

Core-collapse Supernova Simulations with the Boltzmann-radiation-hydrodynamics

原田了 (宇宙線研究所)

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

重力崩壊型超新星爆発

- ・ 重力崩壊型超新星爆発:
大質量星の最期の爆発現象(エネルギー 10^{51} erg)
- ・ 星のコアが中性子星に崩壊する時に解放される
重力エネルギー (10^{53} erg) がエネルギー源
- ・ 残りはニュートリノとして放射、重力波も放射



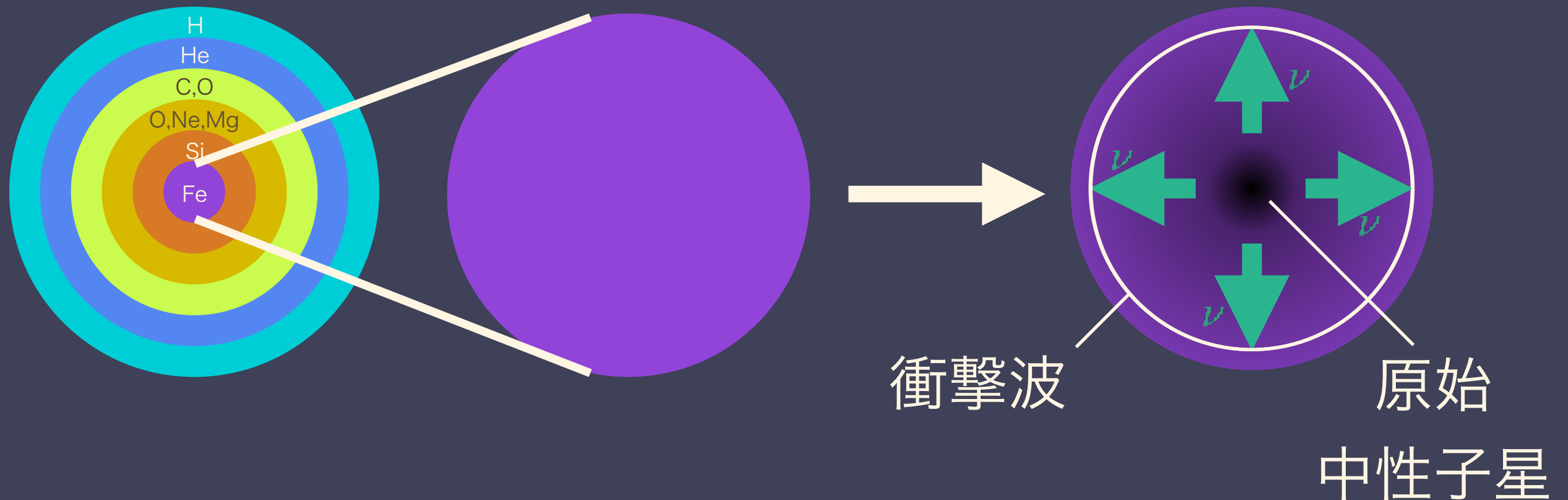
SN1987A

©NASA, ESA/Hubble

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

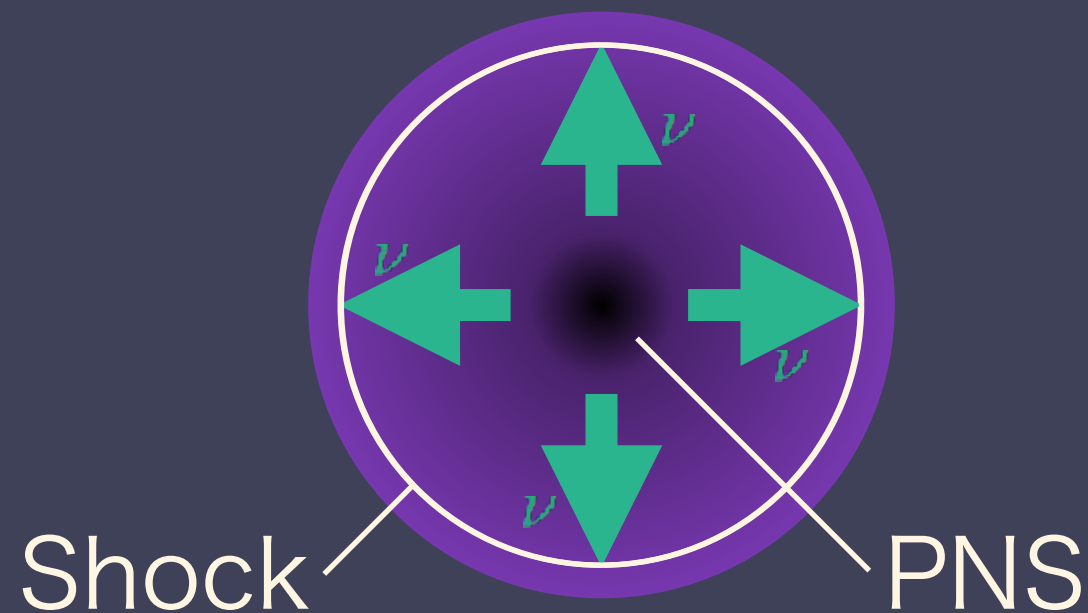
→ニュートリノ加熱メカニズム



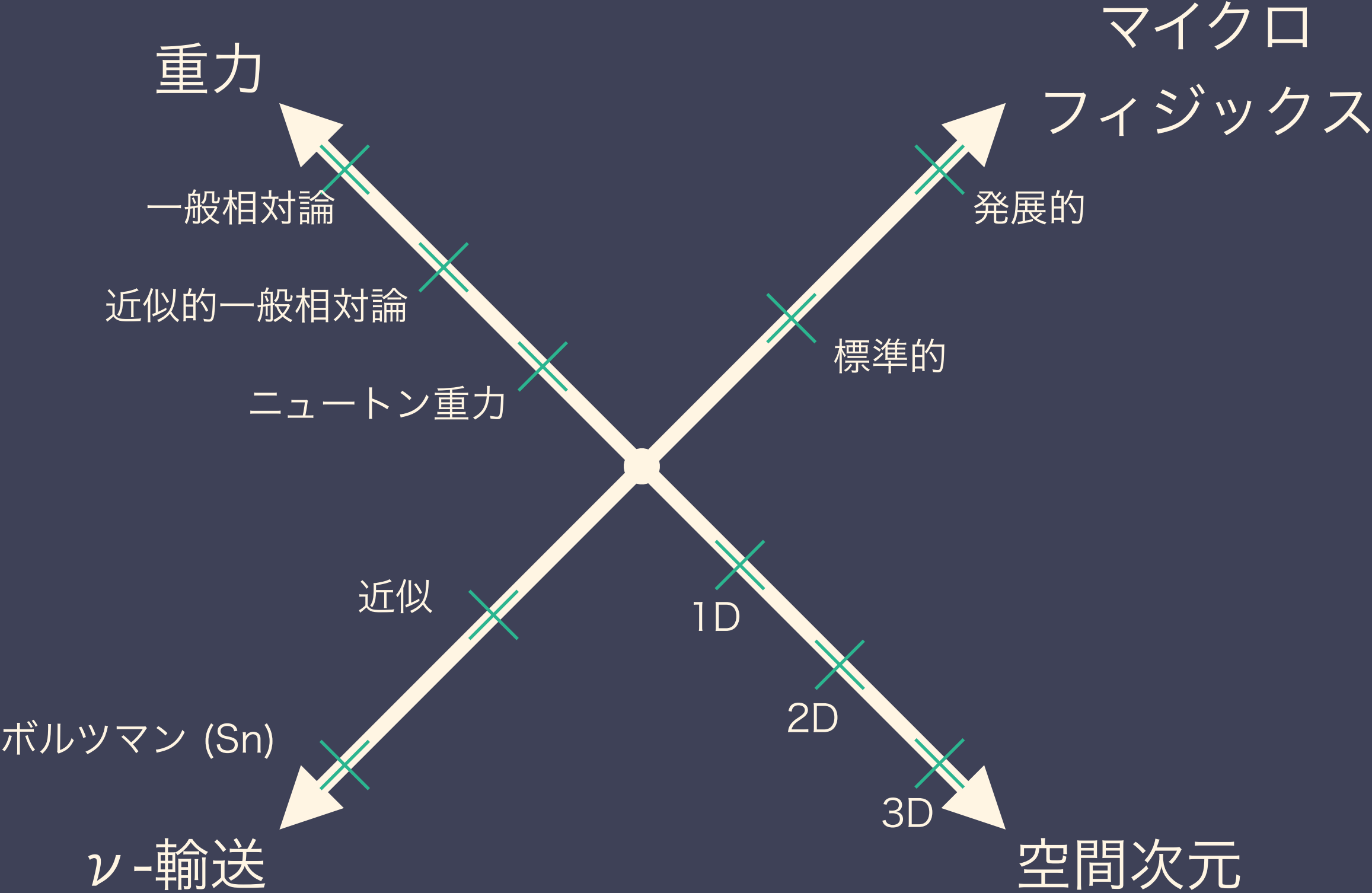
超新星からのマルチメッセンジャー

- ・ ニュートリノ: 原始中性子星とその周りの熱的状态
- ・ 重力波: 原始中性子星の構造
- ・ マルチメッセンジャー信号で爆発メカニズムにまつわる情報をダイレクトに手に入れる

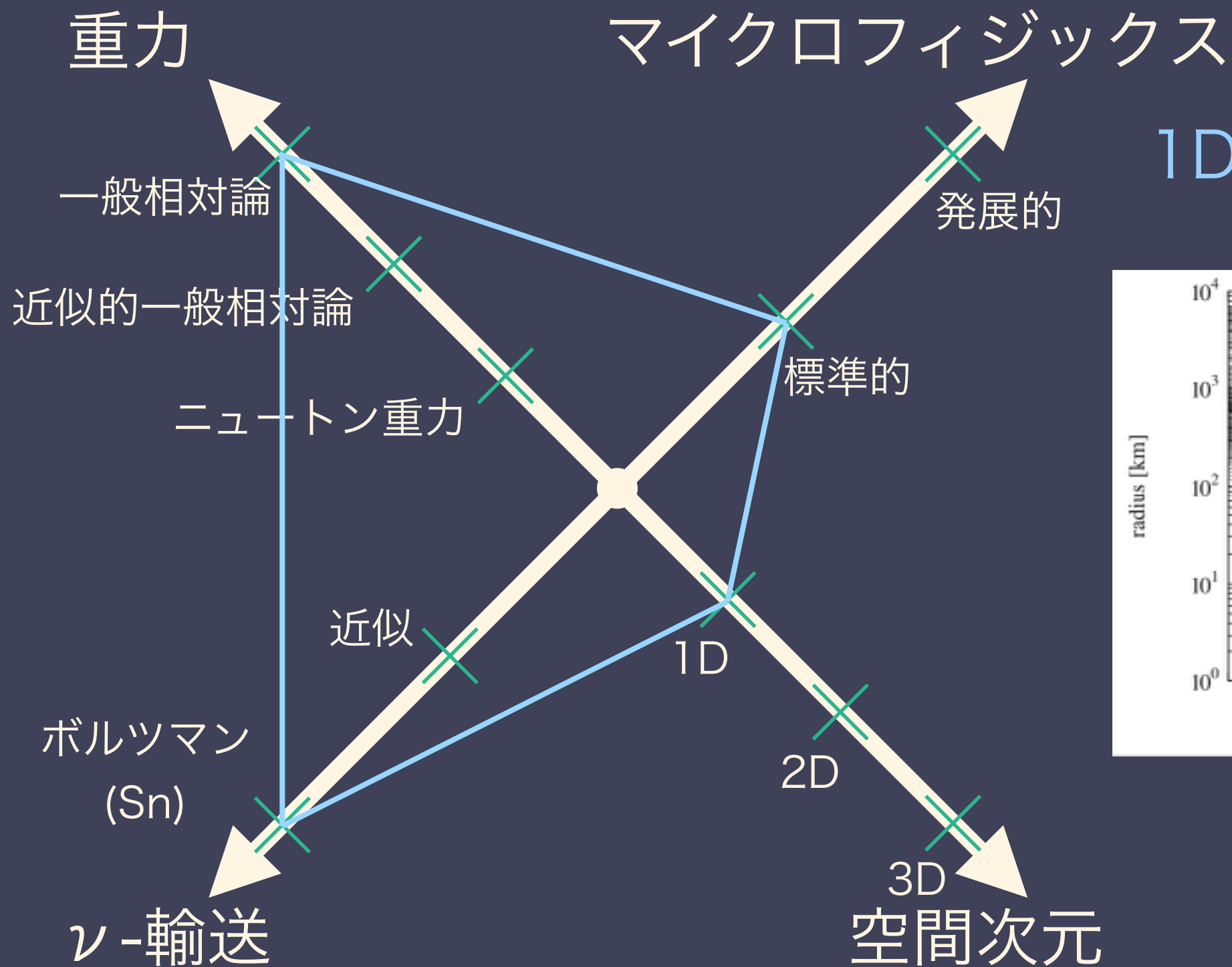
※今回はマルチメッセンジャーそのものでなく、その前提となる爆発メカニズムについてのみ



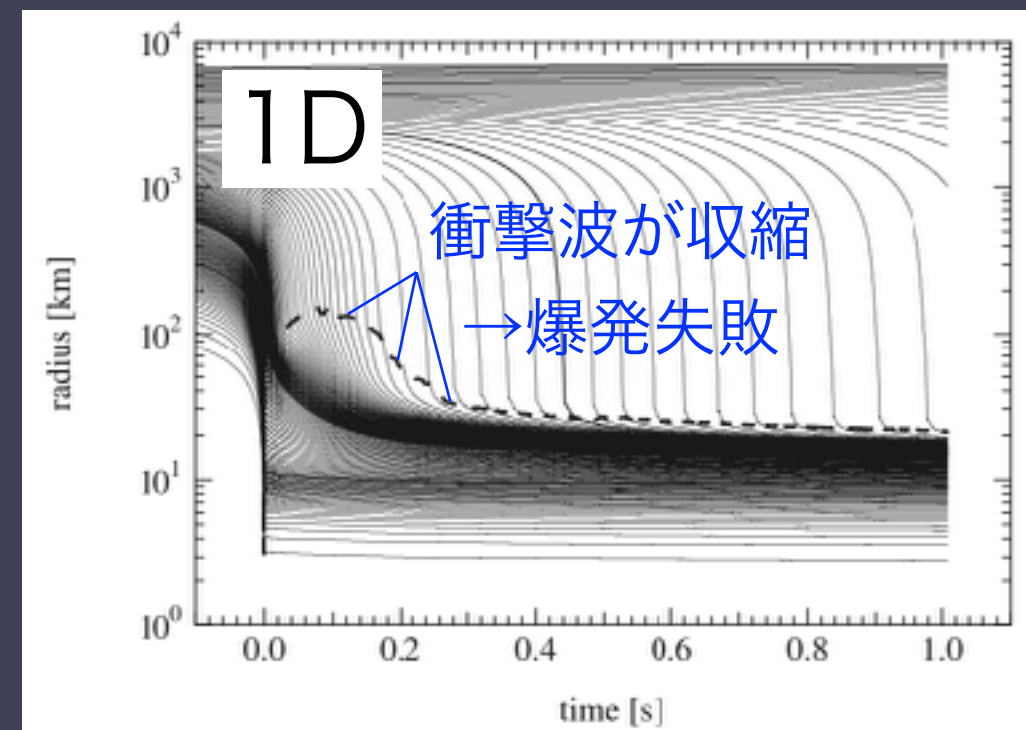
超新星の理論的進展



超新星の理論的進展

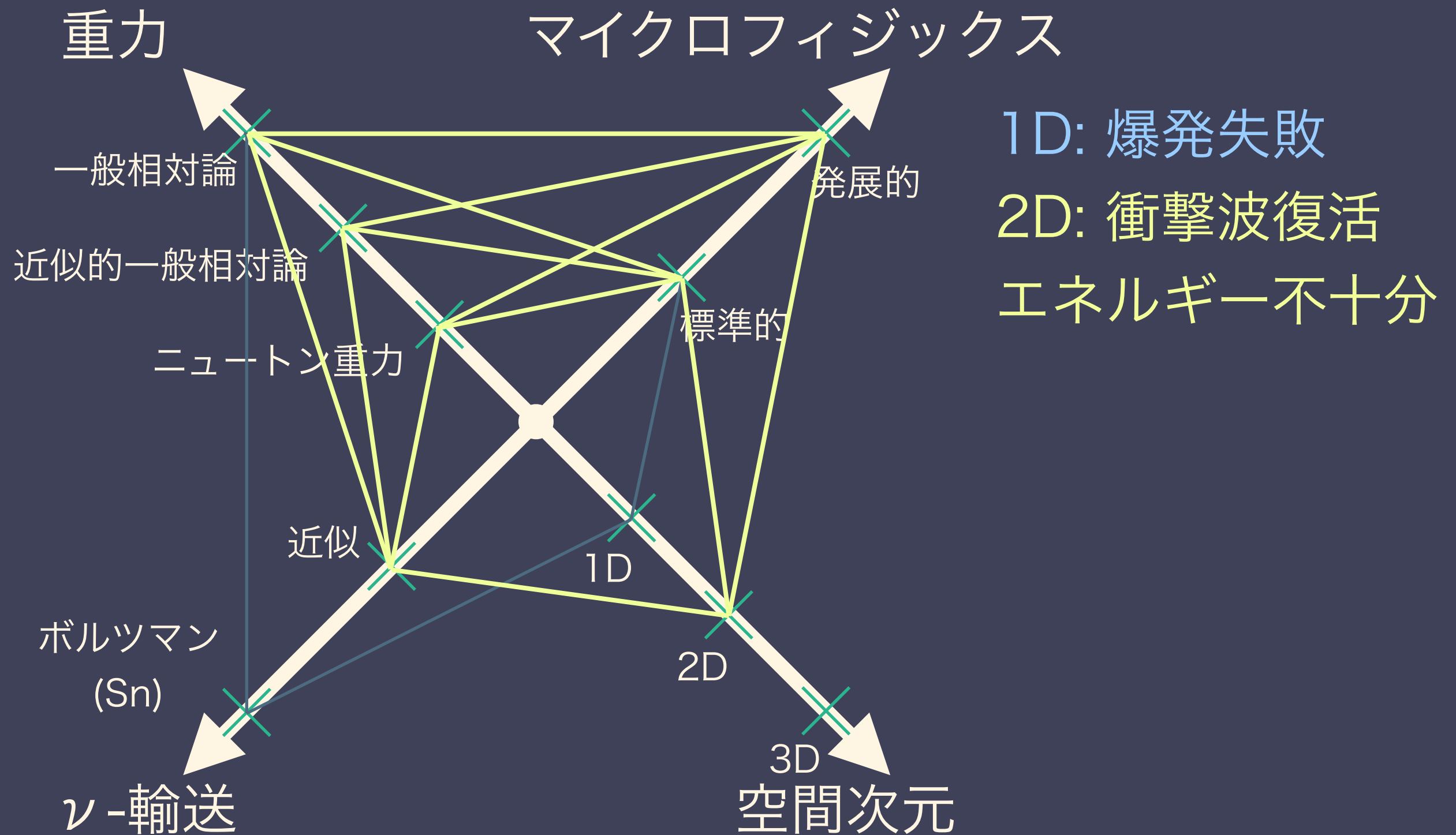


1D: 爆発失敗



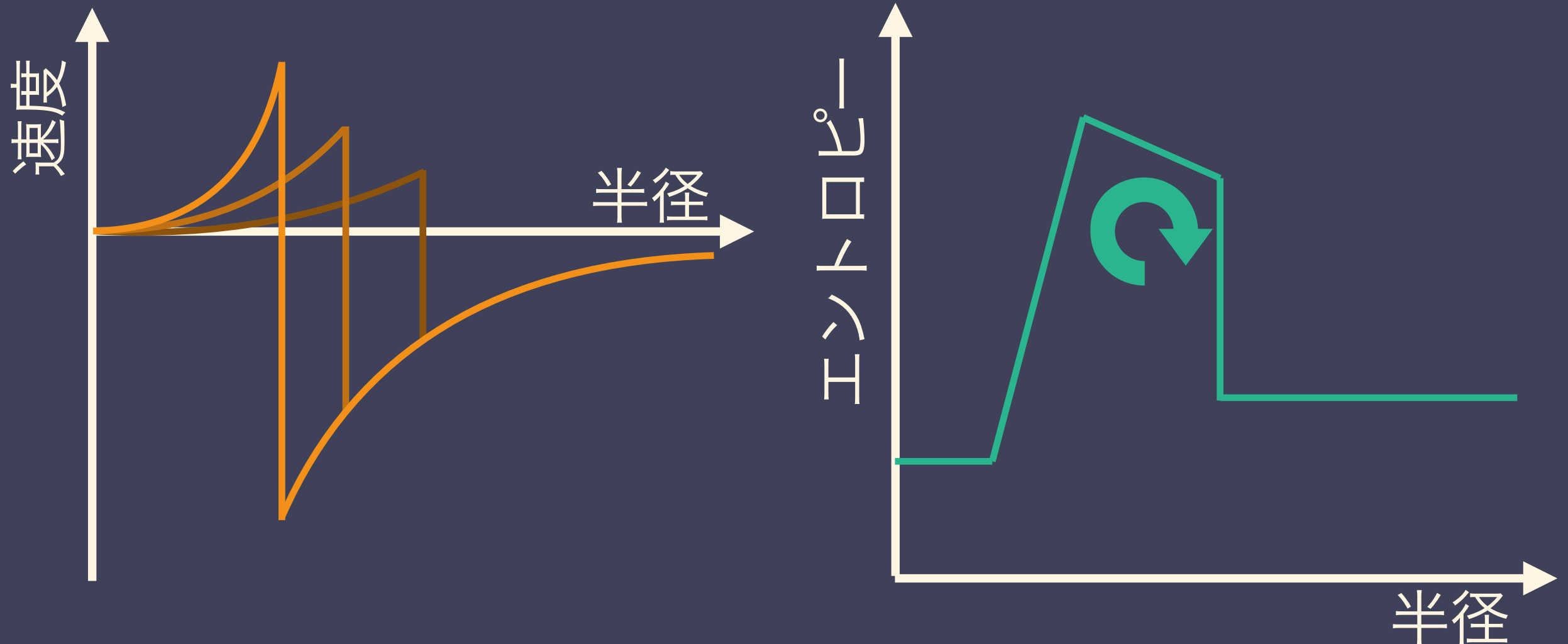
Sumiyoshi+(2005)

超新星の理論的進展

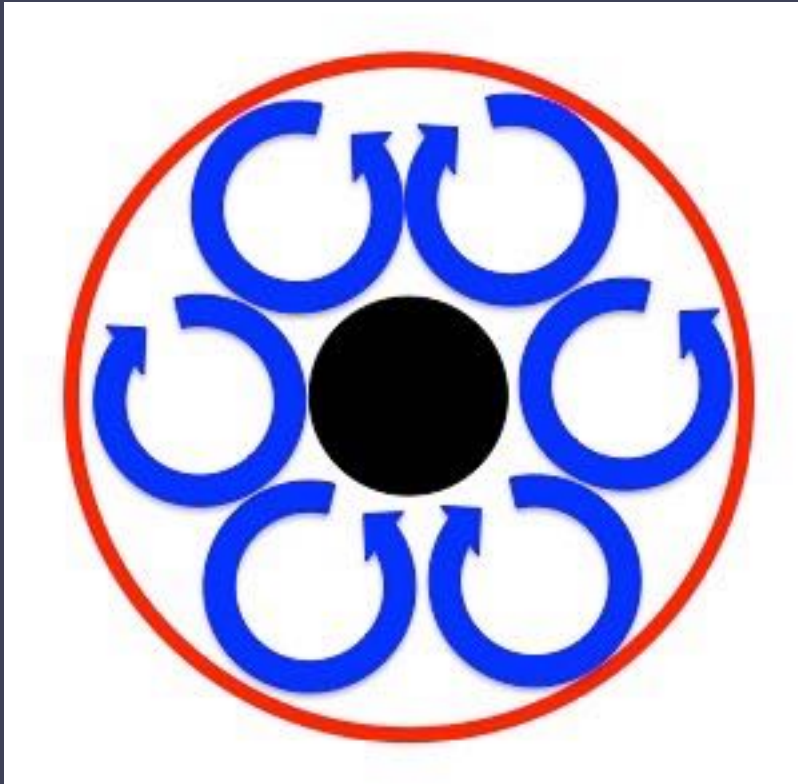


多次元効果-流体不安定性

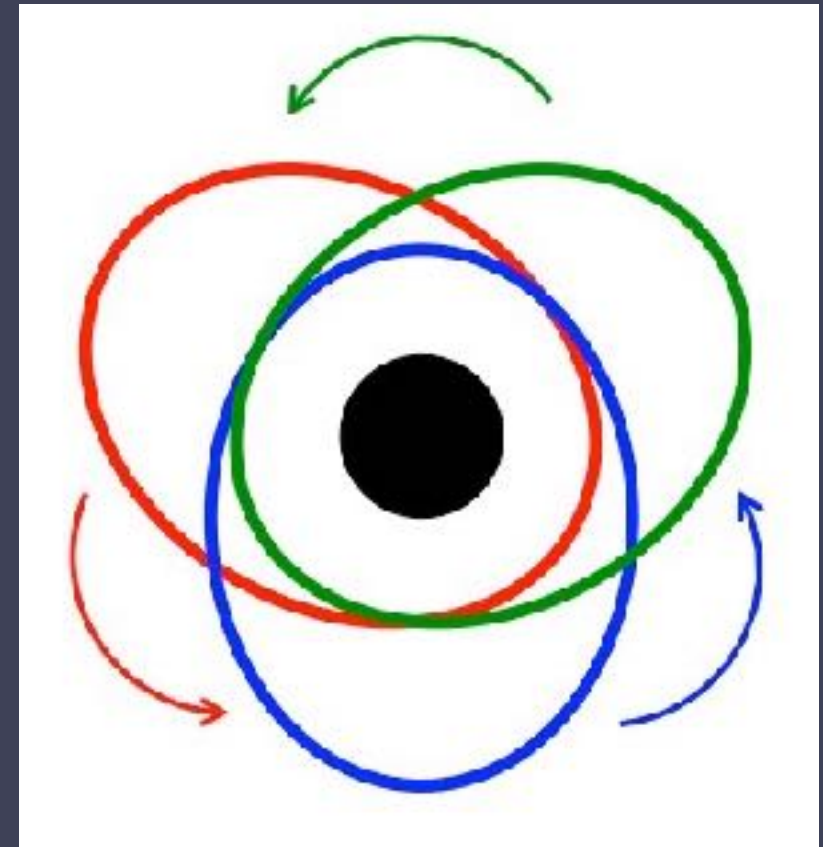
- Prompt convection:
 - ▶ 衝撃波がエネルギーを失いながら伝搬
 - ▶ 負のエントロピー勾配を形成
 - ▶ 対流が発達



多次元効果-流体不安定性



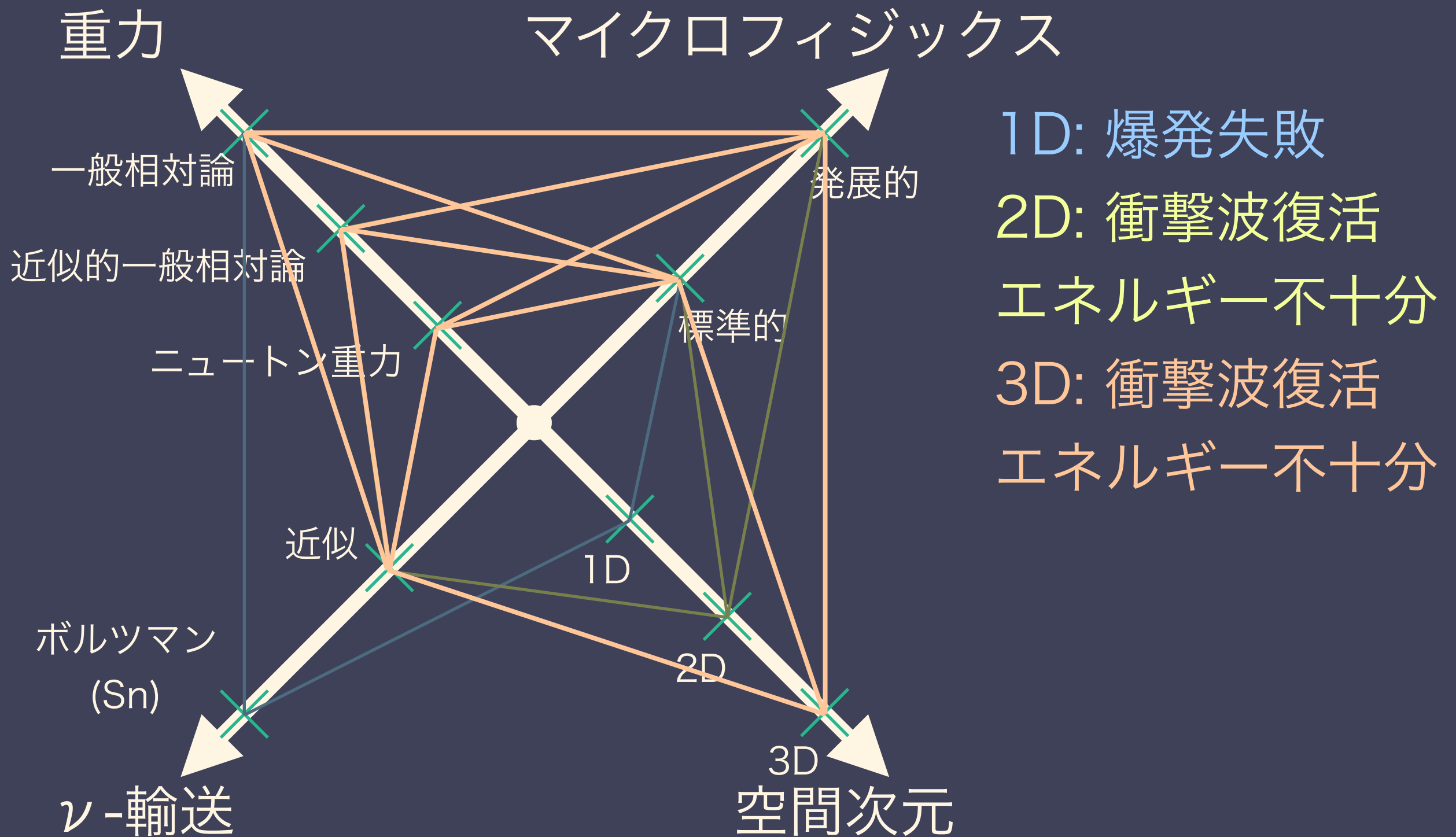
ニュートリノ駆動対流



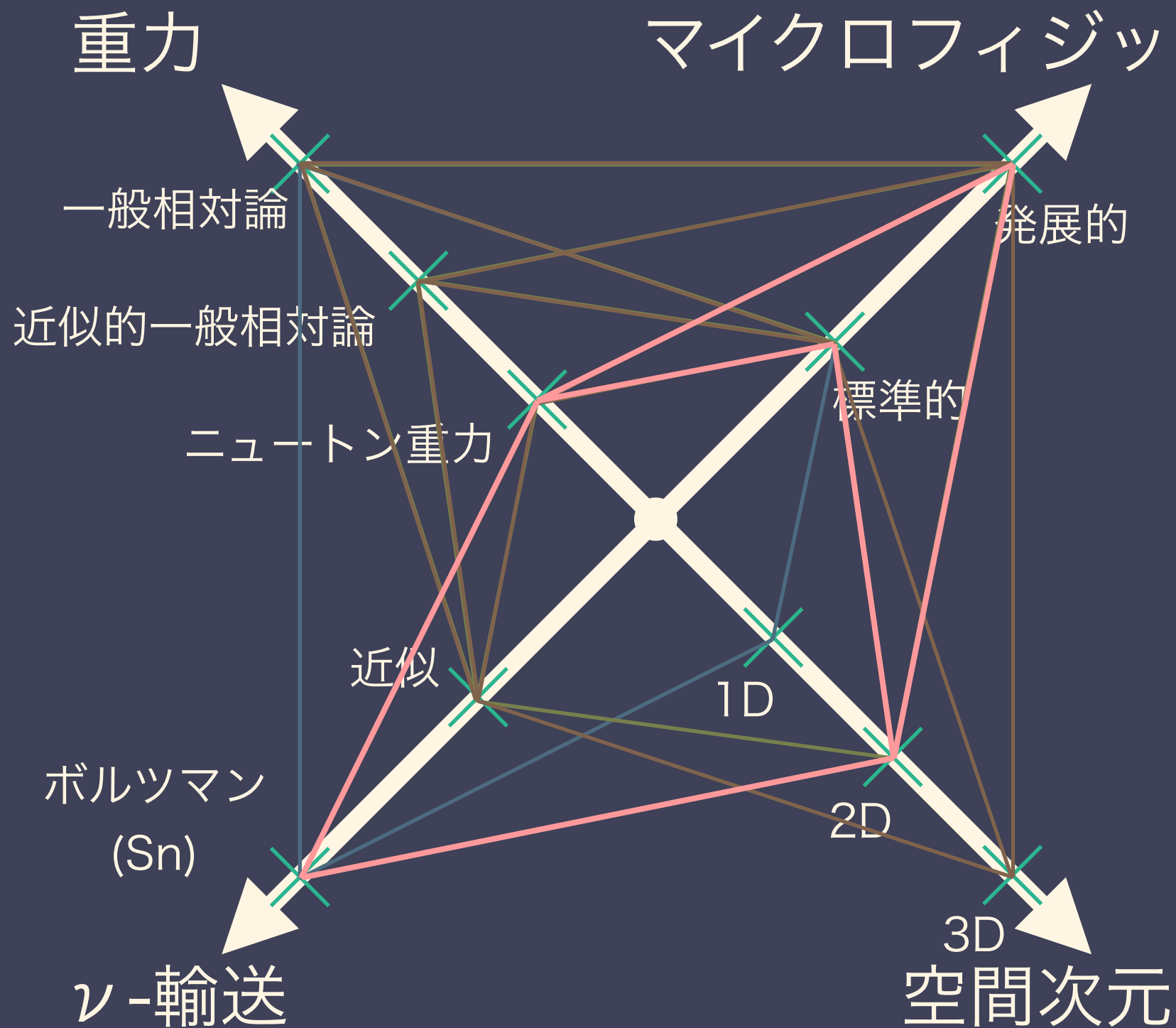
SASI

- ・ 衝撃波停滞フェーズでの流体不安定性:
 - ニュートリノ駆動対流
 - standing accretion shock instability (SASI)
- ・ 乱流へと発達し、衝撃波を押し出したりする

超新星の理論的進展



超新星の理論的進展



1D: 爆発失敗

2D: 衝撃波復活

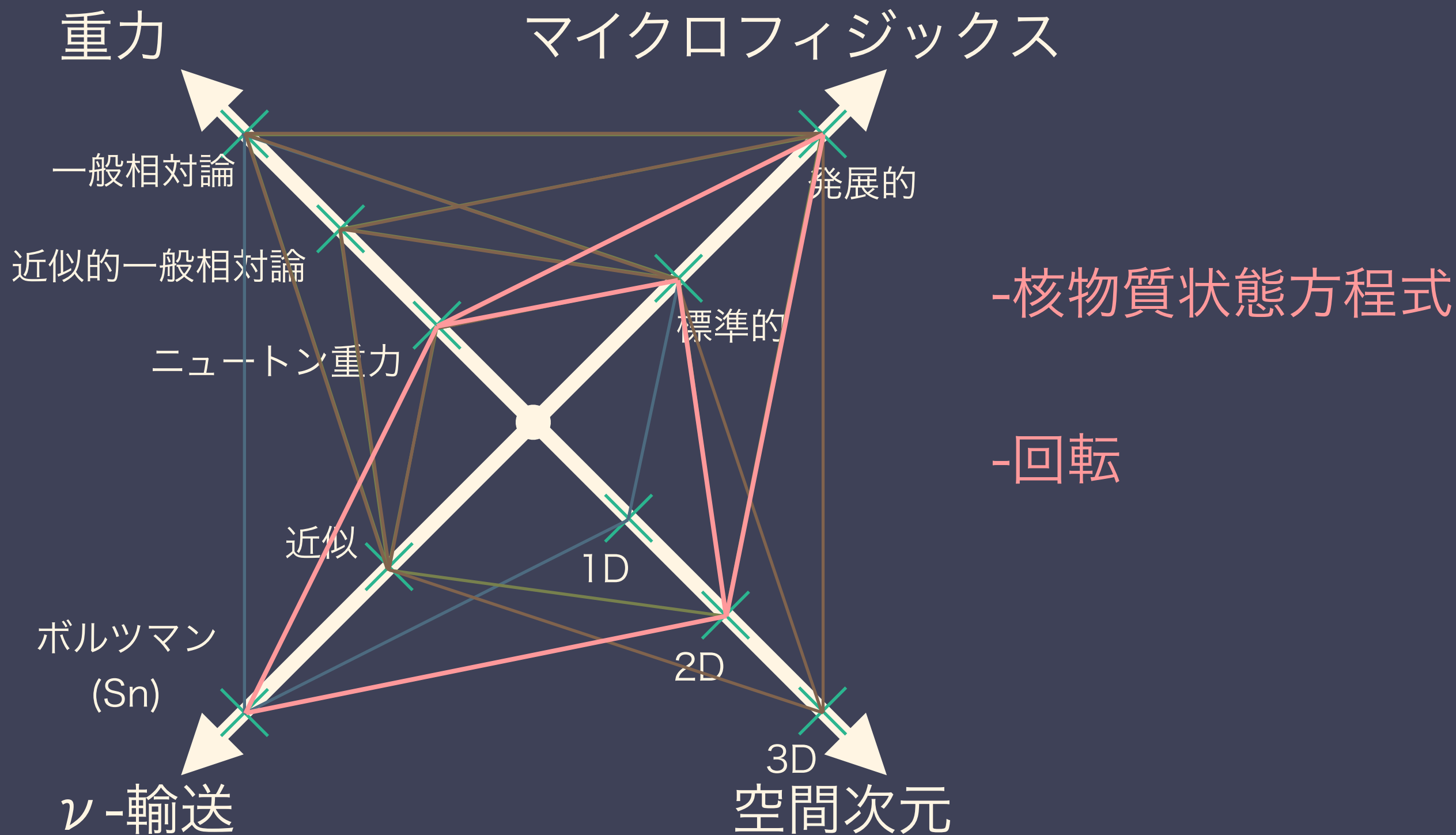
エネルギー不十分

3D: 衝撃波復活

エネルギー不十分

我々の計算

超新星の理論的進展



セッティングアップ

- ・11.2 M $\odot$ 親星 (Woosley+ 2002)

- ・ニュートリノ反応

$$\nu_e + n \leftrightarrow e^- + p \quad \nu + A \leftrightarrow \nu + A$$

$$\bar{\nu}_e + p \leftrightarrow e^+ + n \quad \nu + e^- \leftrightarrow \nu + e^-$$

$$\nu_e + A \leftrightarrow e^- + A' \quad \nu + \bar{\nu} \leftrightarrow e^- + e^+$$

$$\nu + N \leftrightarrow \nu + N \quad N + N \leftrightarrow N + N + \nu + \bar{\nu}$$

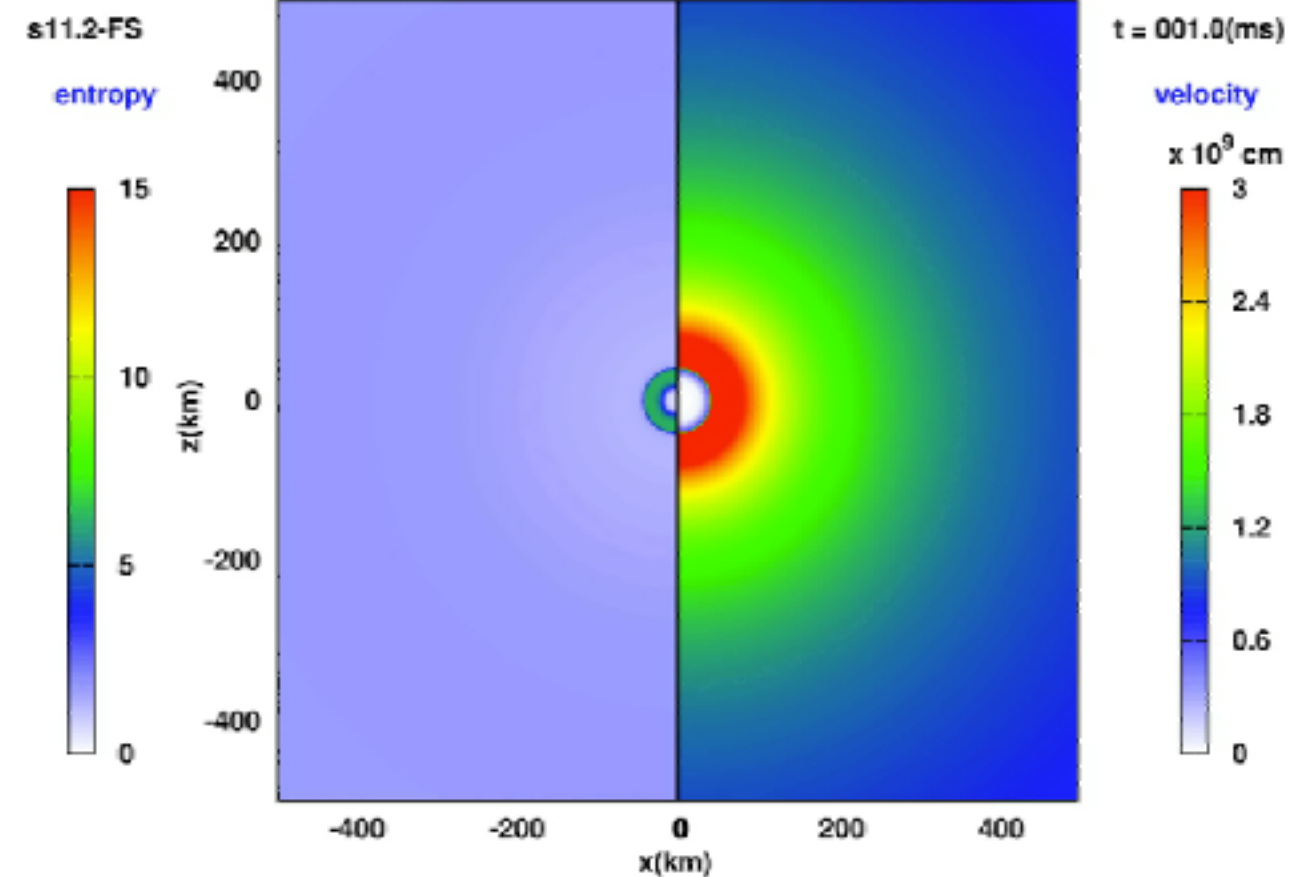
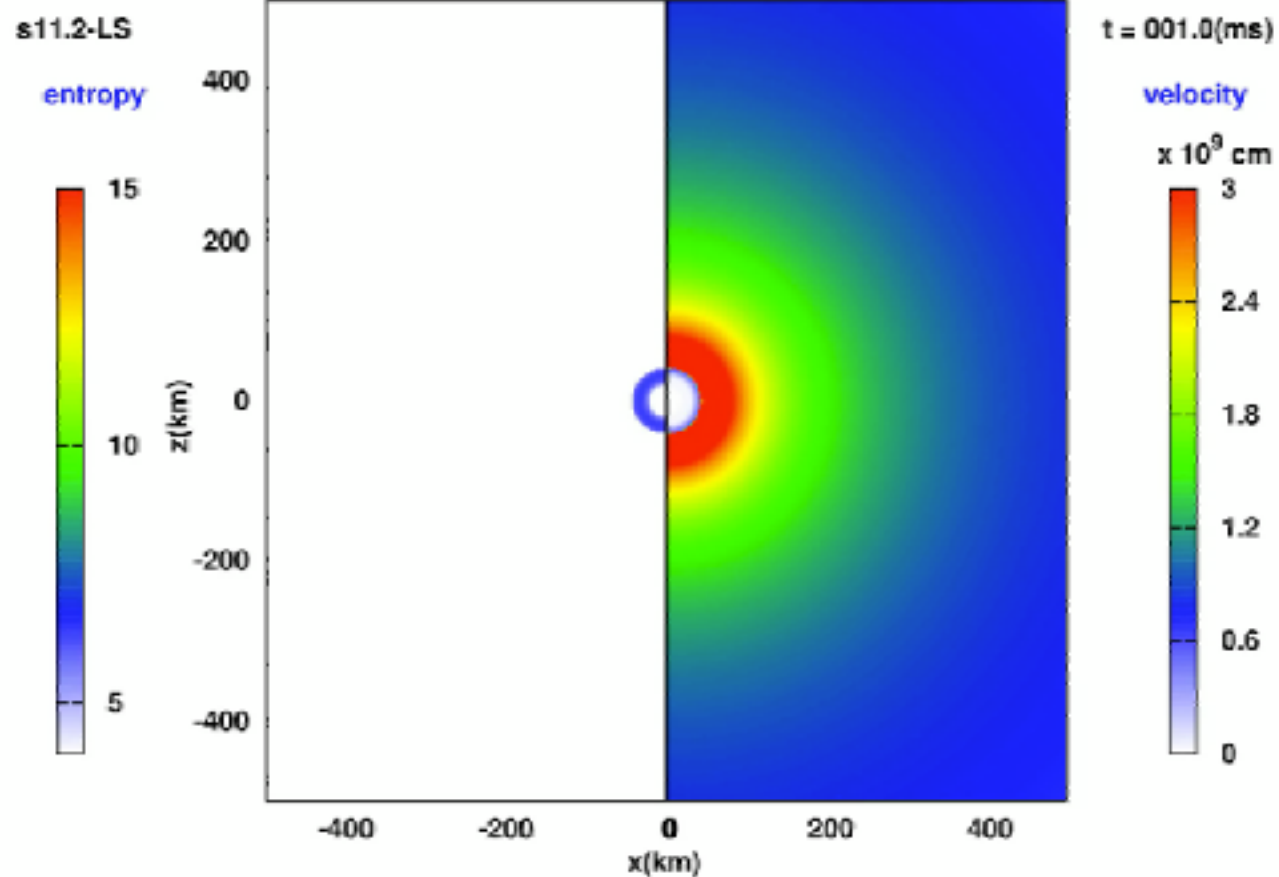
- ・Lattimer-Swesty (LS) 状態方程式と
Skyrm型、SNA

Furusawa-Shen (FS) 状態方程式

相対論的平均場、核統計平衡

衝撃波の進化

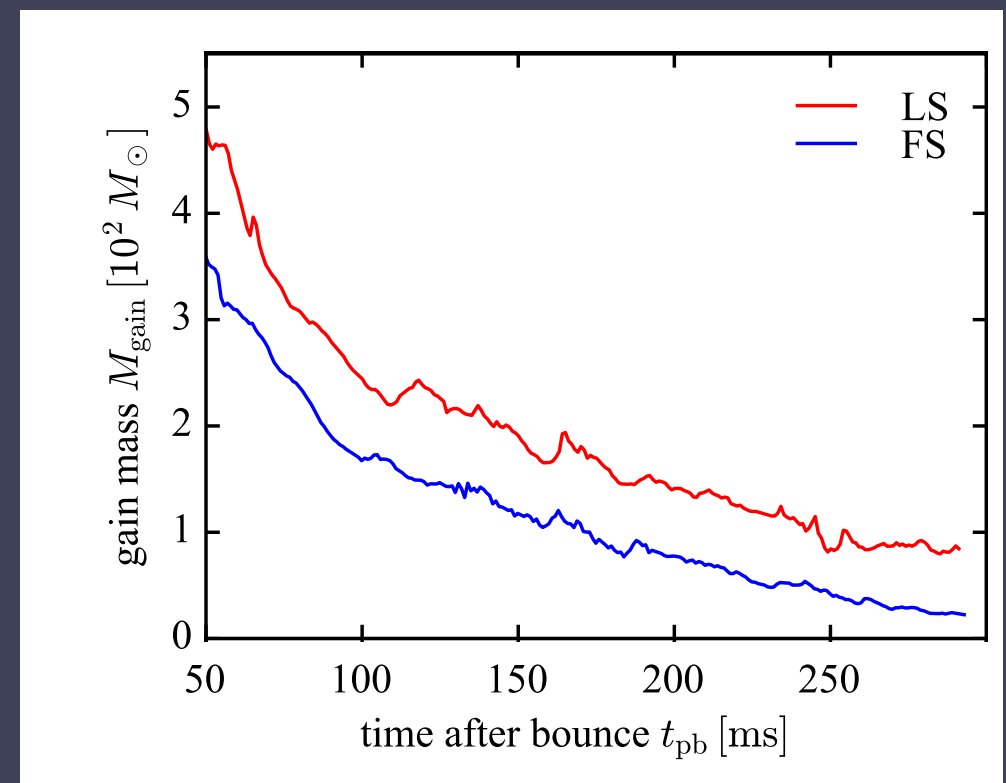
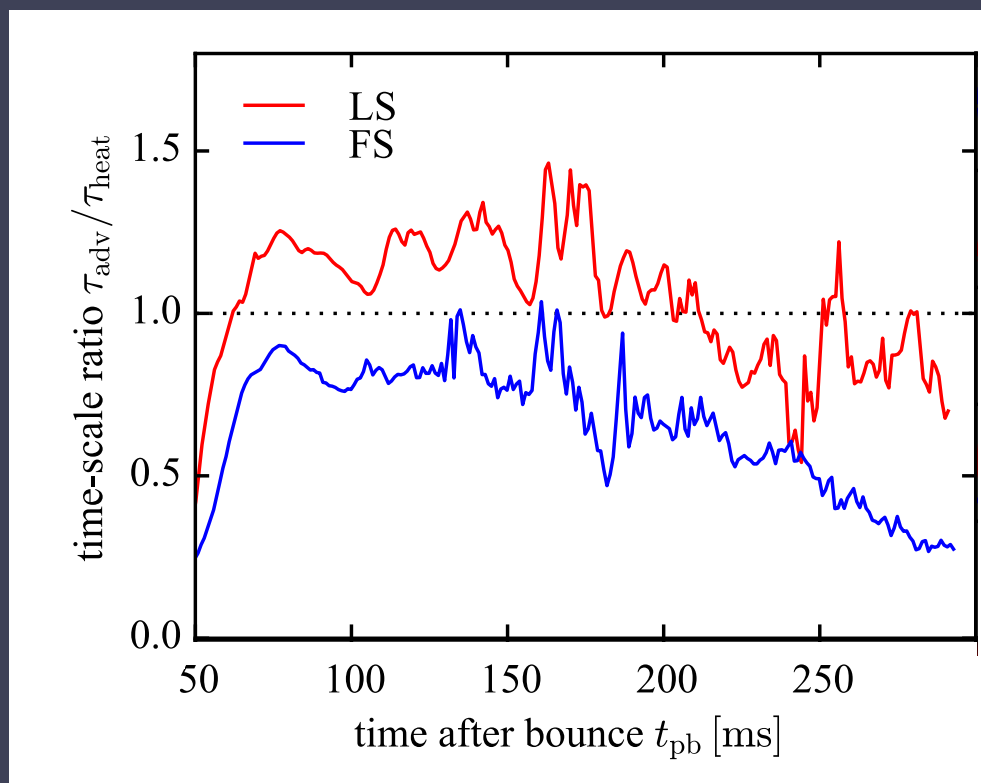
- ・ エントロピーと速度のカラーマップ



Timescale ratio

- 衝撃波はtimescale ratioが1を超えた時に復活する:

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

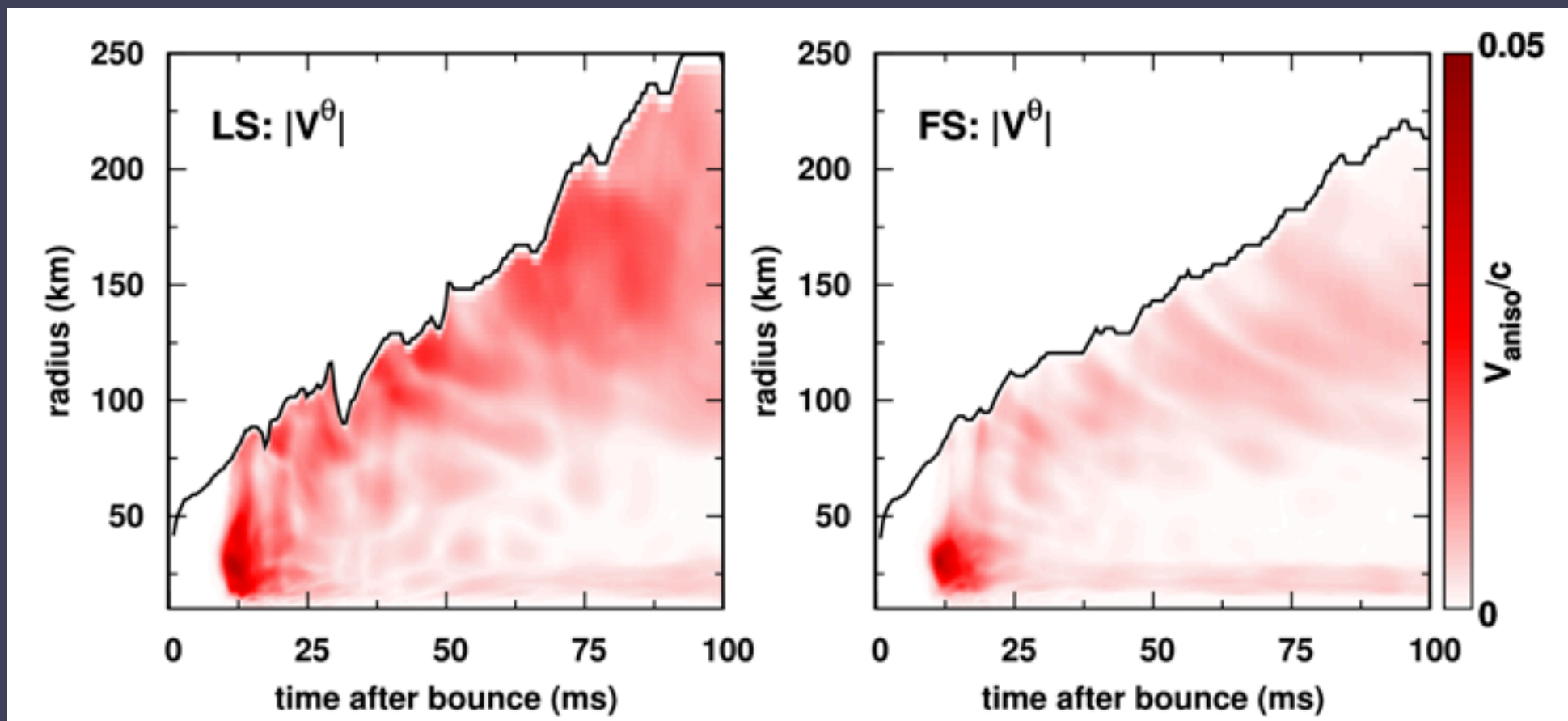


AH+ in prep.

- M_{gain} だけが違い、LSのほうが大きい

乱流の強さの違い

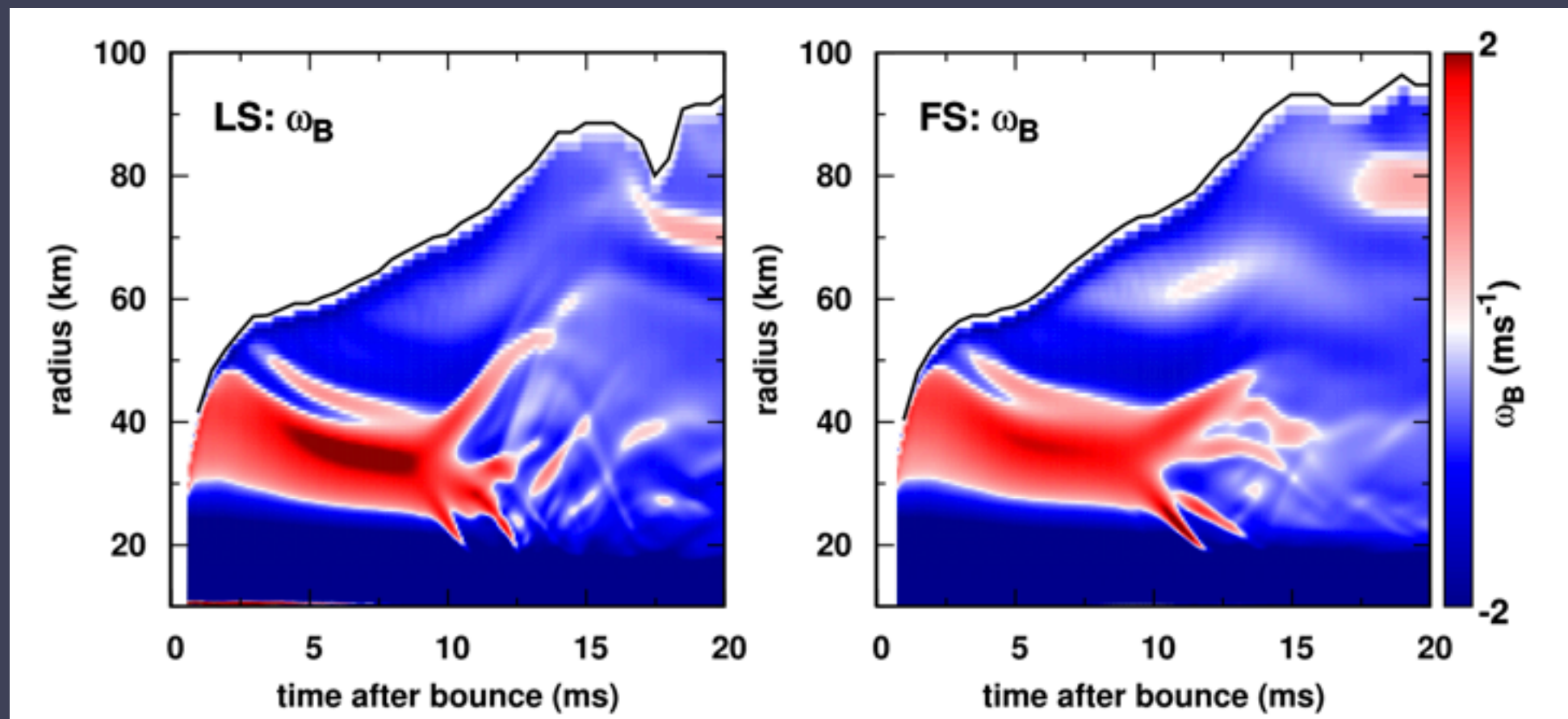
- M_{gain} だけが違い、LSのほうが大きい
- LSモデルのほうが乱流が強い



Nagakura+(2018)

乱流の強さの違い

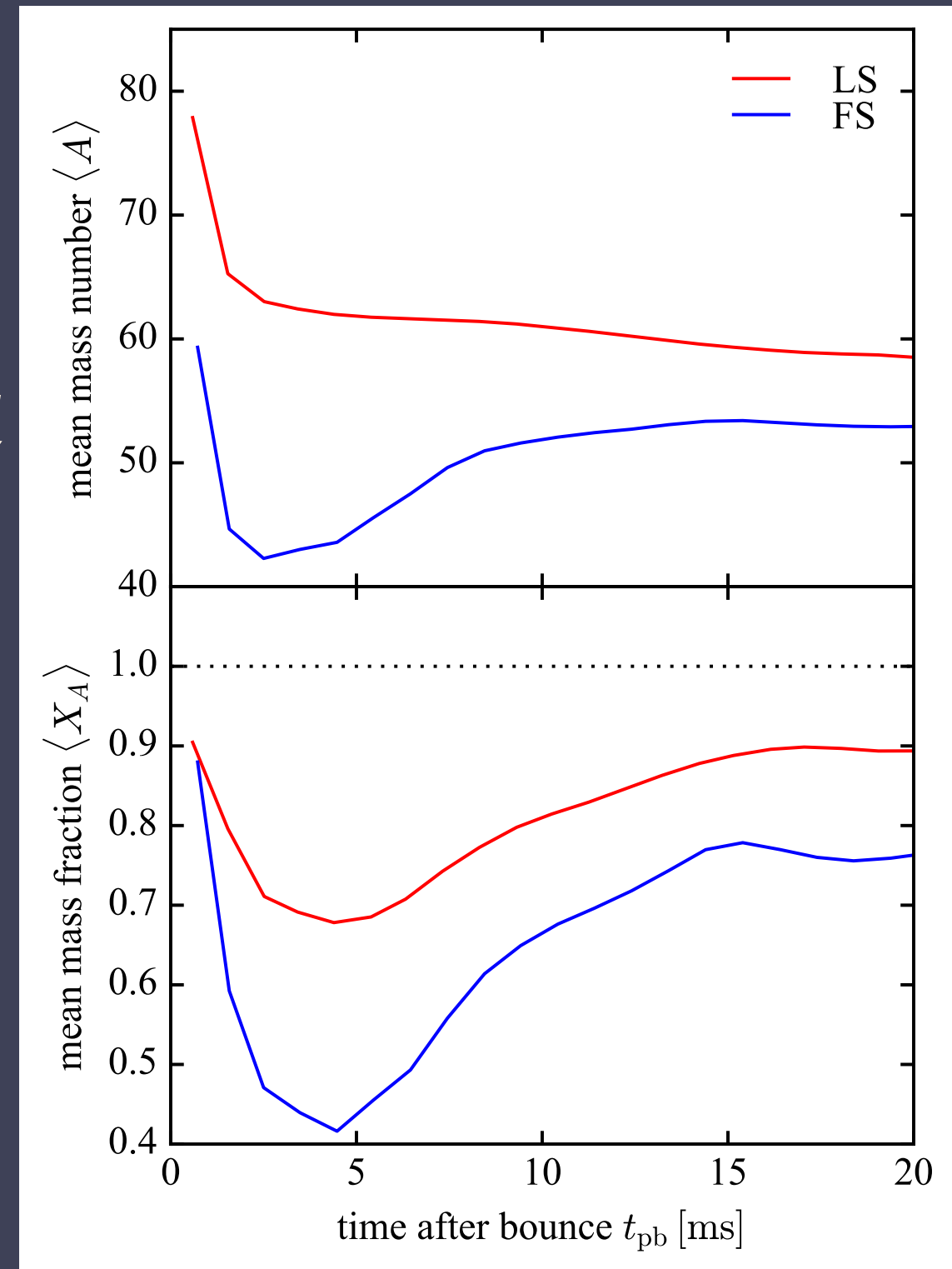
- ・ M_{gain} だけが違い、LSのほうが大きい
- ・ LSモデルのほうが乱流が強い
- ・ 対流成長率(Brunt-Vaisala振動数)も大きい



Nagakura+(2018)

原子核組成の違い

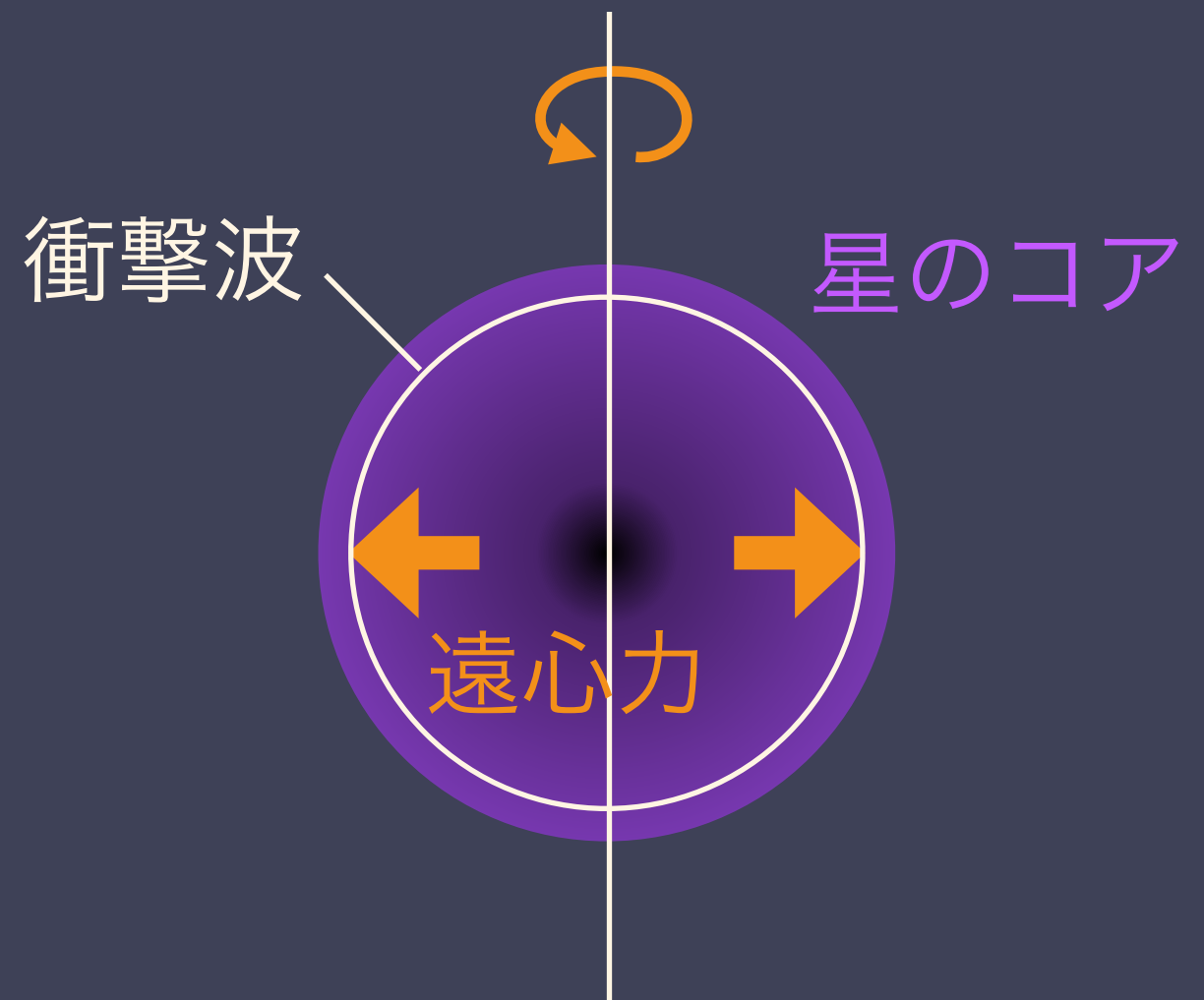
- ・ 降着流の原子核組成が違う:
LSのほうが大きく、たくさんの
重原子核が降ってくる
- ▶ 光分解で多くのエネルギーを消費
- ▶ 衝撃波が急激に弱まり、急峻な
エントロピー勾配を形成
- ▶ Prompt convectionが強い



回転

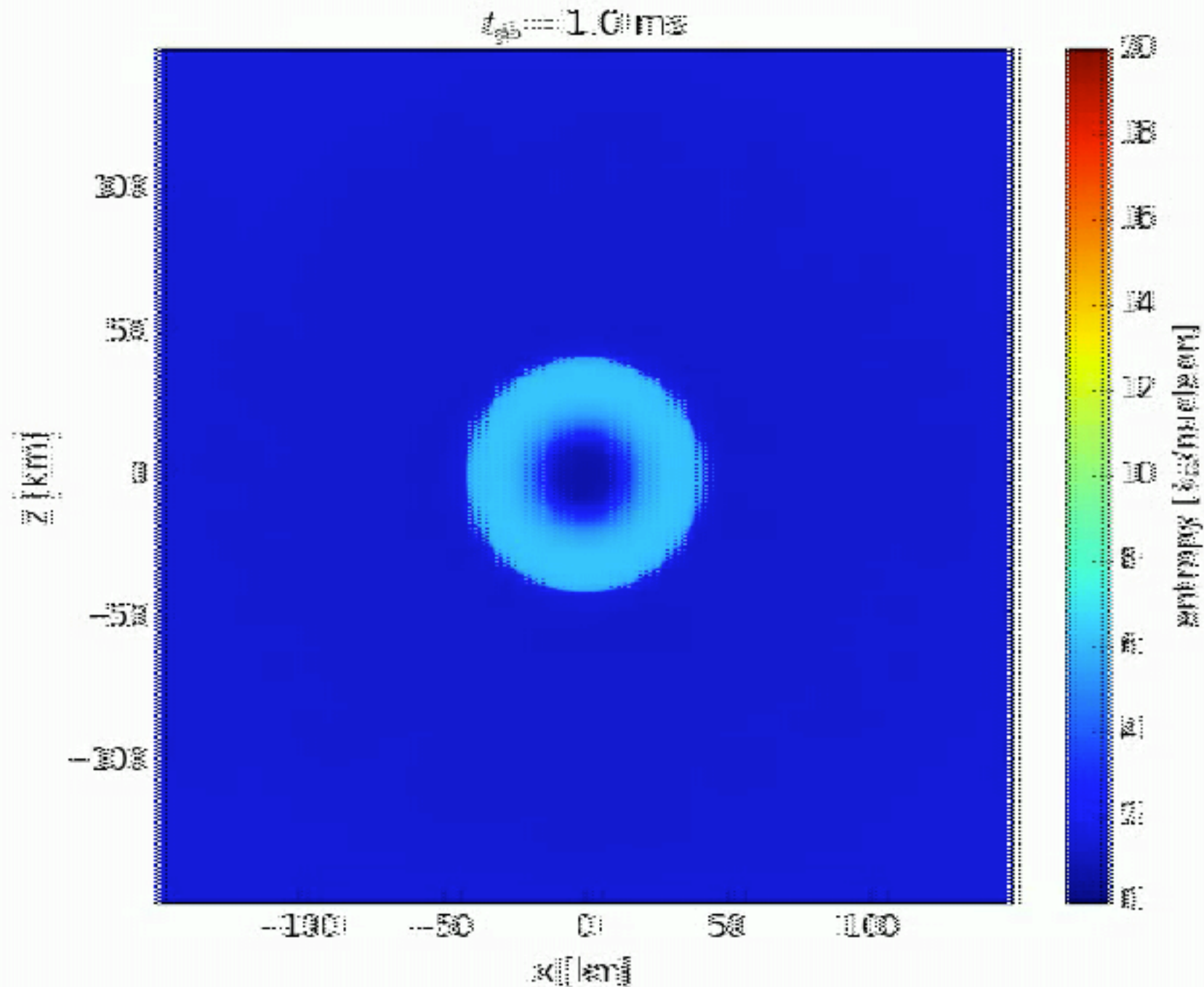
- ・衝撃波復活にはプラスとマイナスの両方の効果がある
- ・ニュートリノ分布が歪む
- ・(ボルツマン方程式を解いているため、) 近似的ニュートリノ輸送の精度を調べられる
- ・回転速度プロファイル:

$$\Omega(r) = \frac{1 \text{ rad/s}}{1 + (r/10^8 \text{ cm})^2}$$



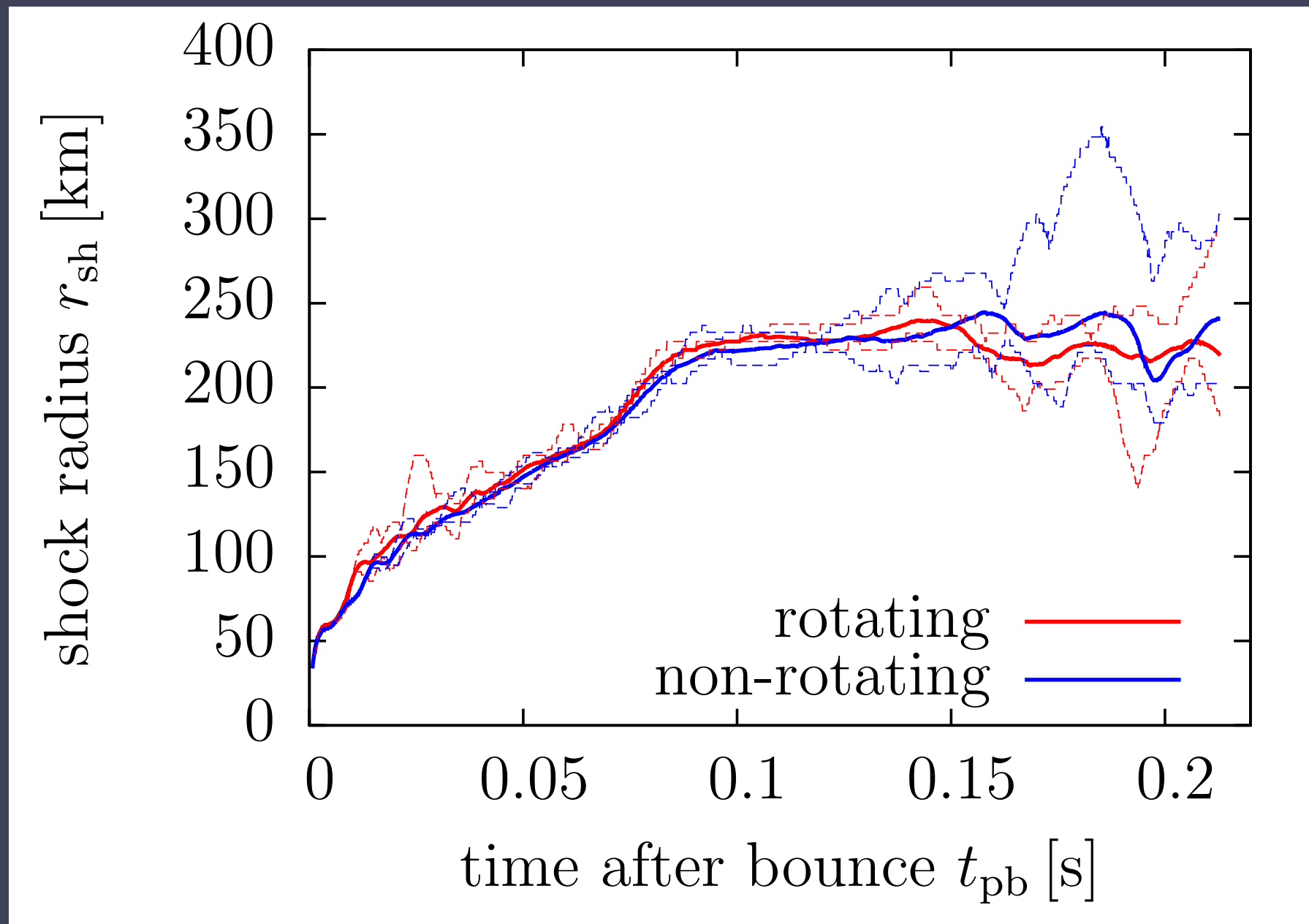
エントロピー分布

- ・バウンス後~200 msまでの時間発展



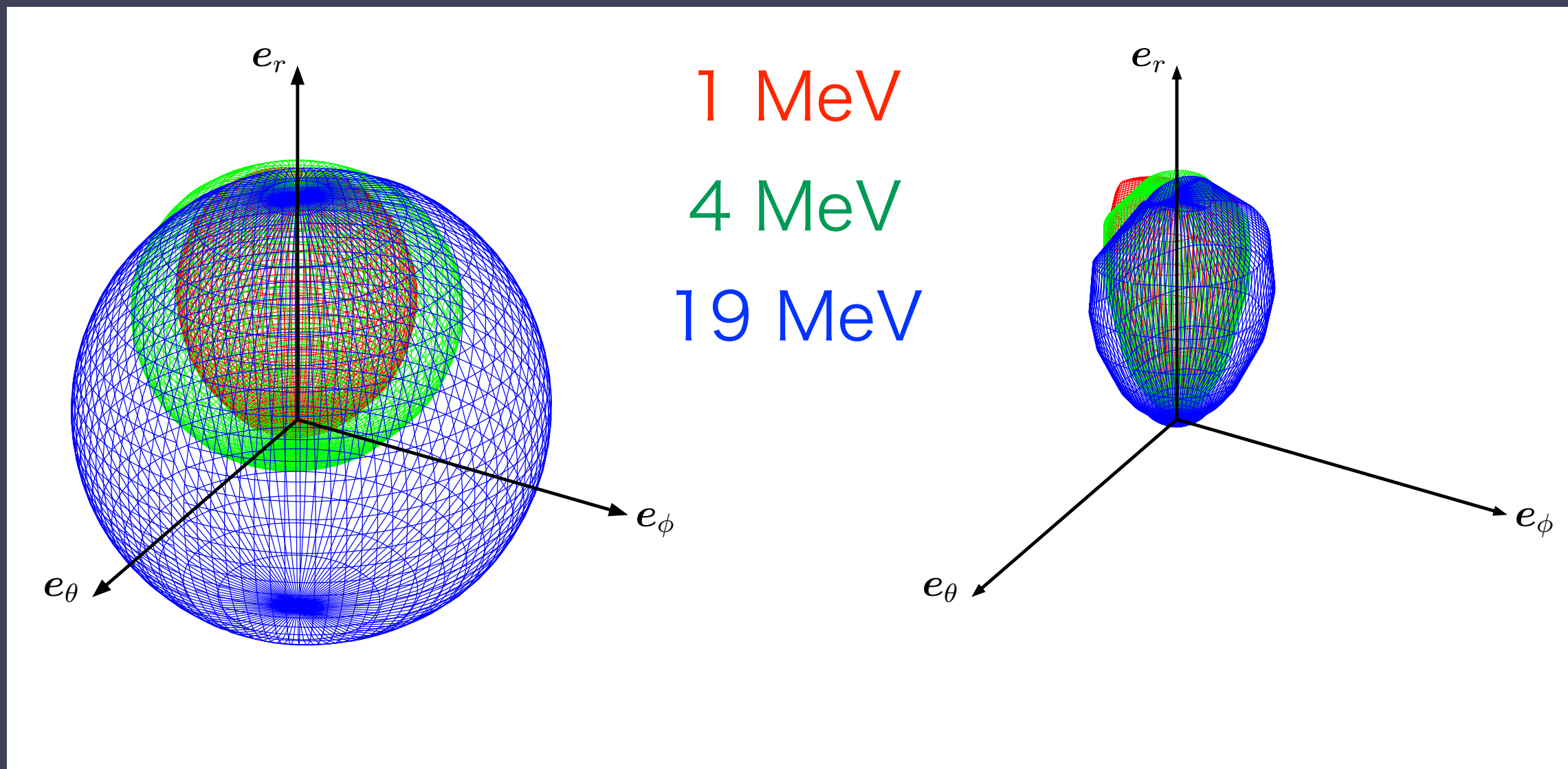
衝撃波の時間発展

- ・バウンス後~200 msまでの時間発展
- ・回転モデルと無回転モデルの比較



ニュートリノ角度分布

- ・バウンス後~10 msでの角度分布



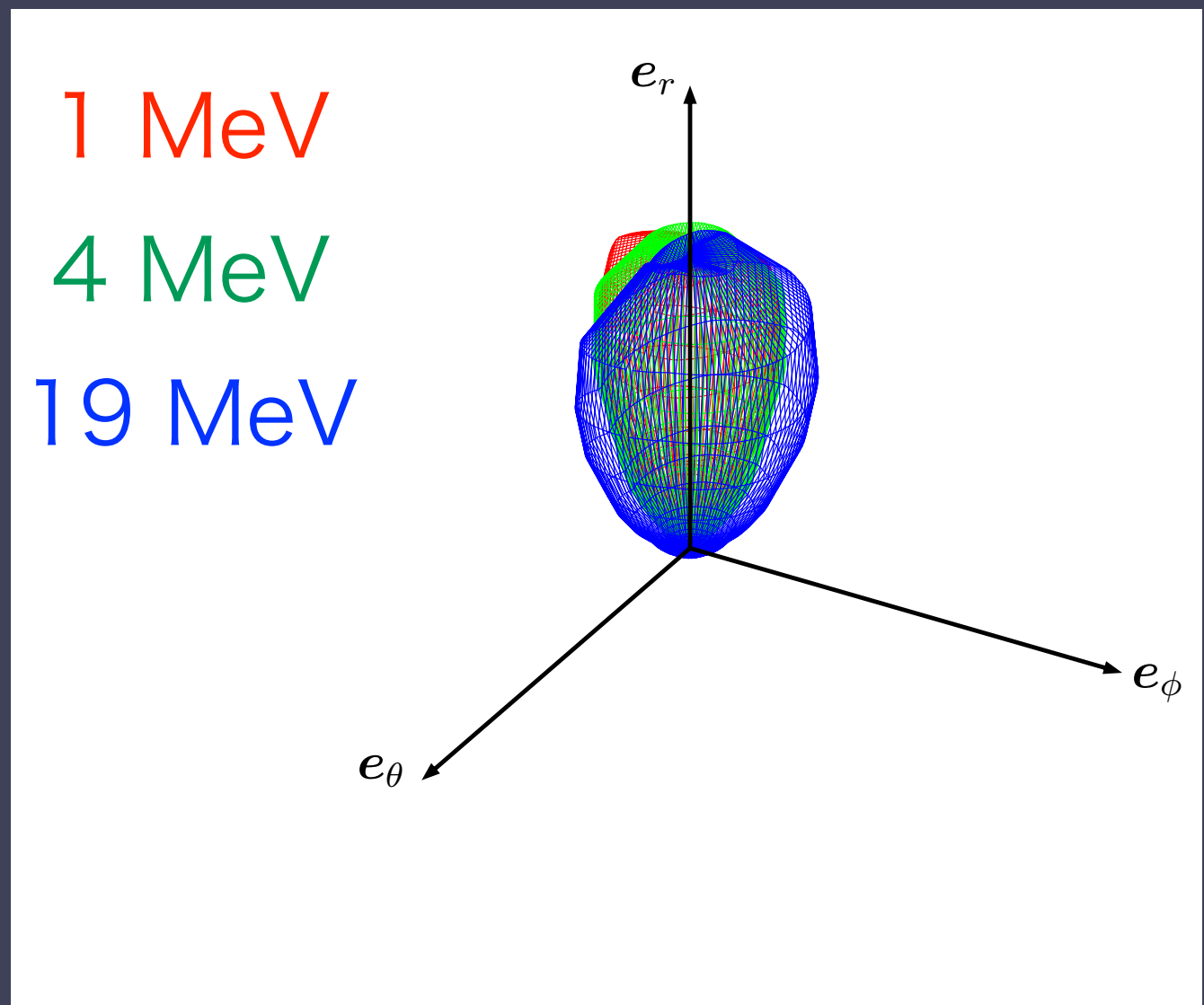
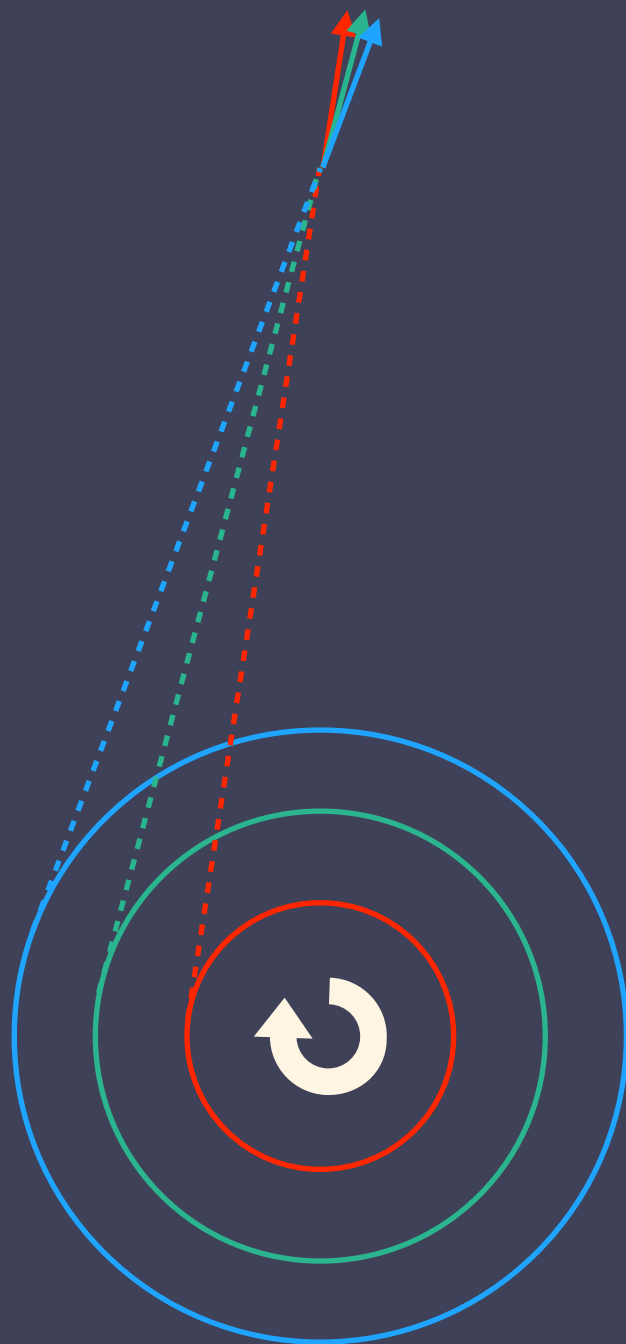
$\sim 60 \text{ km}$

$\sim 170 \text{ km}$

AH+(2018)

ニュートリノ角度分布

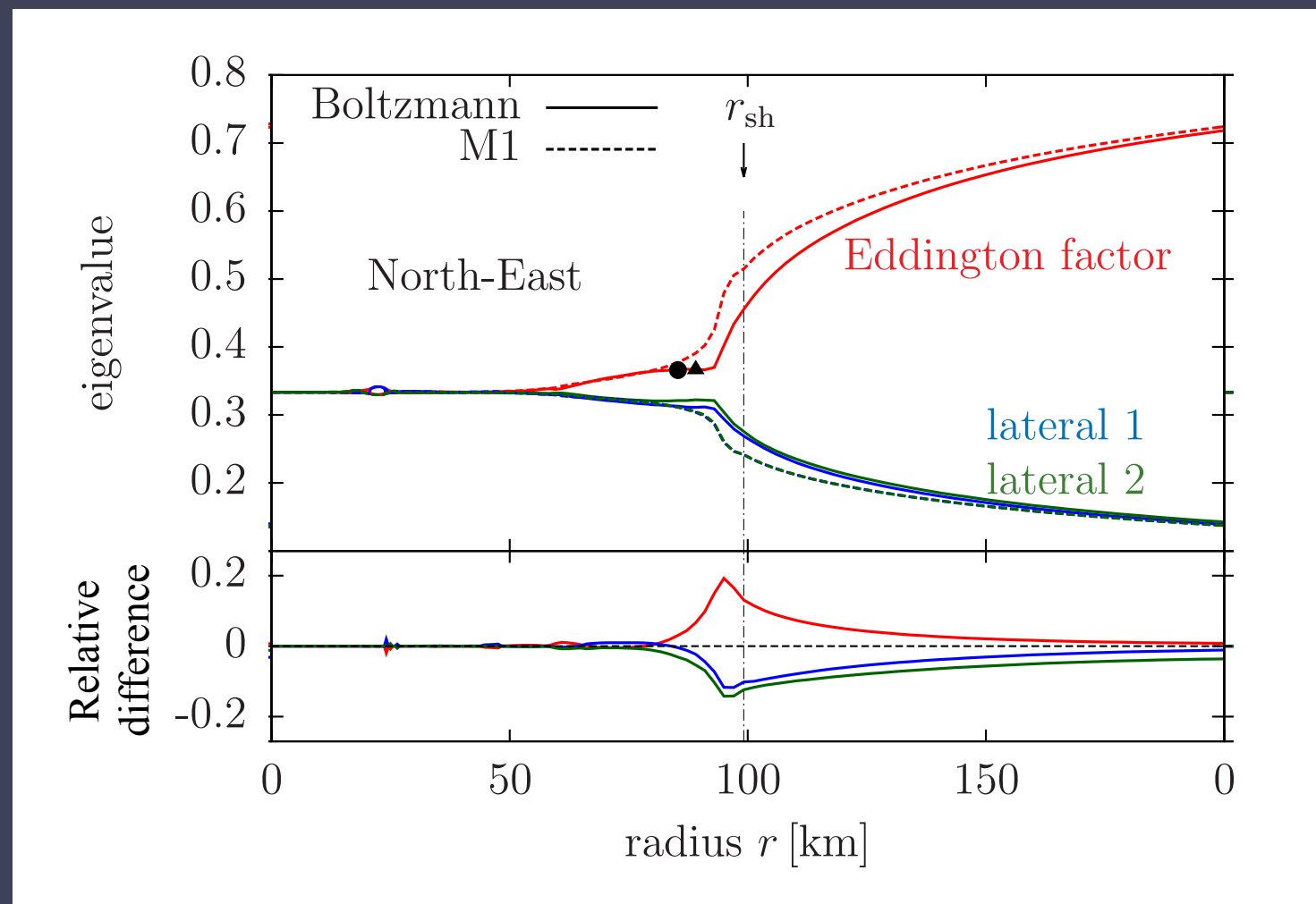
- ・バウンス後~10 msでの角度分布



~170 km
AH+(2018)

Eddington factor

- ・バウンス後~10 msでのEddingtonテンソル
- ・分布関数からのものとM1法によるものとの比較
- ・~20%の違い

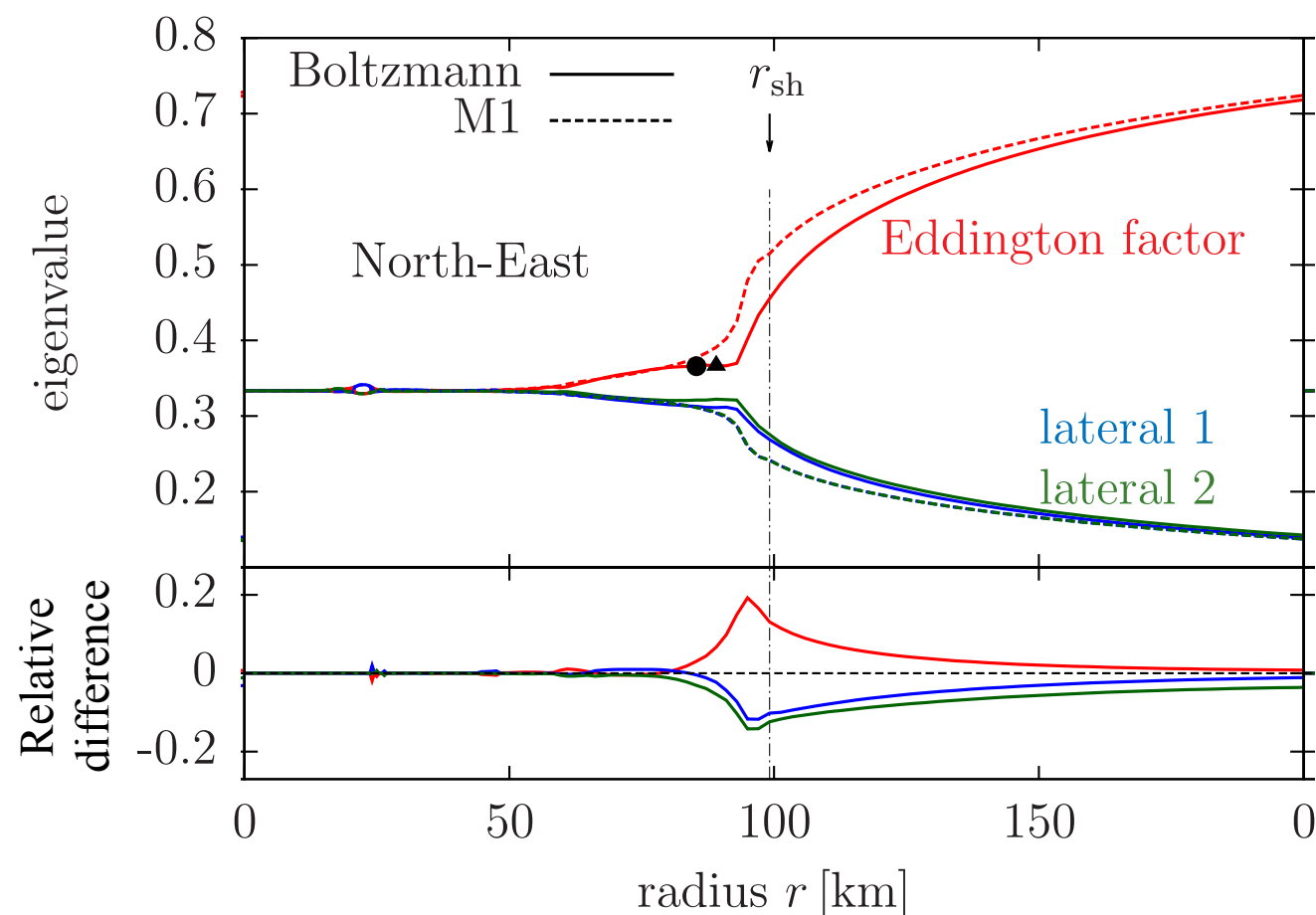


AH+(2018)

Eddington factor

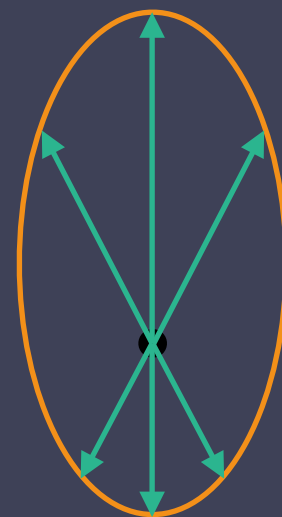
- ・バウンス後~10 msでのEddingtonテンソル
- ・分布関数からのものとM1法によるものとの比較

- ・分布のProlate具合
- ・M1: フラックスから予測



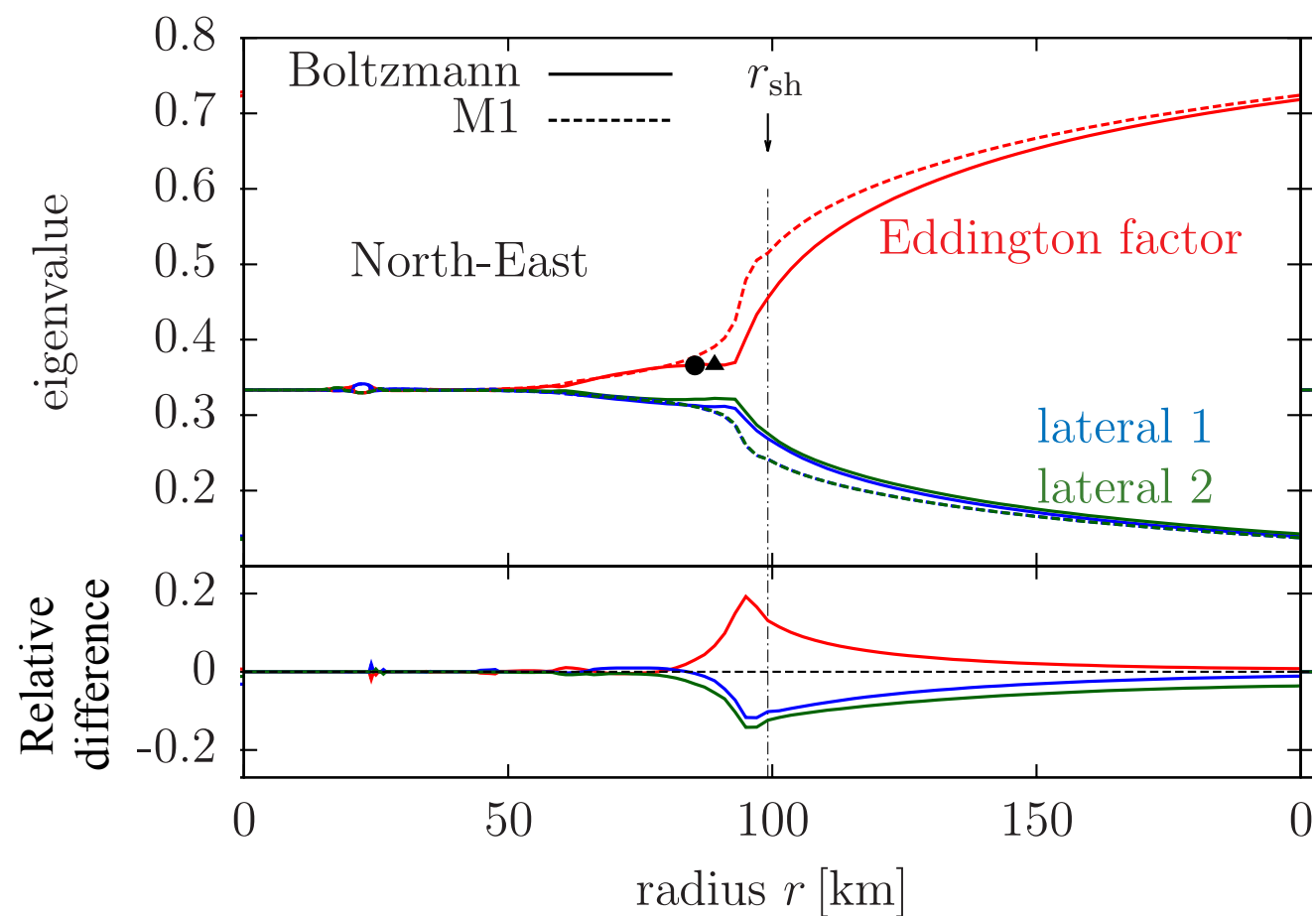
外向き

内向き



Eddington factor

- ・バウンス後~10 msでのEddingtonテンソル
- ・分布関数からのものとM1法によるものとの比較
- ・これらの状況を区別できる情報があればM1法を改善できる可能性

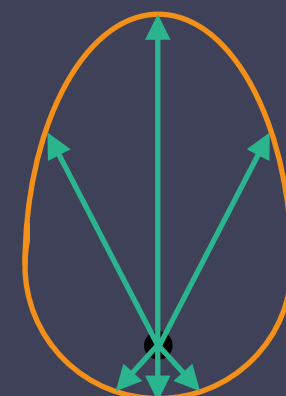


AH+(2018)

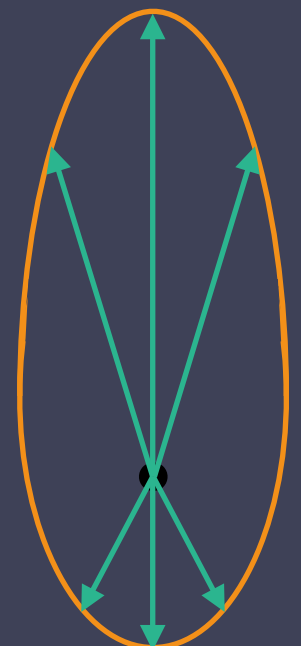
外向き



内向き

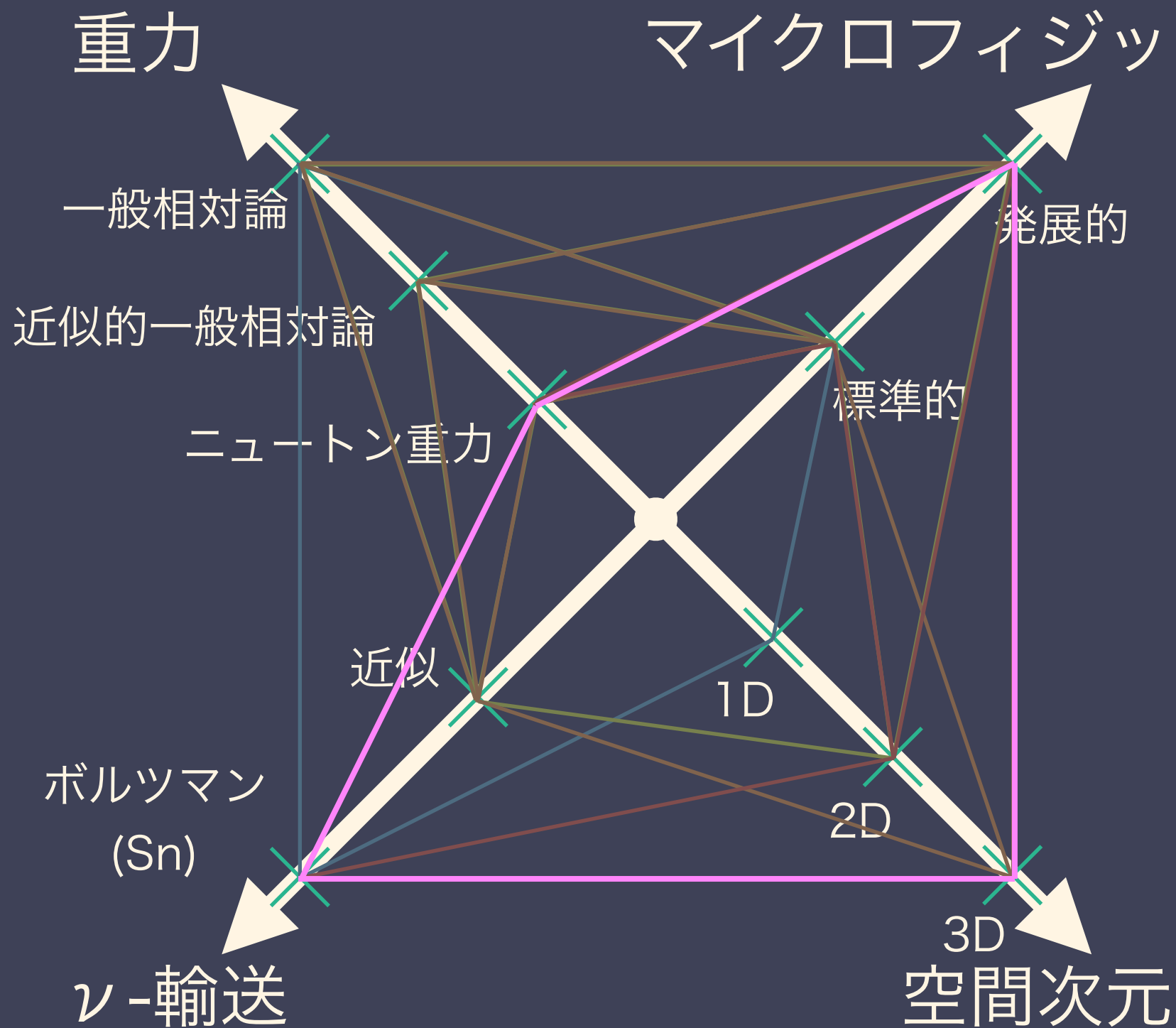


実際



M1

今後の展望



1D: 爆発失敗

2D: 衝撃波復活

エネルギー不十分

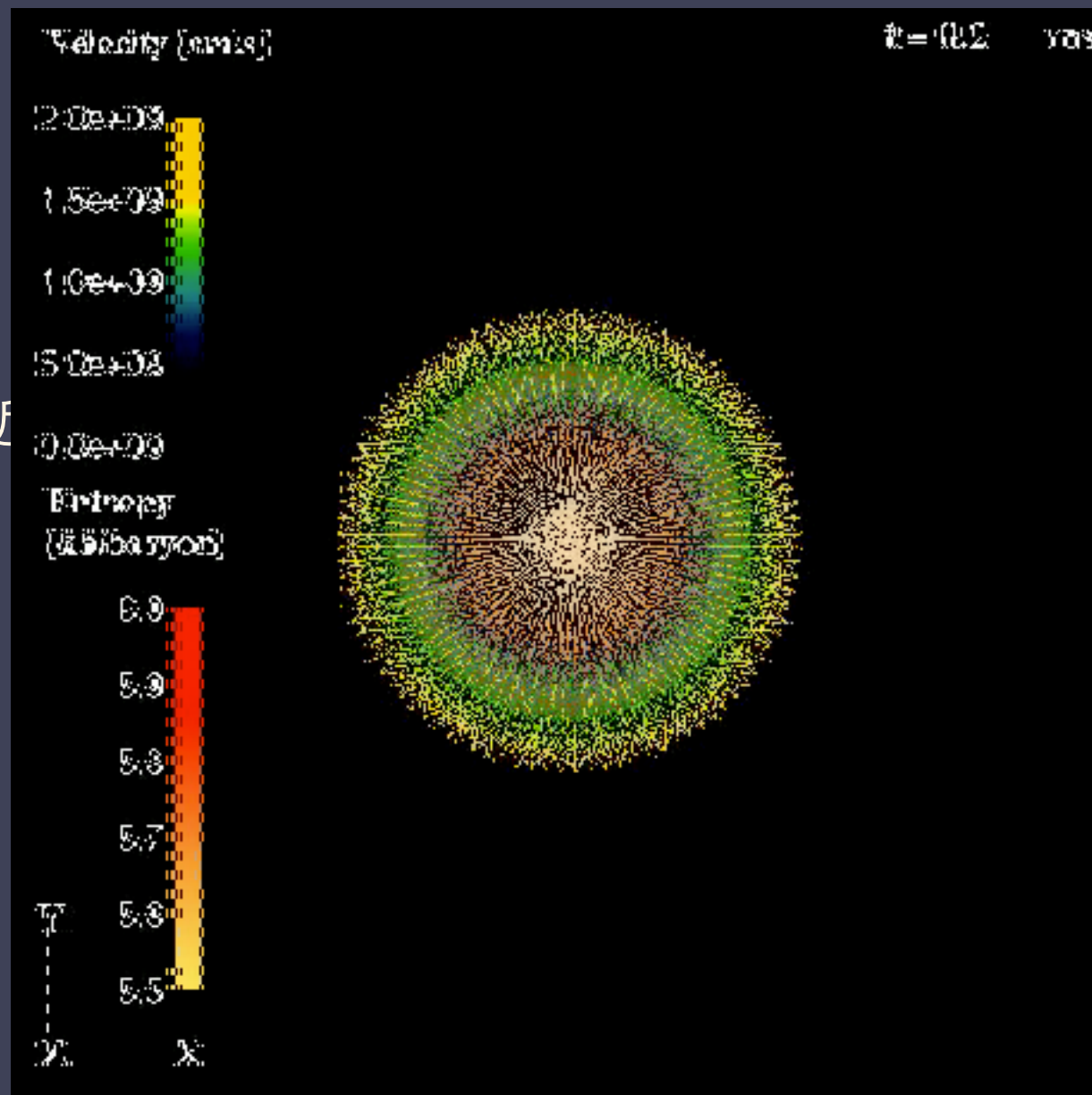
3D: 衝撃波復活

エネルギー不十分

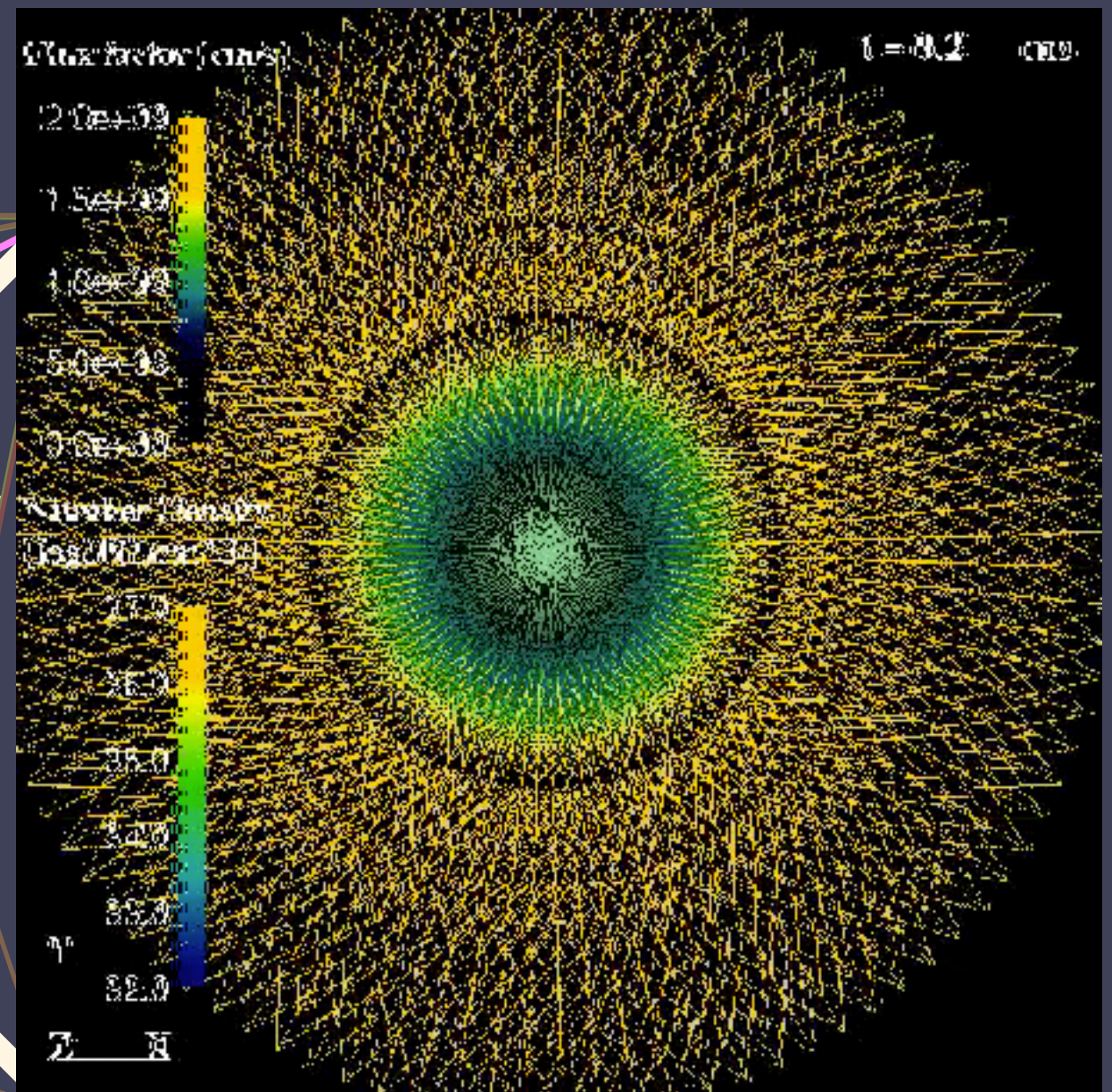
我々の計算

3Dボルツマン

今後の展望



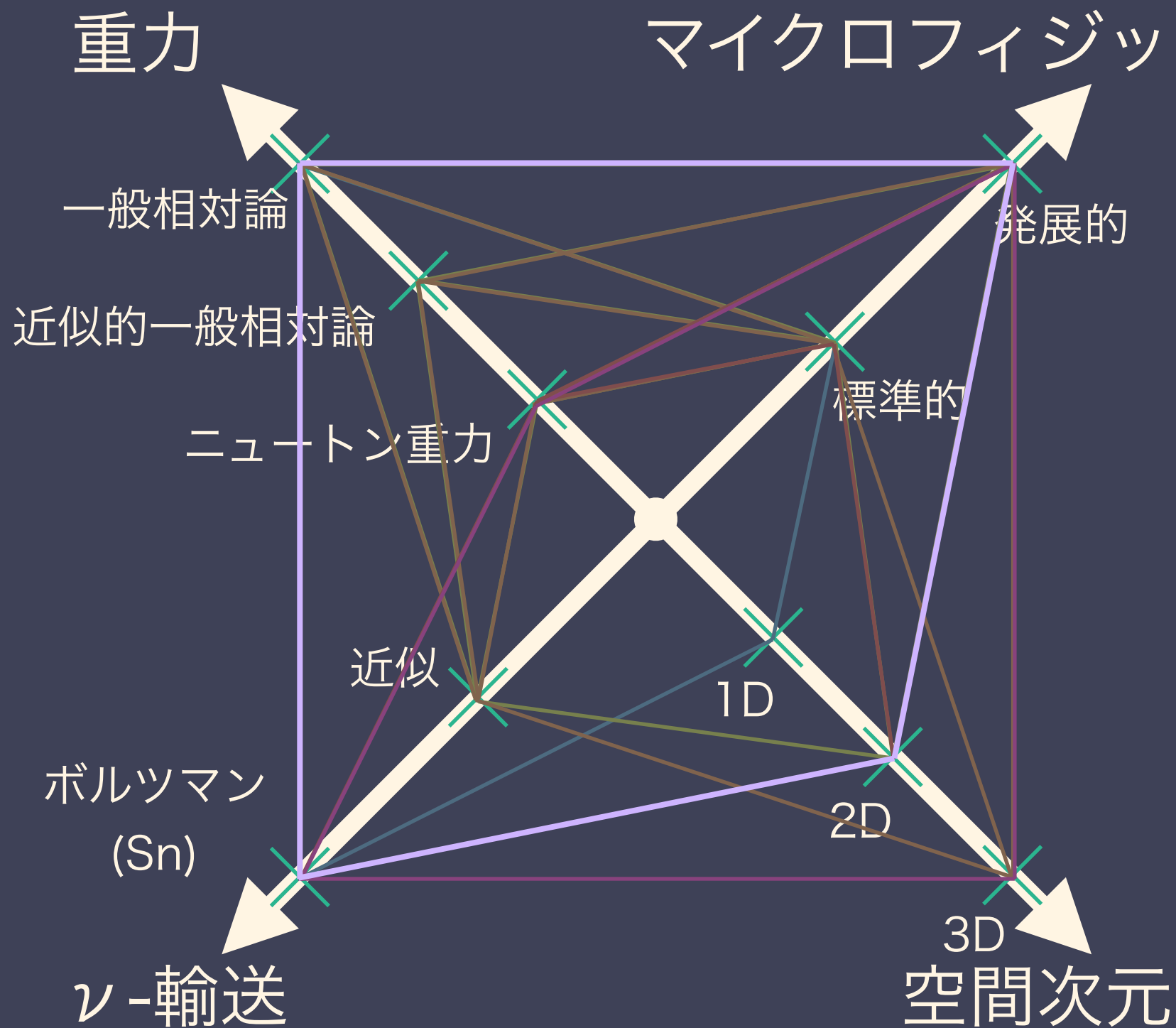
ν -輸送



3D
空間次元

Iwakami+ in prep.

今後の展望



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

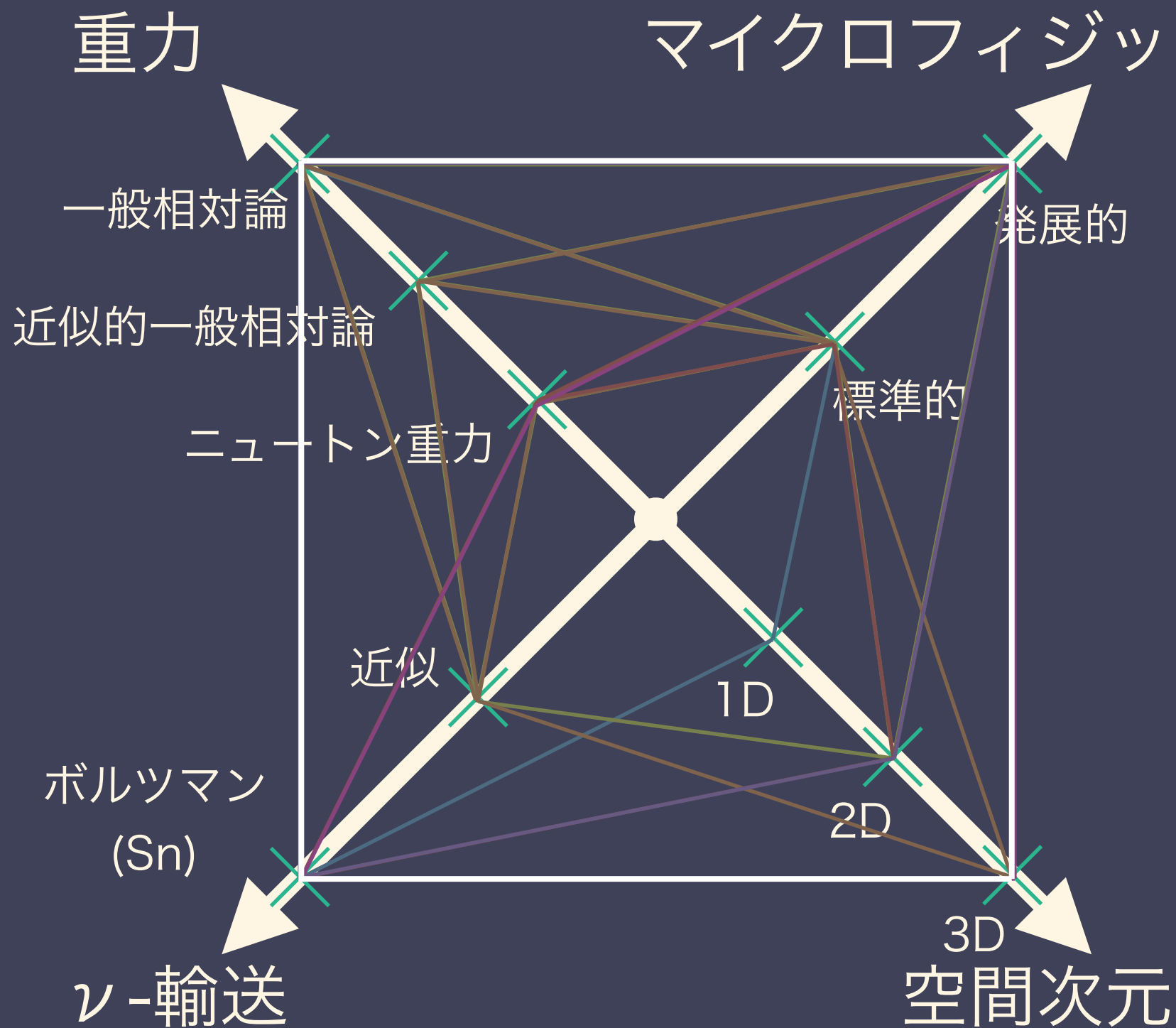
エネルギー不十分

我々の計算

3Dボルツマン

GRボルツマン

今後の展望



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

3Dボルツマン

GRボルツマン

Summary

- ・ ボルツマン輻射流体コードによって軸対称超新星爆発シミュレーションを行った
- ・ 核物質状態方程式の原子核組成が重要な役割を果たす可能性
- ・ ボルツマンコードでのみ得られるユニークな特徴
- ・ さらなるコード開発も進行中

