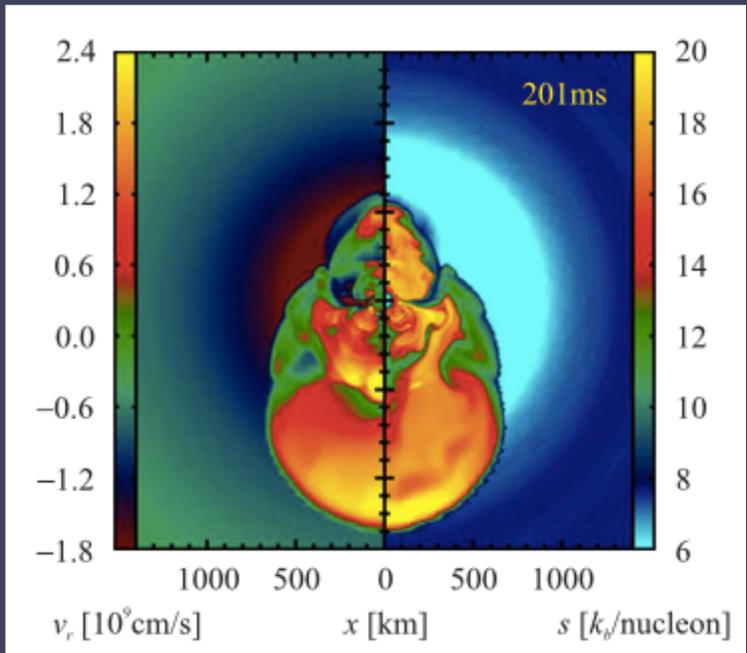


Liebendoerfer+ (2001)

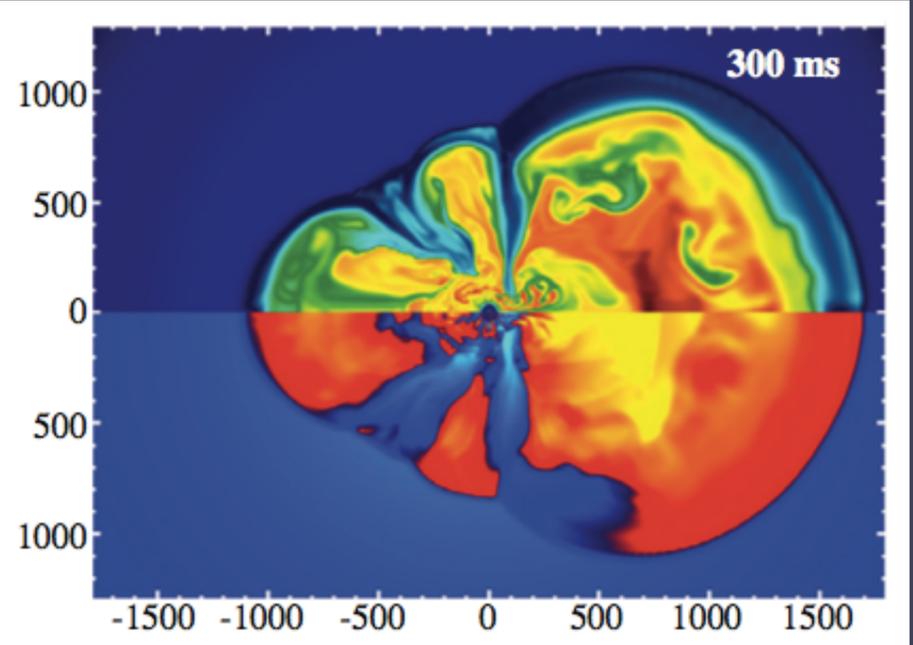
- ・ 1次元球対称シミュレーションではどんなに頑張っても爆発しない

超新星シミュレーション

2D

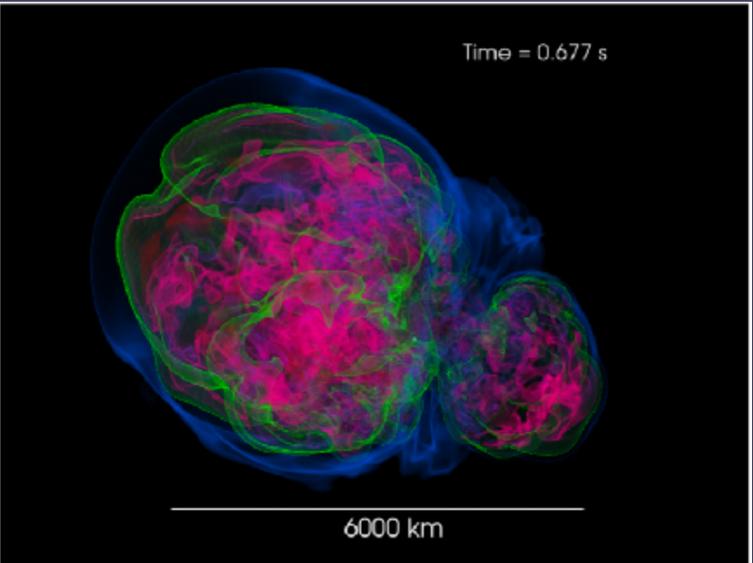


MPA (Mueller+ 2012)

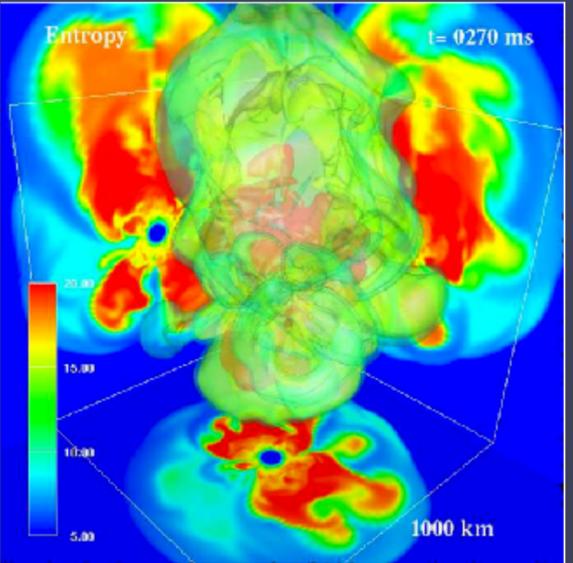


Oak Ridge (Bruenn+ 2013)

3D



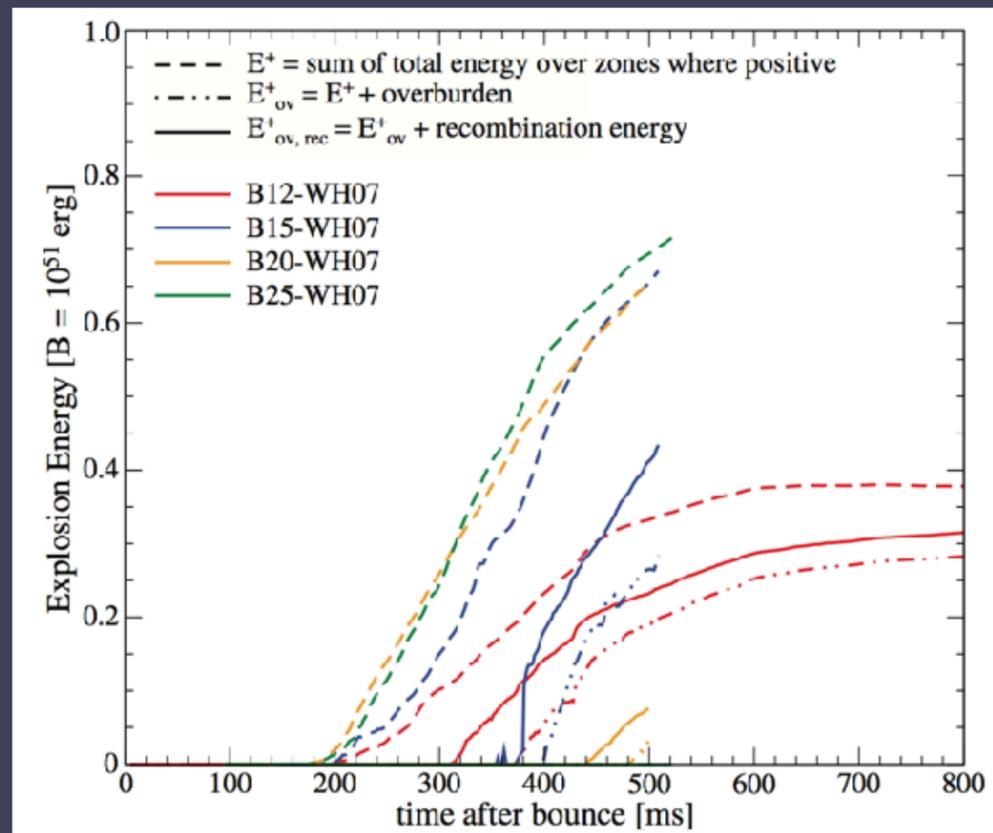
Princeton (Vartanyan+ 2019)



Fukuoka (Takiwaki+ 2014)

- ・ 1次元球対称シミュレーションではどんなに頑張っても爆発しない
- ・ 多次元シミュレーションだと乱流の助けによって爆発する

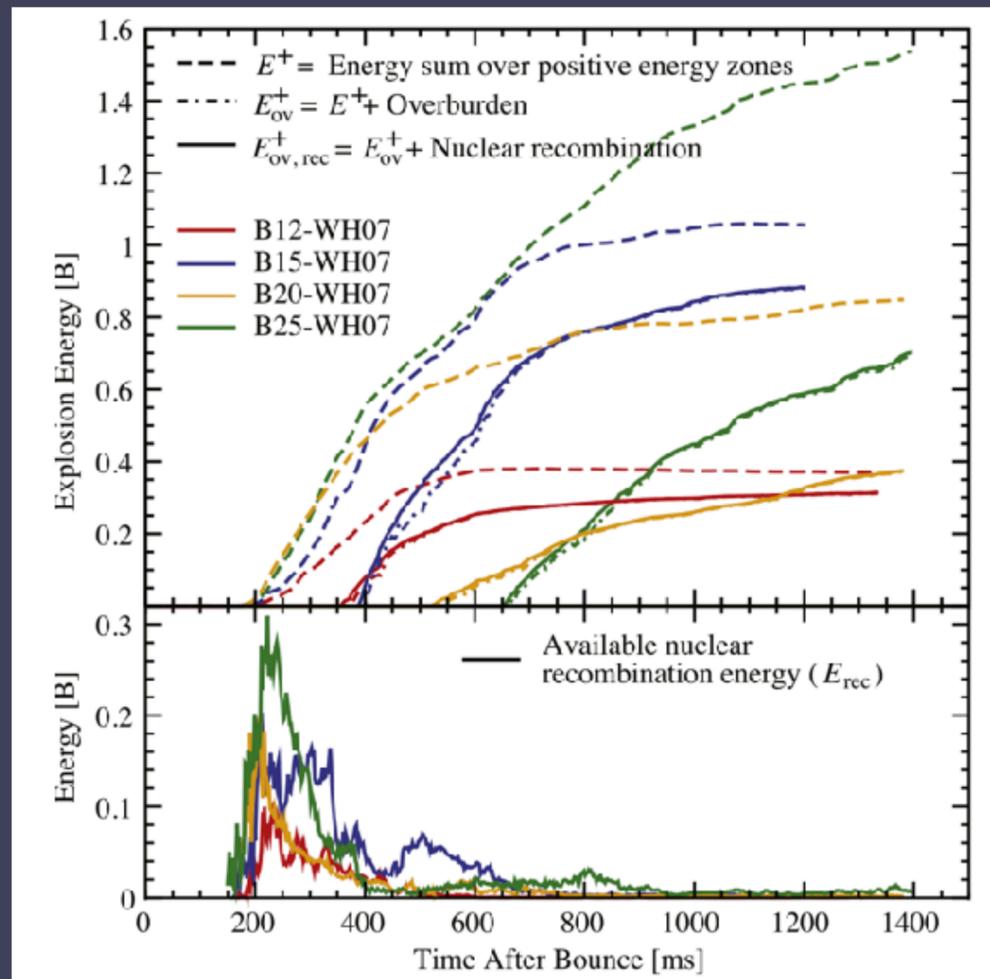
現状の問題点



Bruenn+ (2013)

- ・ 計算手法によって結果が変わる
- ・ 爆発エネルギーが足りない
 - 観測的には爆発エネルギーは $\sim 10^{51}$ erg
 - シミュレーションでは $\sim 10^{50}$ erg
- ・ 長時間計算で爆発エネルギーを増やそうとすると、Niが作れない
- ・ 爆発エネルギー・Ni両方再現したという主張もあるが、人為的な効果によるものの可能性もある

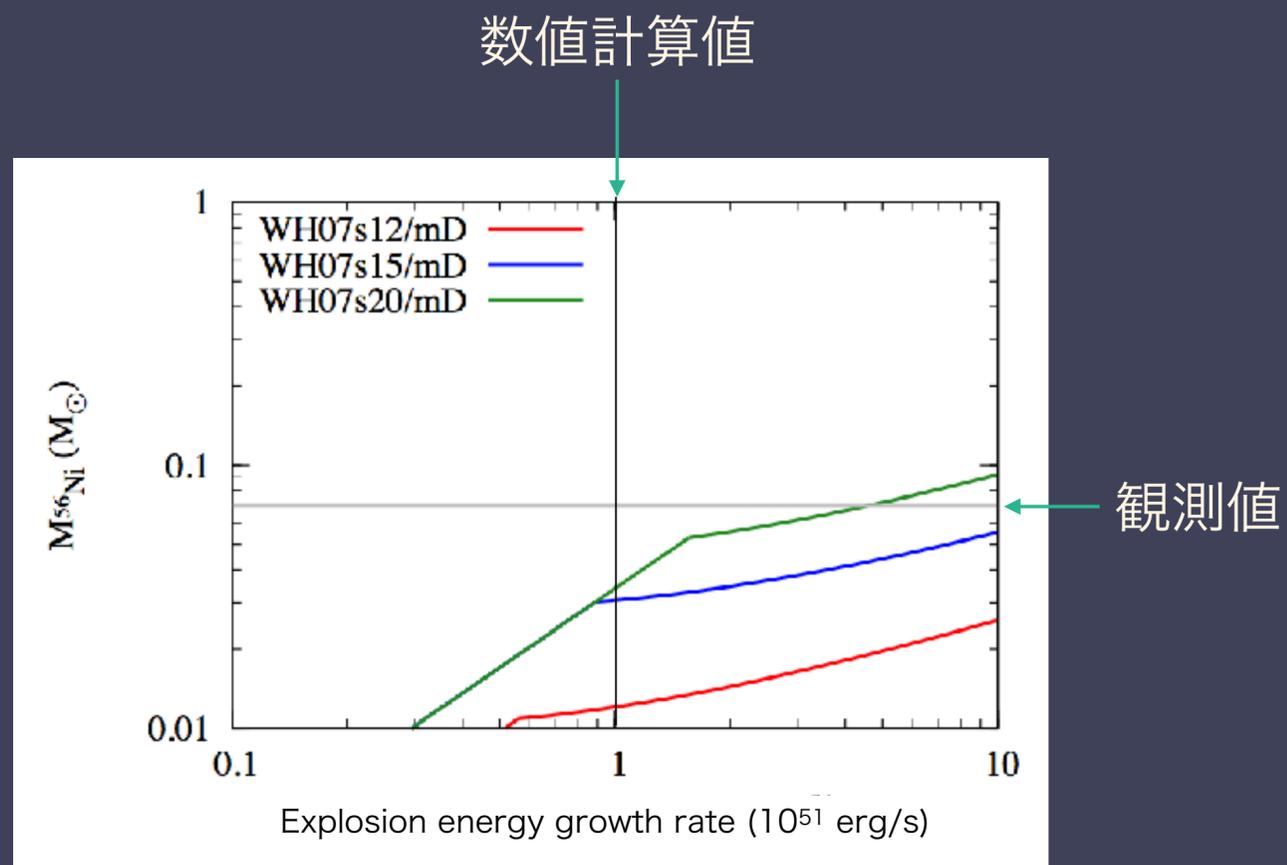
現状の問題点



Bruenn+ (2016)

- ・ 計算手法によって結果が変わる
- ・ 爆発エネルギーが足りない
 - 観測的には爆発エネルギーは $\sim 10^{51}$ erg
 - シミュレーションでは $\sim 10^{50}$ erg
- ・ 長時間計算で爆発エネルギーを増やそうとすると、Niが作れない
- ・ 爆発エネルギー・Ni両方再現したという主張もあるが、人為的な効果によるものの可能性もある

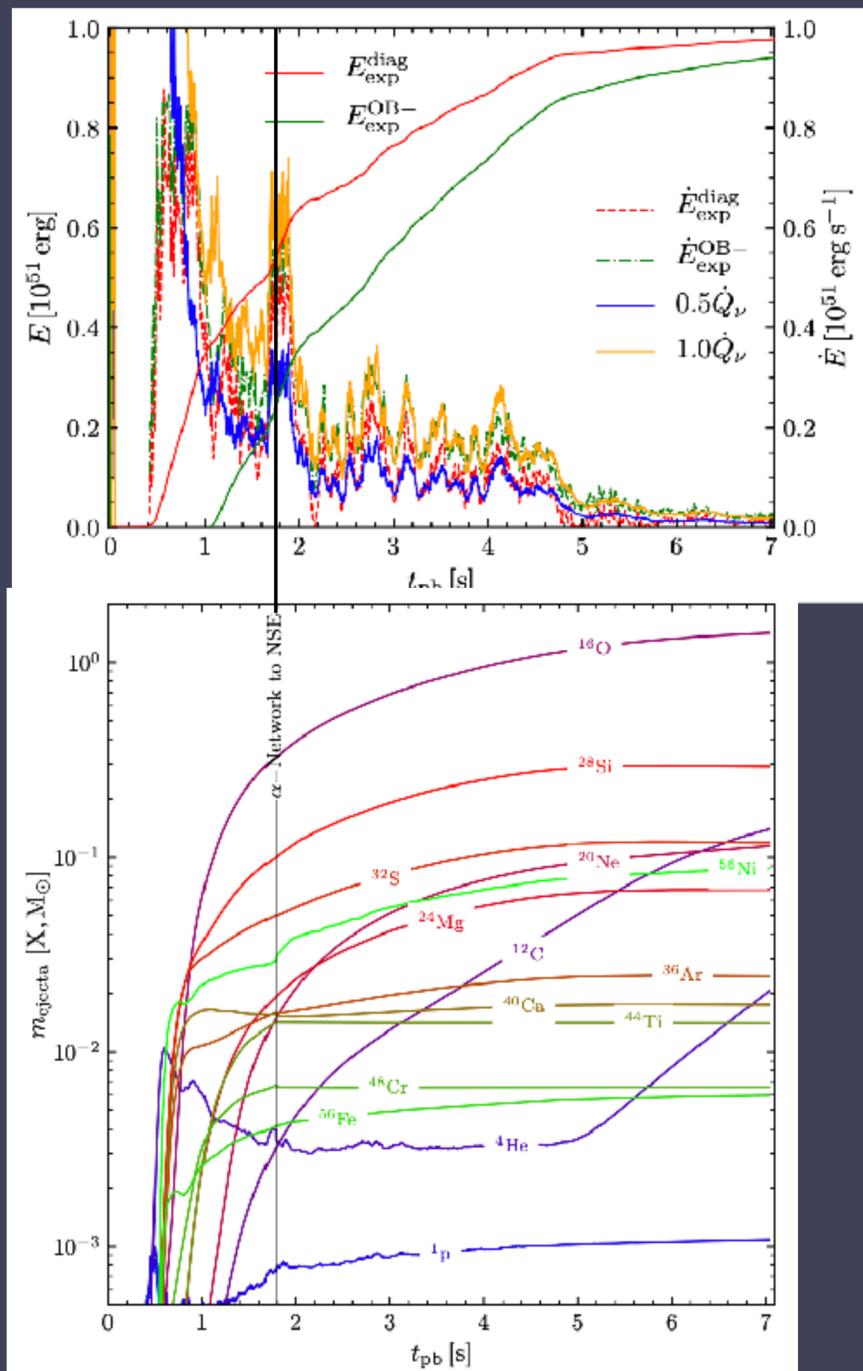
現状の問題点



Suwa+ (2017)

- ・ 計算手法によって結果が変わる
- ・ 爆発エネルギーが足りない
 - 観測的には爆発エネルギーは $\sim 10^{51}$ erg
 - シミュレーションでは $\sim 10^{50}$ erg
- ・ 長時間計算で爆発エネルギーを増やそうとすると、Niが作れない
- ・ 爆発エネルギー・Ni両方再現したという主張もあるが、人為的な効果によるものの可能性もある

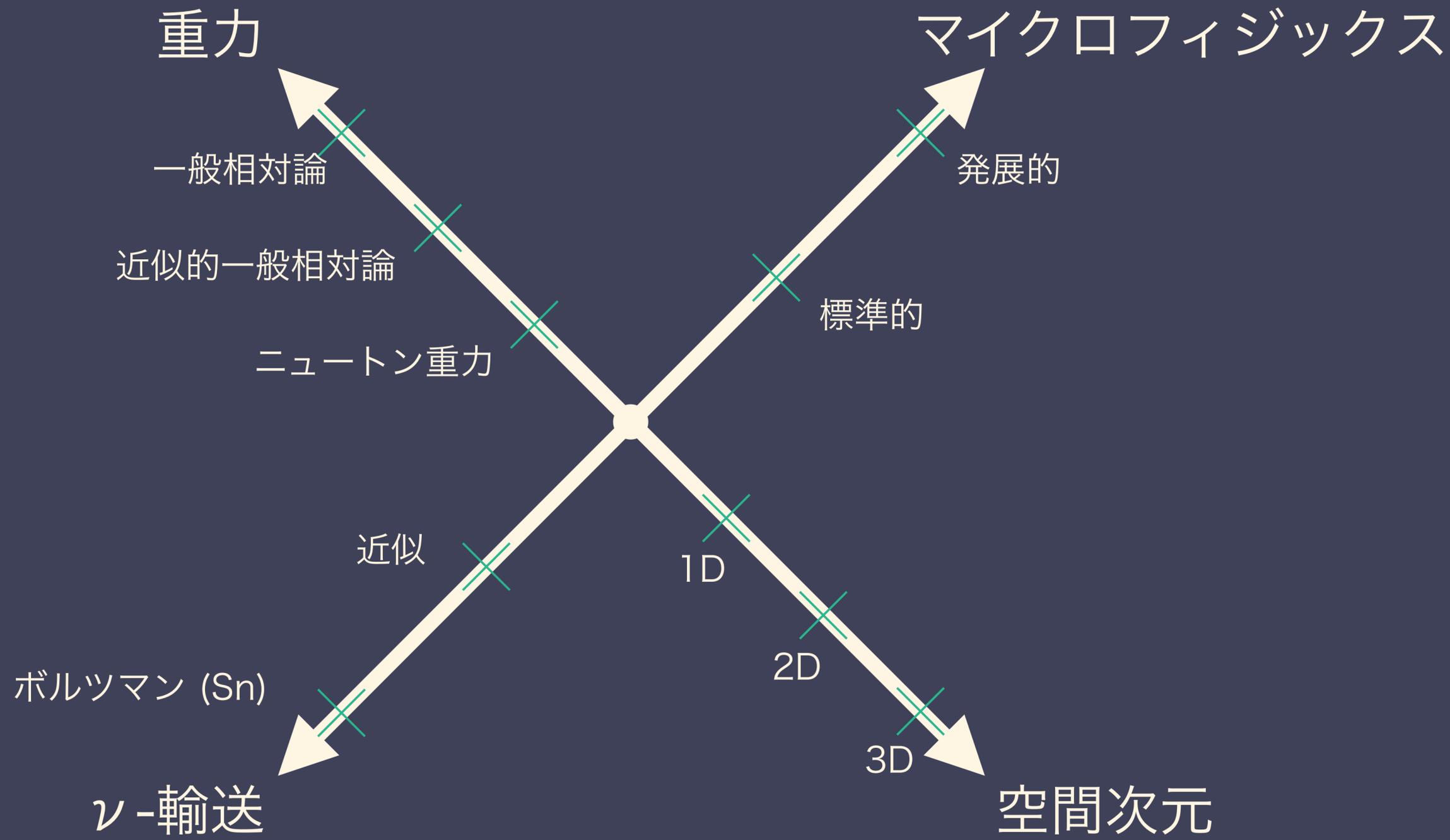
現状の問題点



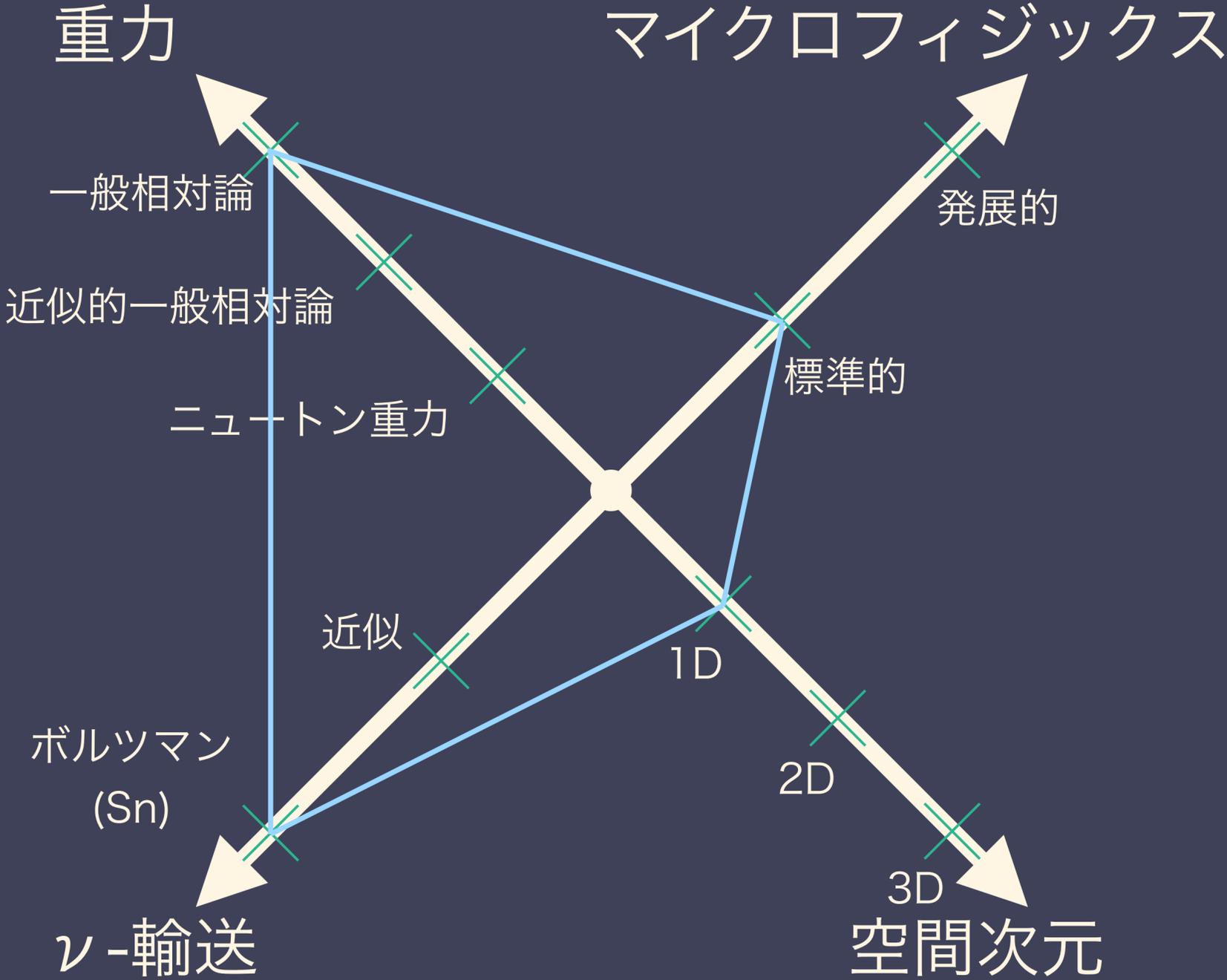
Bollig+ (2020)

- ・ 計算手法によって結果が変わる
- ・ 爆発エネルギーが足りない
 - 観測的には爆発エネルギーは $\sim 10^{51}$ erg
 - シミュレーションでは $\sim 10^{50}$ erg
- ・ 長時間計算で爆発エネルギーを増やそうとすると、Niが作れない
- ・ 爆発エネルギー・Ni両方再現したという主張もあるが、人為的な効果によるものの可能性もある

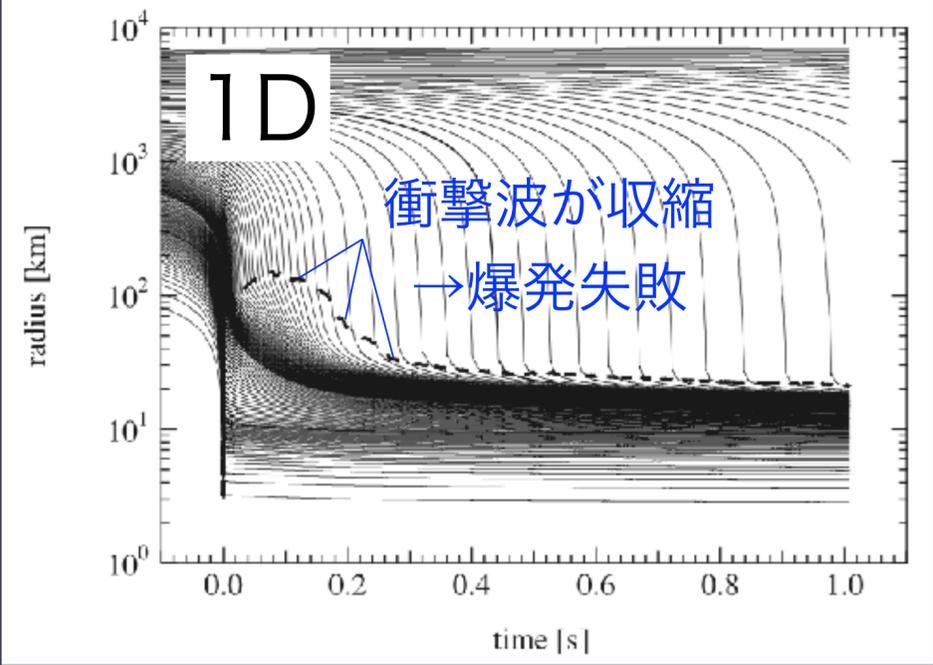
超新星シミュレーションの進展



超新星シミュレーションの進展

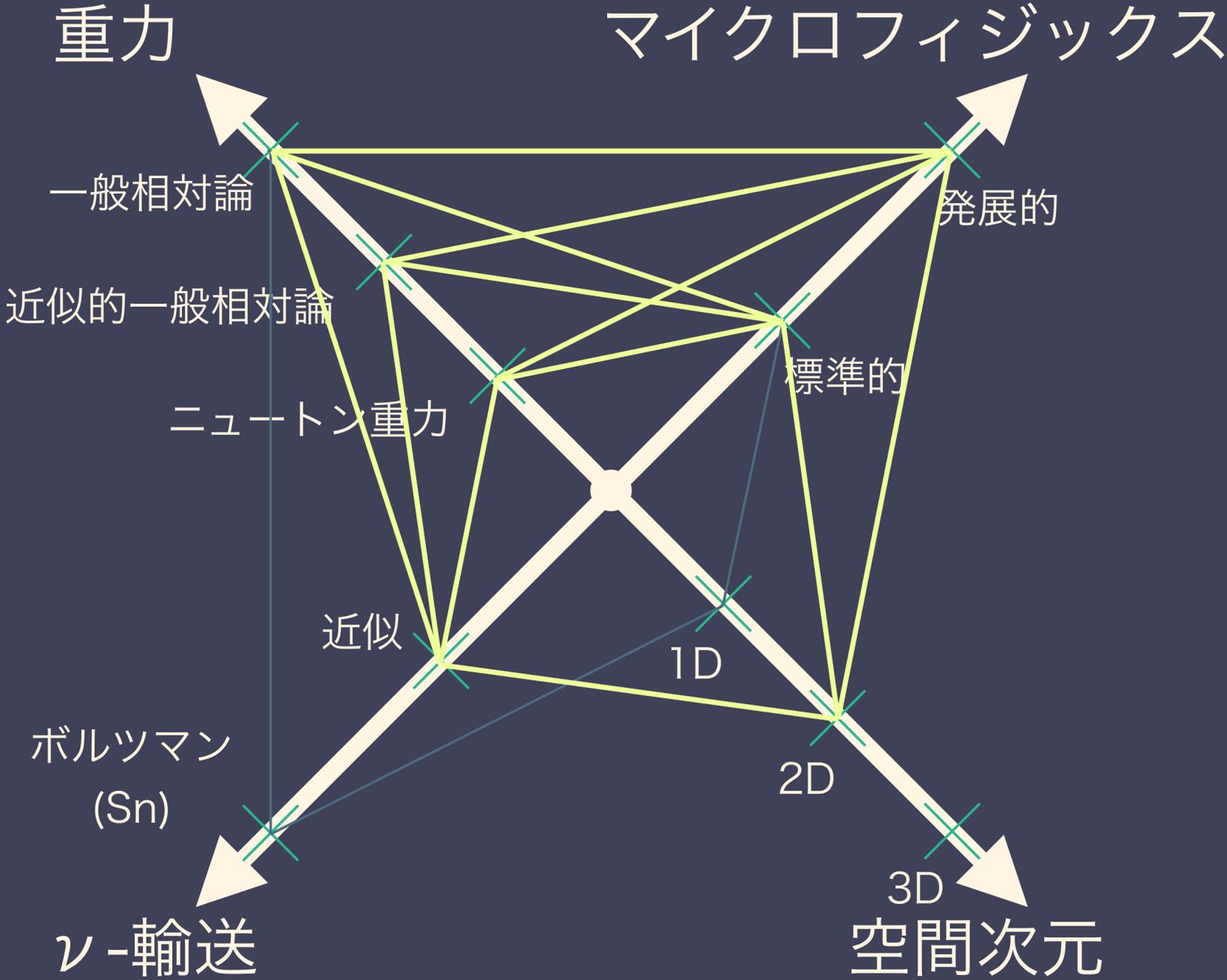


1D: 爆発失敗



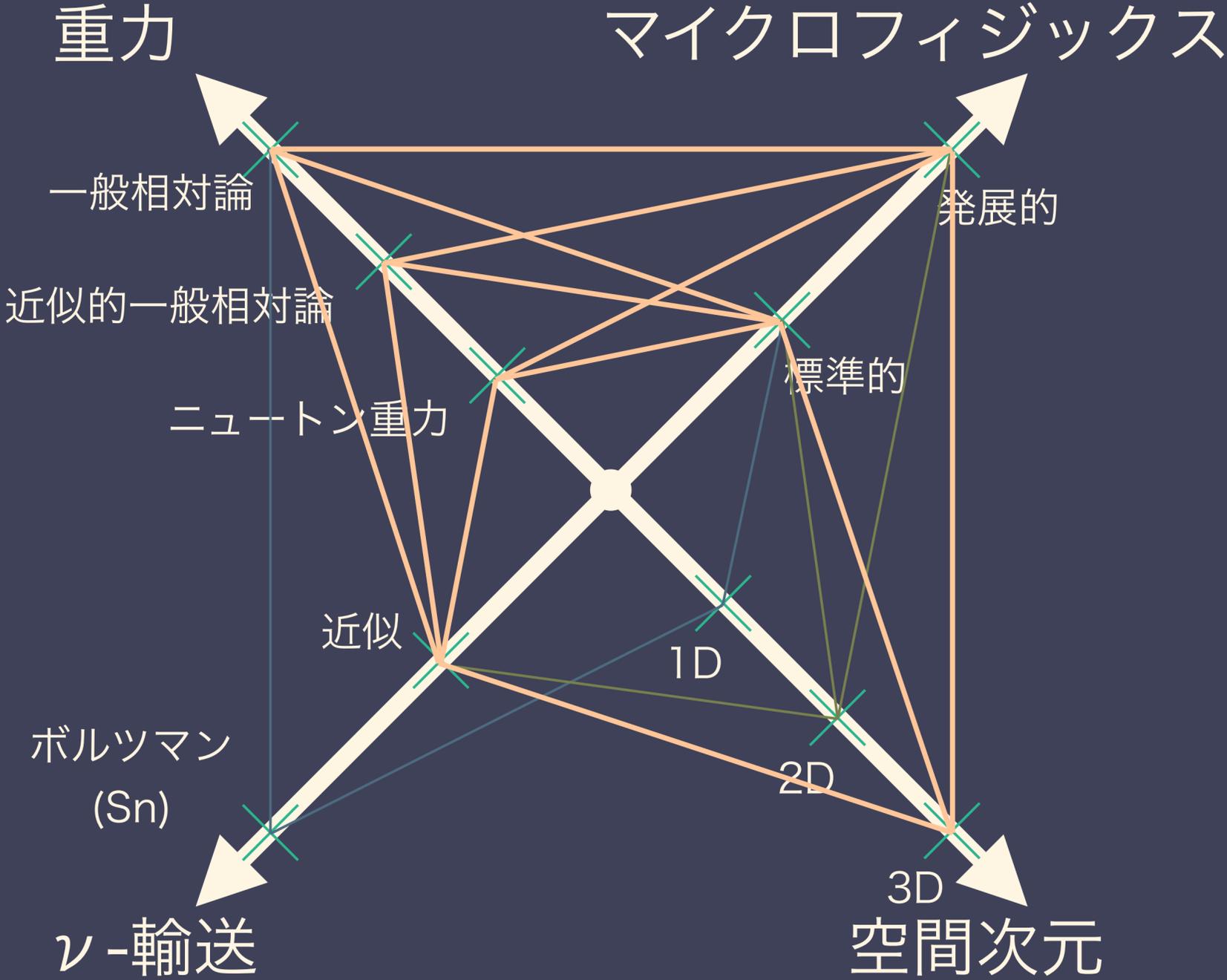
Sumiyoshi+(2005)

超新星シミュレーションの進展



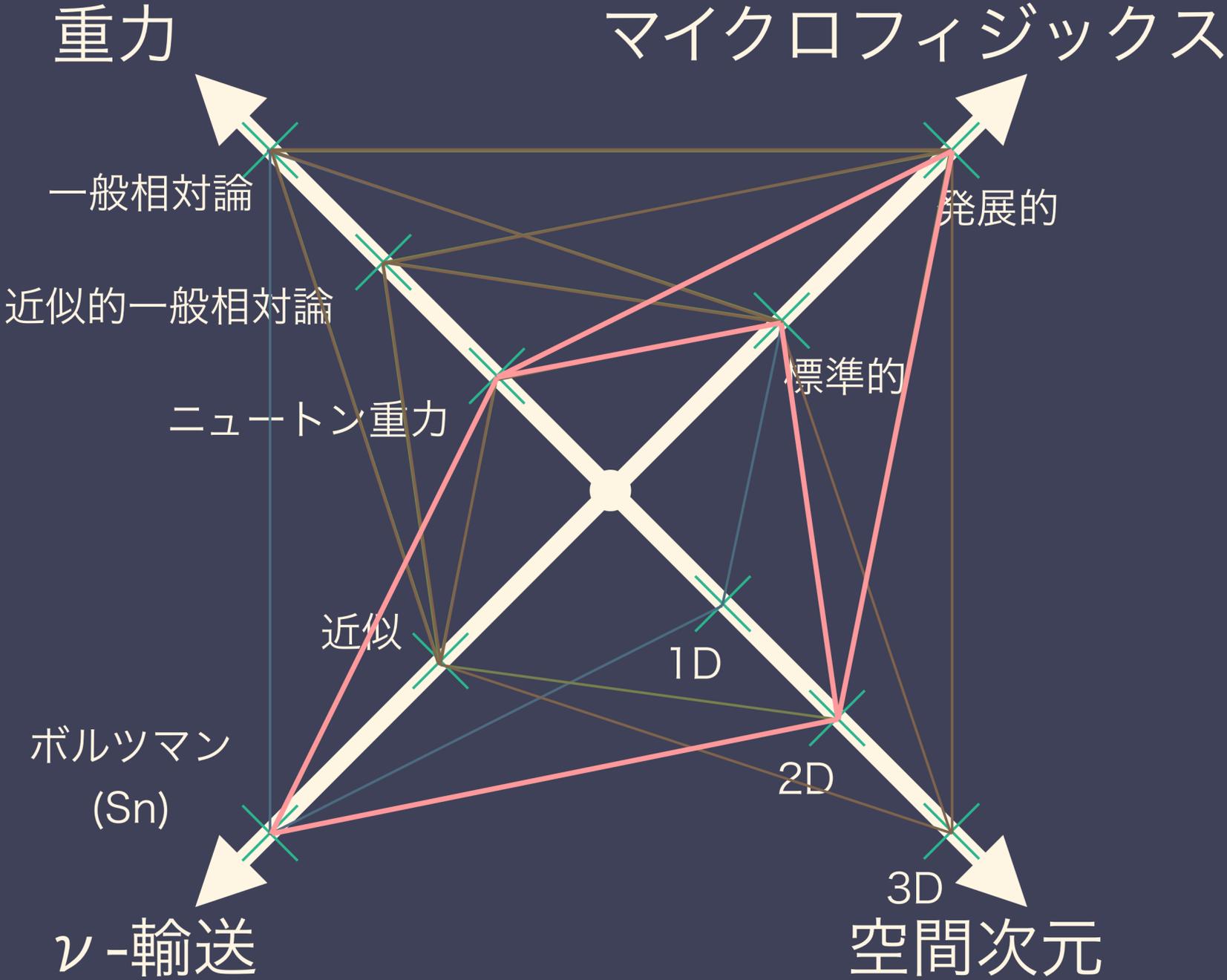
1D: 爆発失敗
2D: 衝撃波復活
エネルギー不十分

超新星シミュレーションの進展



- 1D: 爆発失敗
- 2D: 衝撃波復活
エネルギー不十分
- 3D: 衝撃波復活
エネルギー不十分

超新星シミュレーションの進展



- 1D: 爆発失敗
- 2D: 衝撃波復活
エネルギー不十分
- 3D: 衝撃波復活
エネルギー不十分
- 我々の計算

セットアップ

・11.2 M \odot 親星 (Woosley+ 2002)

・ニュートリノ反応



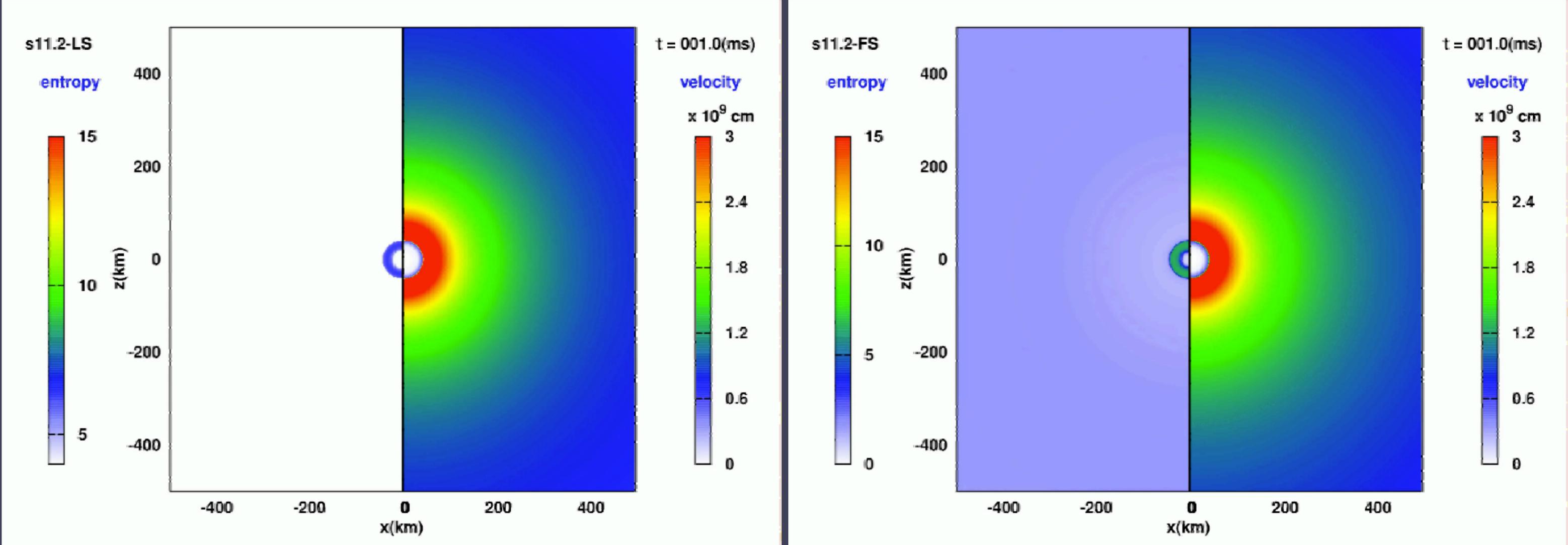
・Lattimer-Swesty (LS) 状態方程式とFurusawa-Shen (FS) 状態方程式

Skym型、SNA

相対論的平均場、核統計平衡

衝撃波の時間発展

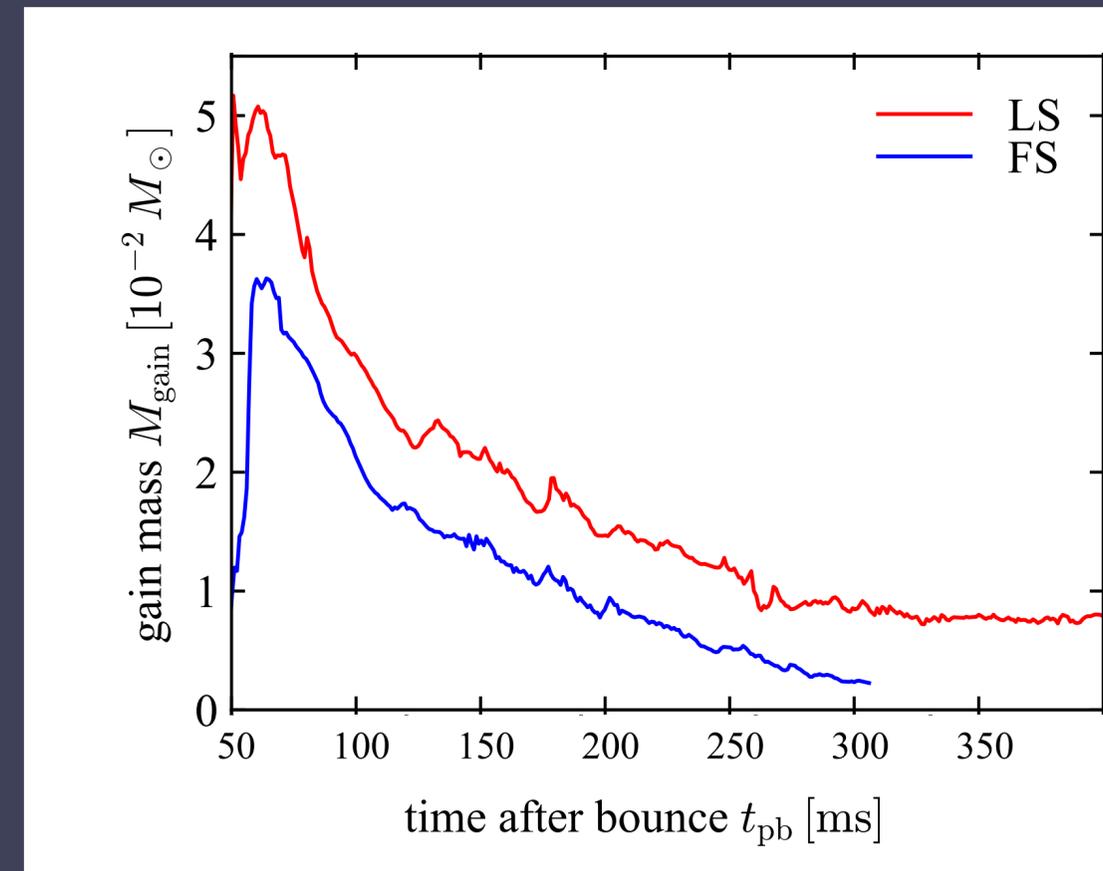
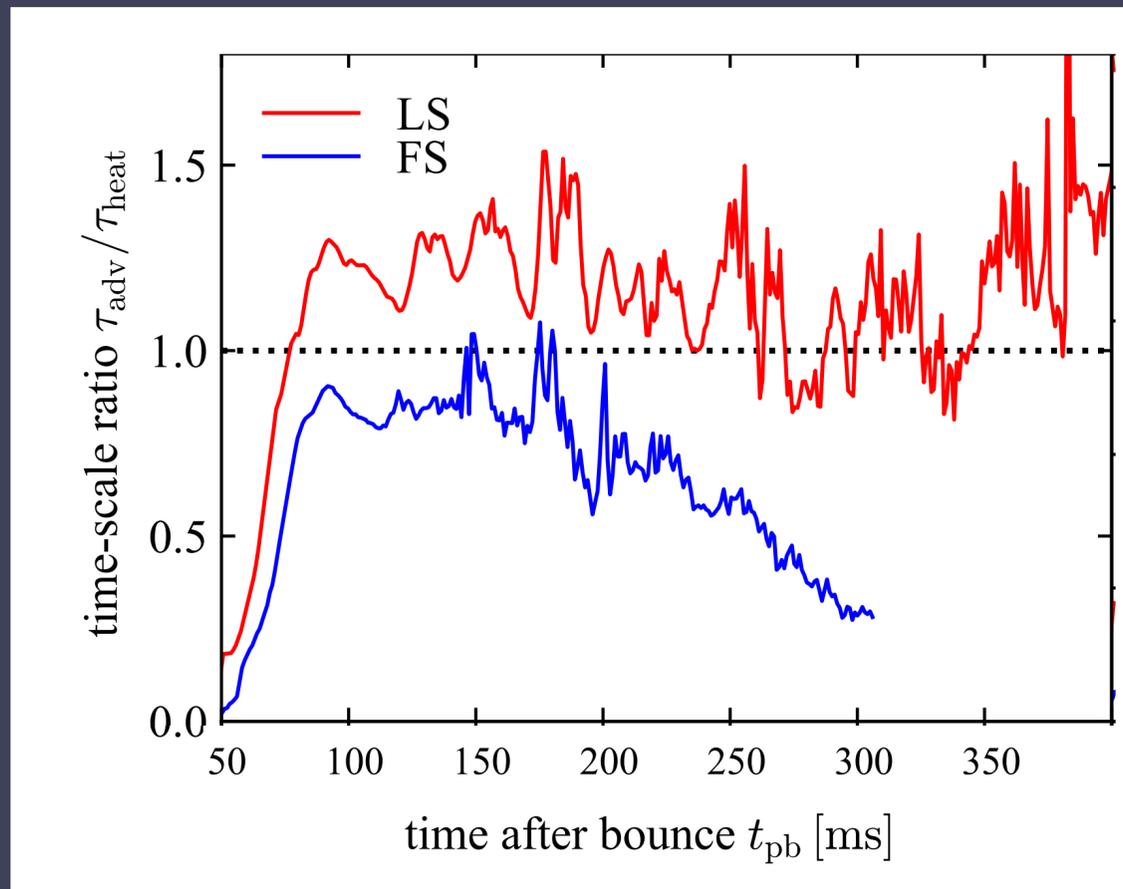
- ・ エントロピーと速度のカラーマップ



Timescale ratio

- ・ 衝撃波はtimescale ratioが1を超えた時に復活する:

$$\tau_{\text{adv}}/\tau_{\text{heat}} \text{ with } \tau_{\text{adv}} = M_{\text{gain}}/\dot{M}, \tau_{\text{heat}} = E_{\text{gain}}/Q_{\text{gain}}$$

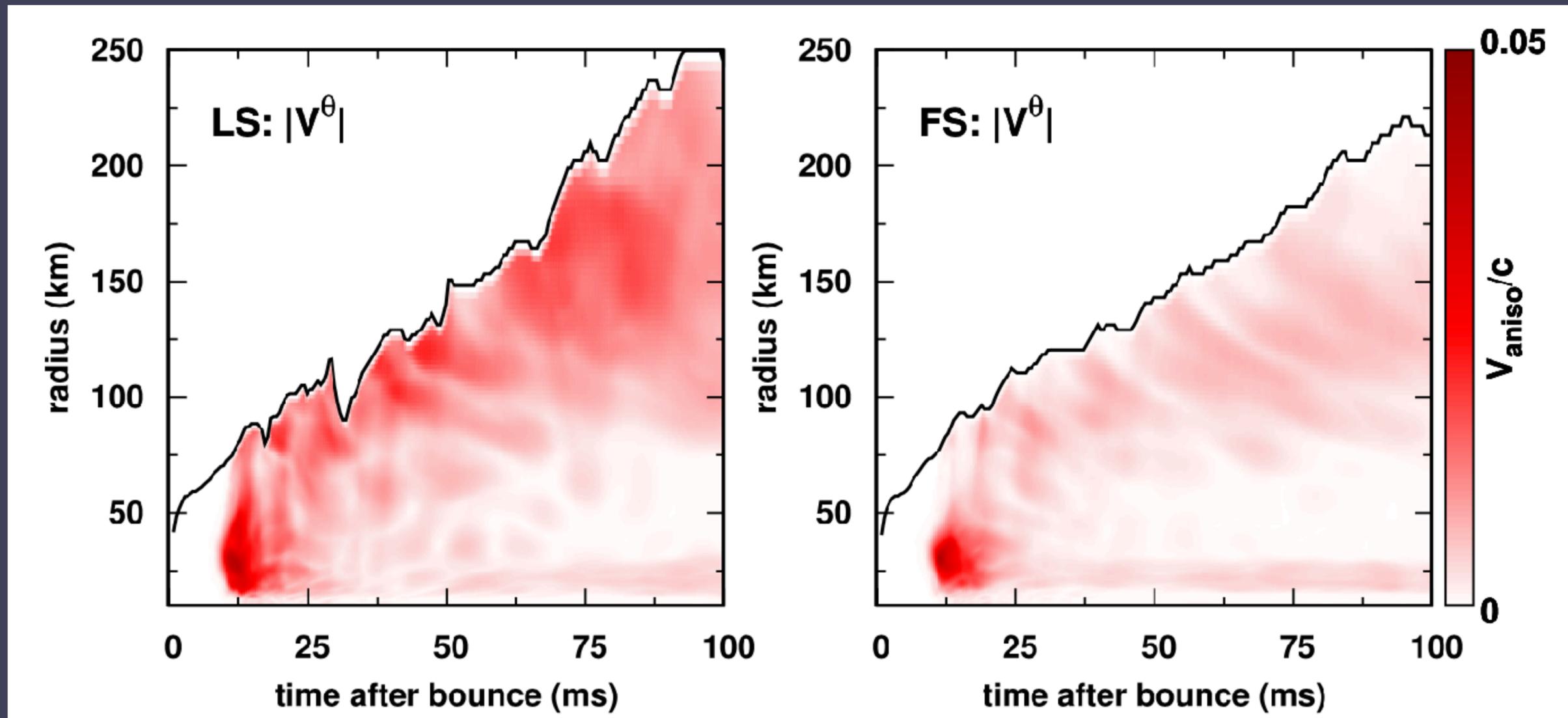


AH+(2020)

- ・ M_{gain} だけが違い、LSのほうが大きい

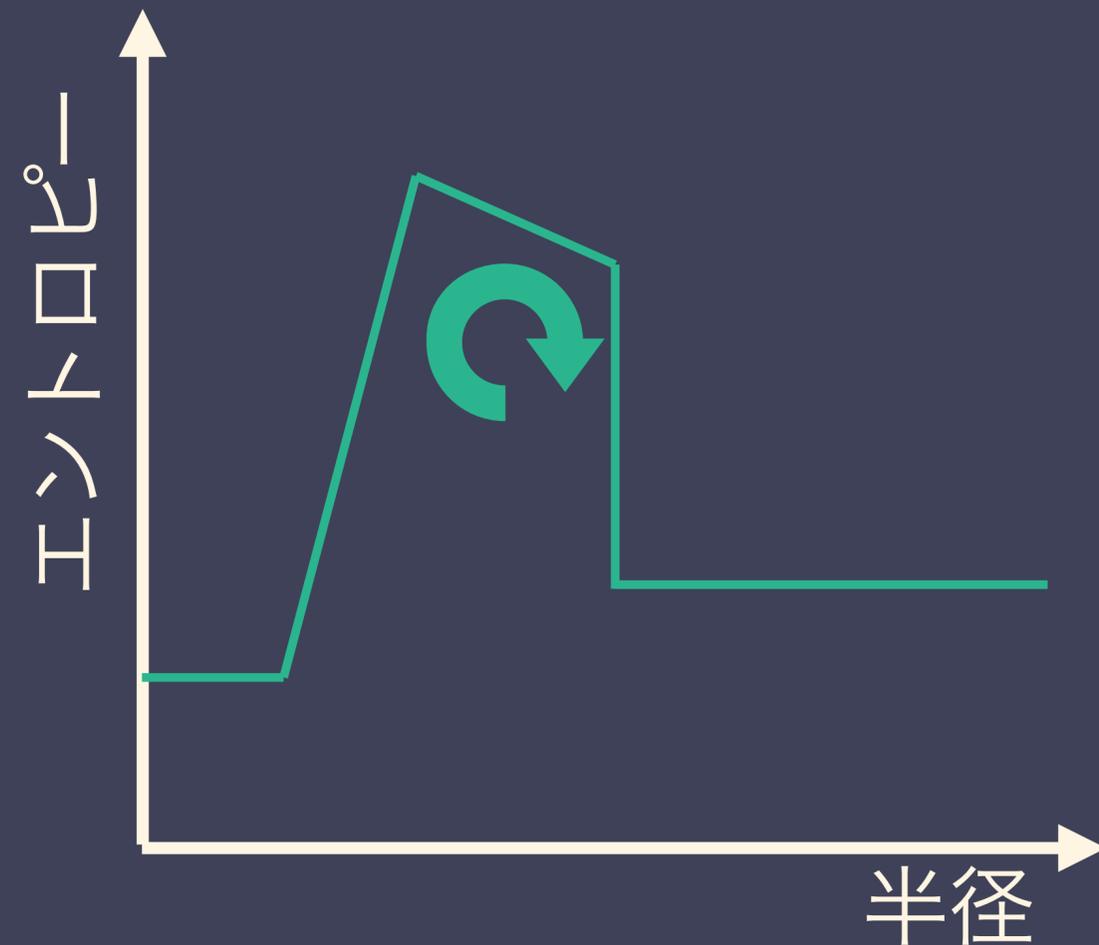
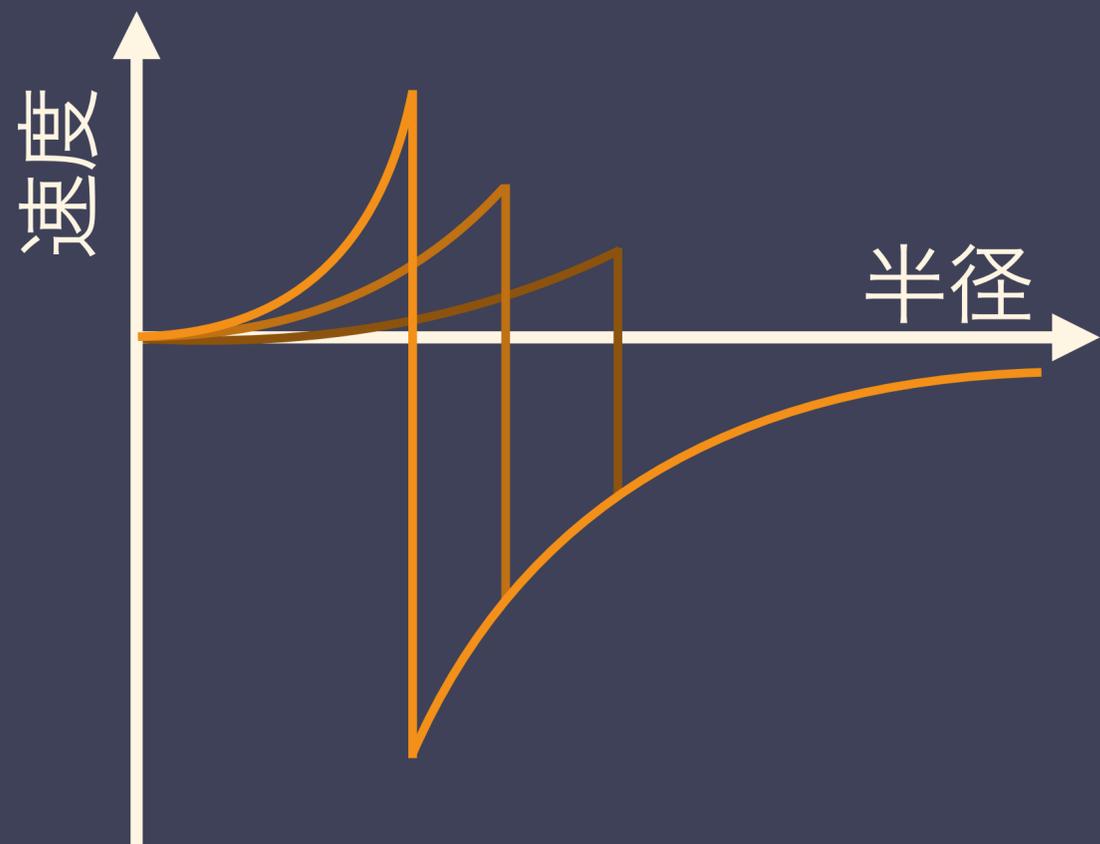
乱流の強さの違い

- M_{gain} だけが違い、LSのほうが大きい
- LSモデルのほうが乱流が強い



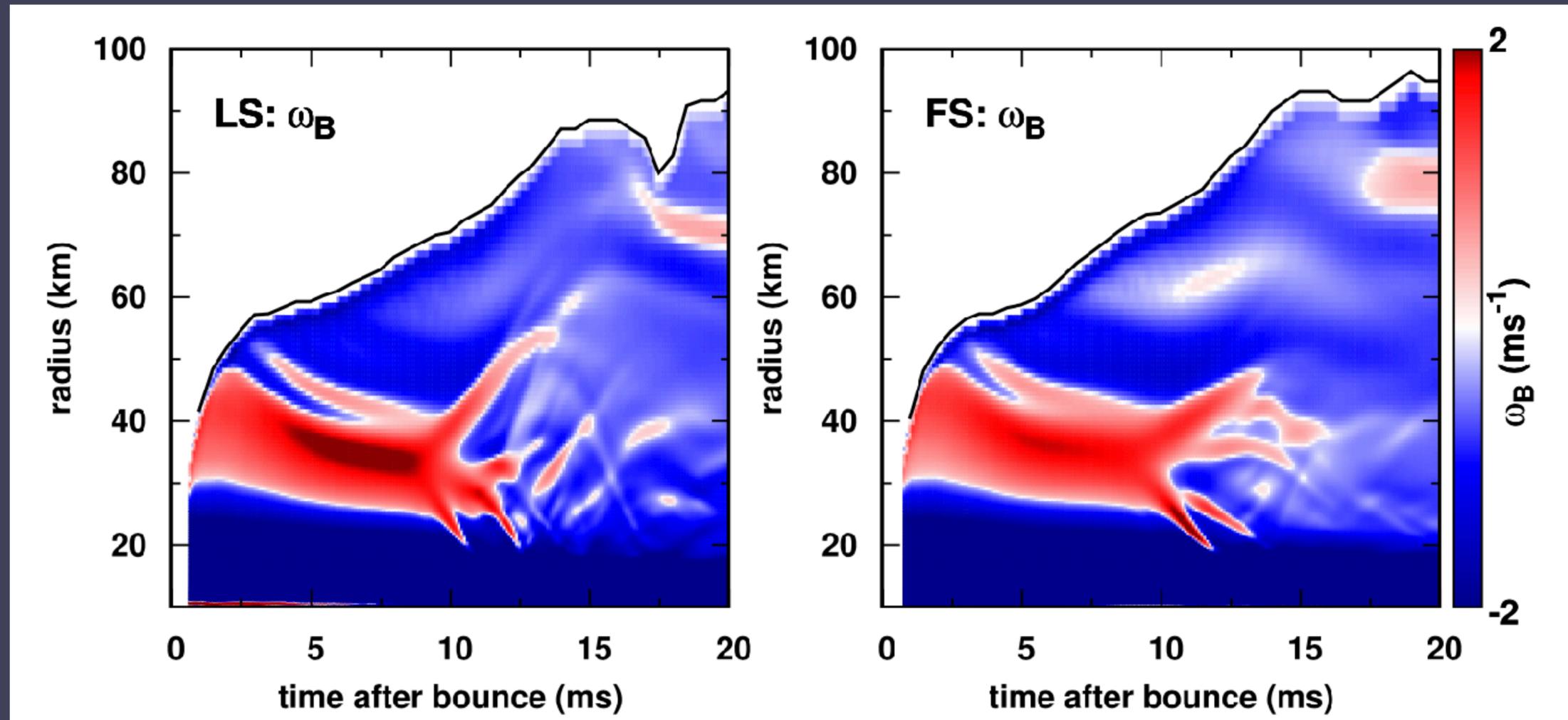
Prompt convection

- Prompt convection:
 - ▶ 衝撃波がエネルギーを失いながら伝搬
 - ▶ 負のエントロピー勾配を形成
 - ▶ 対流が発達



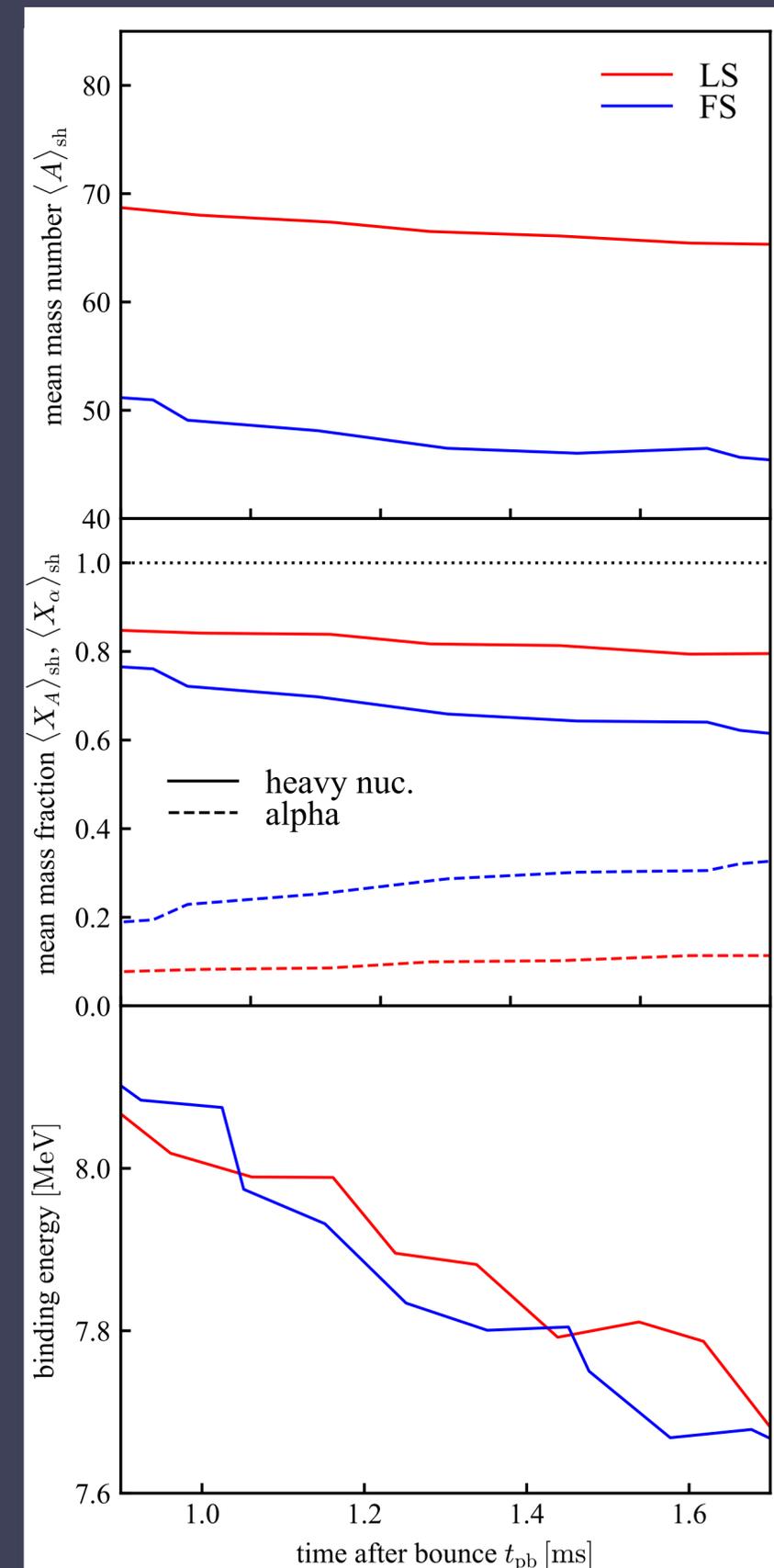
乱流の強さの違い

- ・ M_{gain} だけが違い、LSのほうが大きい
- ・ LSモデルのほうが乱流が強い
- ・ 対流成長率(Brunt-Vaisala振動数)も大きい



原子核組成の違い

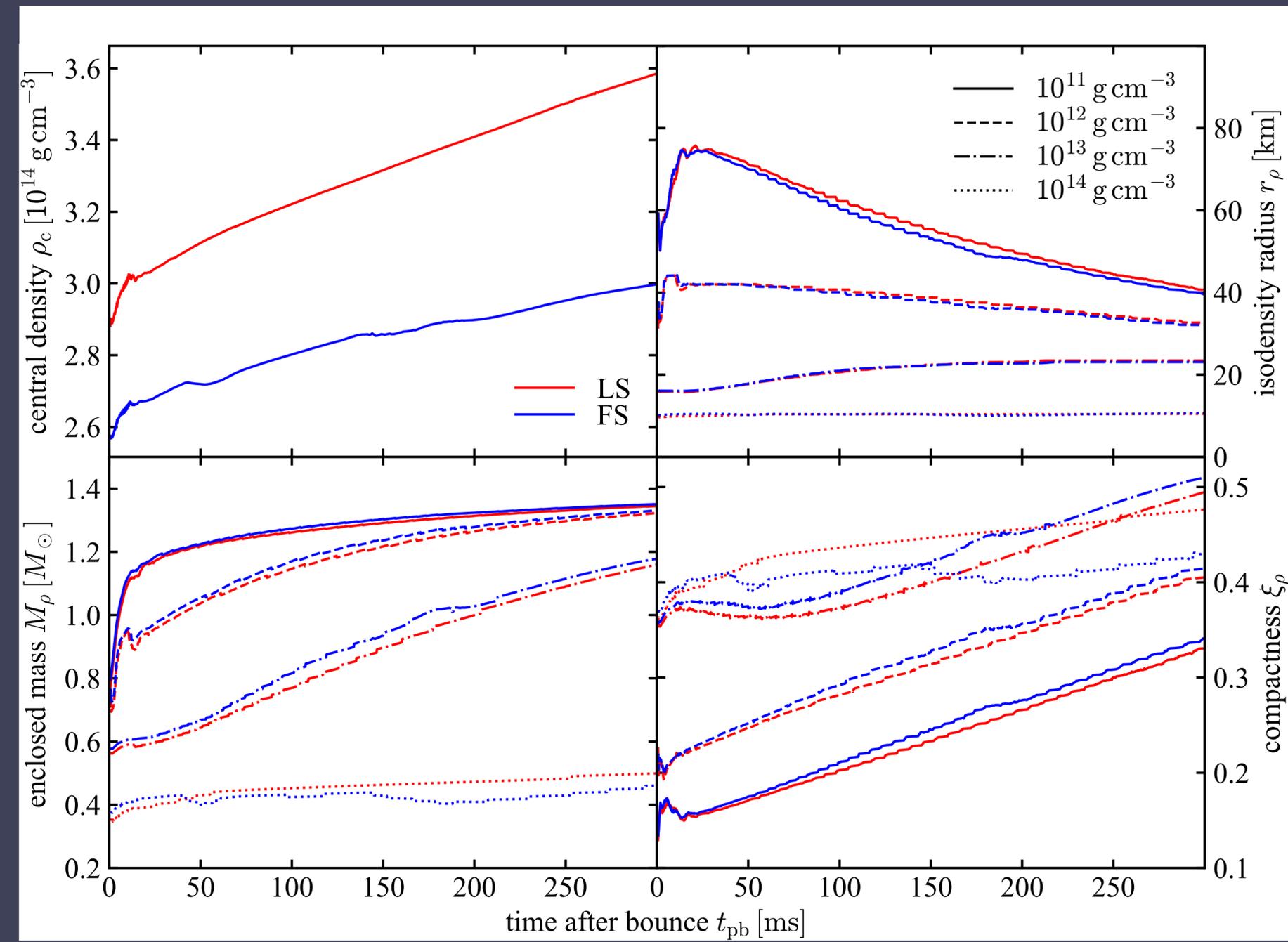
- ・ 降着流の原子核組成が違う:
 - LS: 重原子核が多く降着してくる
 - FS: α 粒子が多く降着してくる
- ▶ LSのほうが光分解で多くのエネルギーを消費
- ▶ 衝撃波が急激に弱まり、急峻なエントロピー勾配を形成
- ▶ Prompt convectionが強い



PNSの構造

- 核力モデルとしてはLSの方が柔らかい
- 中心ではLSの方がコンパクトだが、外側ではFSの方がコンパクト

$$\xi_\rho = \frac{M_\rho / M_\odot}{r_\rho / 10 \text{ km}}$$



PNSの構造

- EOSの「硬さ」の指標：断熱指数

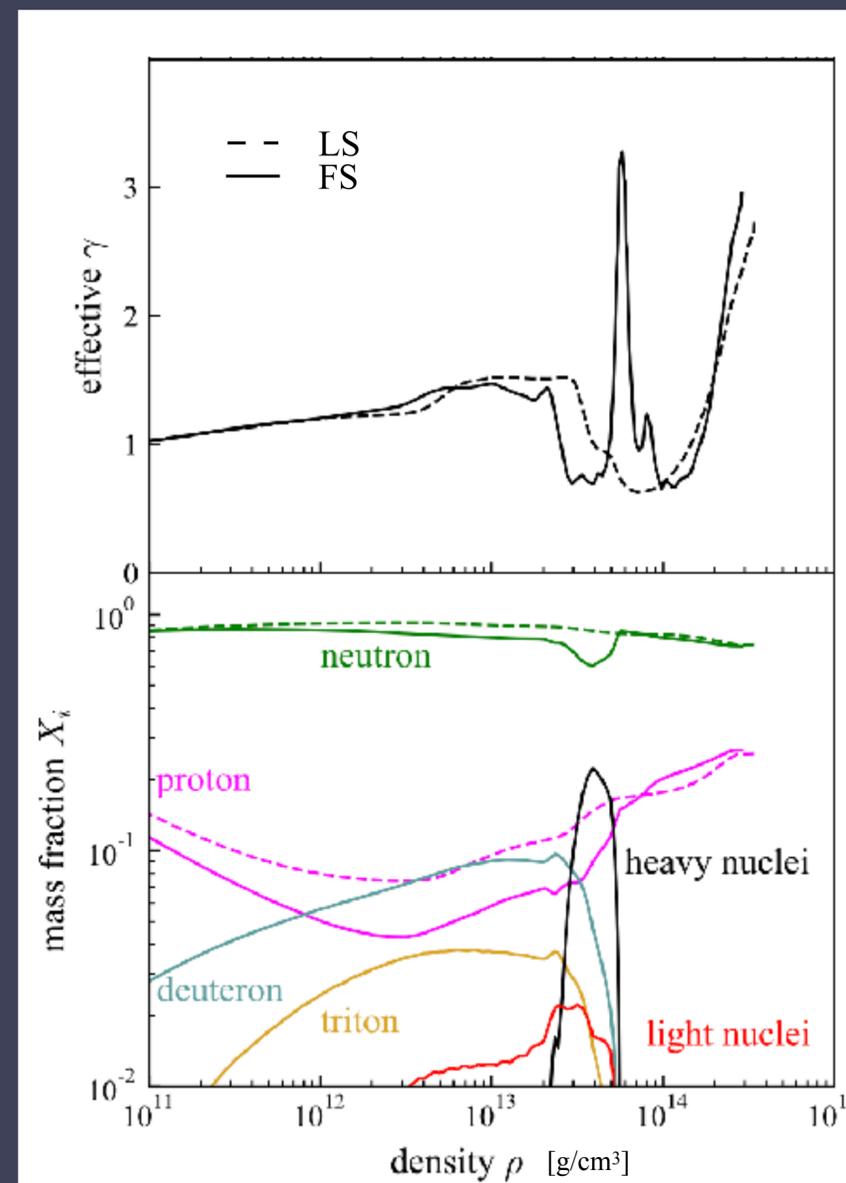
$$\gamma = \frac{\partial \ln P}{\partial \ln \rho}$$

→中心ではFSの方が「硬い」

- 10^{13} - 10^{14} g/cm³のあたりで重元素が現れ、FSの断熱指数が下がる

→ 10^{13} g/cm³付近ではFSの方が「柔らかい」

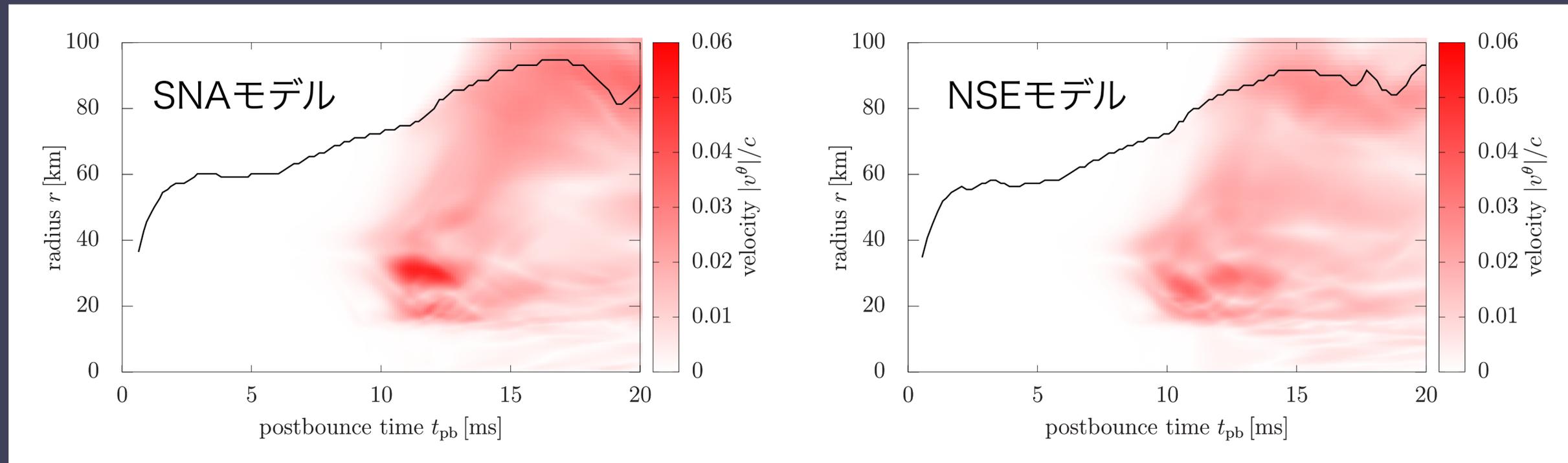
- LSはこういった原子核が現れない近似をしているため、本来の自由エネルギー極小が出現せず、圧力が高くなる



AH+(2020)

Togashi EOSに基づく比較

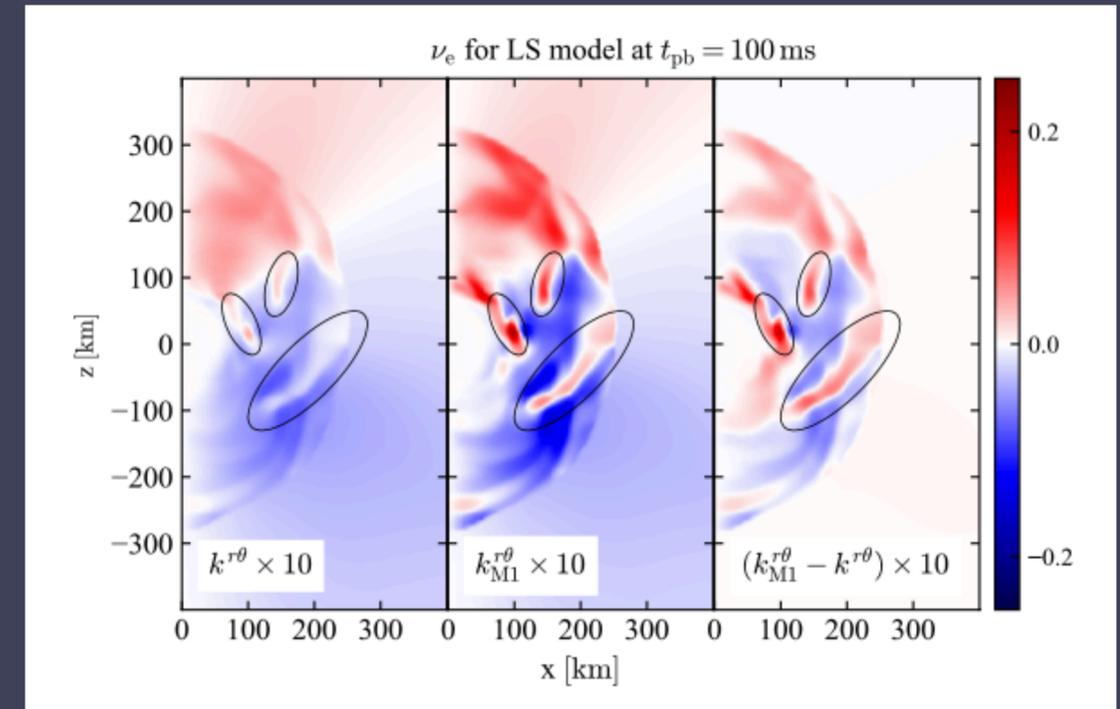
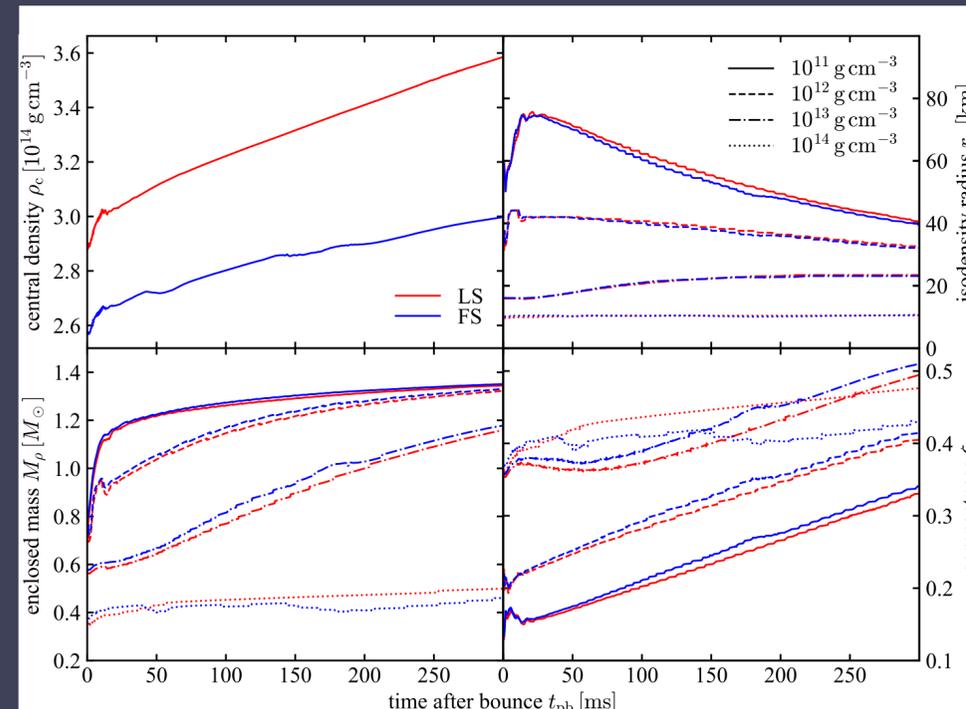
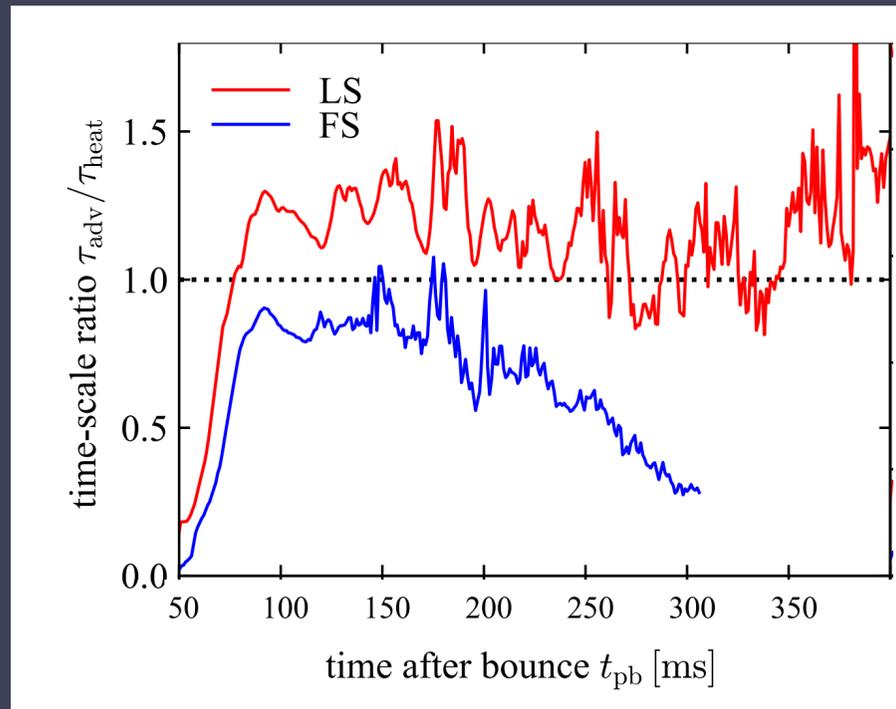
- ・ 今までの比較は原子核組成と核力モデルと両方とも違う
- ・ 核力モデルを変分法に基づくものに統一し、原子核組成だけ変えた状態方程式でシミュレーションする
- ・ SNAモデルの方がNSEモデルより prompt convection とその後の速度擾乱が若干大きい



AH+ (preliminary)

まとめ

- ・ 重力崩壊型超新星爆発のニュートリノ加熱メカニズムを調べるために、ボルツマン輻射流体シミュレーションを行った
- ・ 原子核組成がダイナミクスや構造に大きな影響を与える可能性がある
- ・ これを確かめるために、核力モデルを揃えて組成を変えたEOSで比較計算中



Thank you for listening!