

ボルツマン輻射流体コードによる 軸対称超新星爆発シミュレーション

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



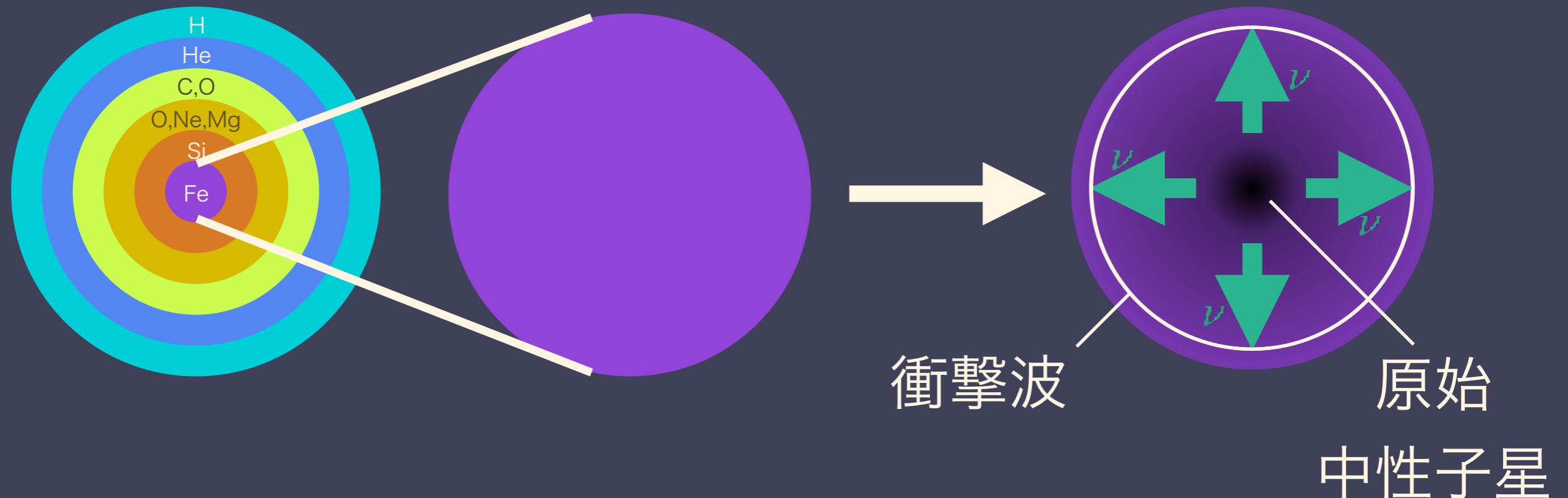
SN1987A

©NASA, ESA/Hubble

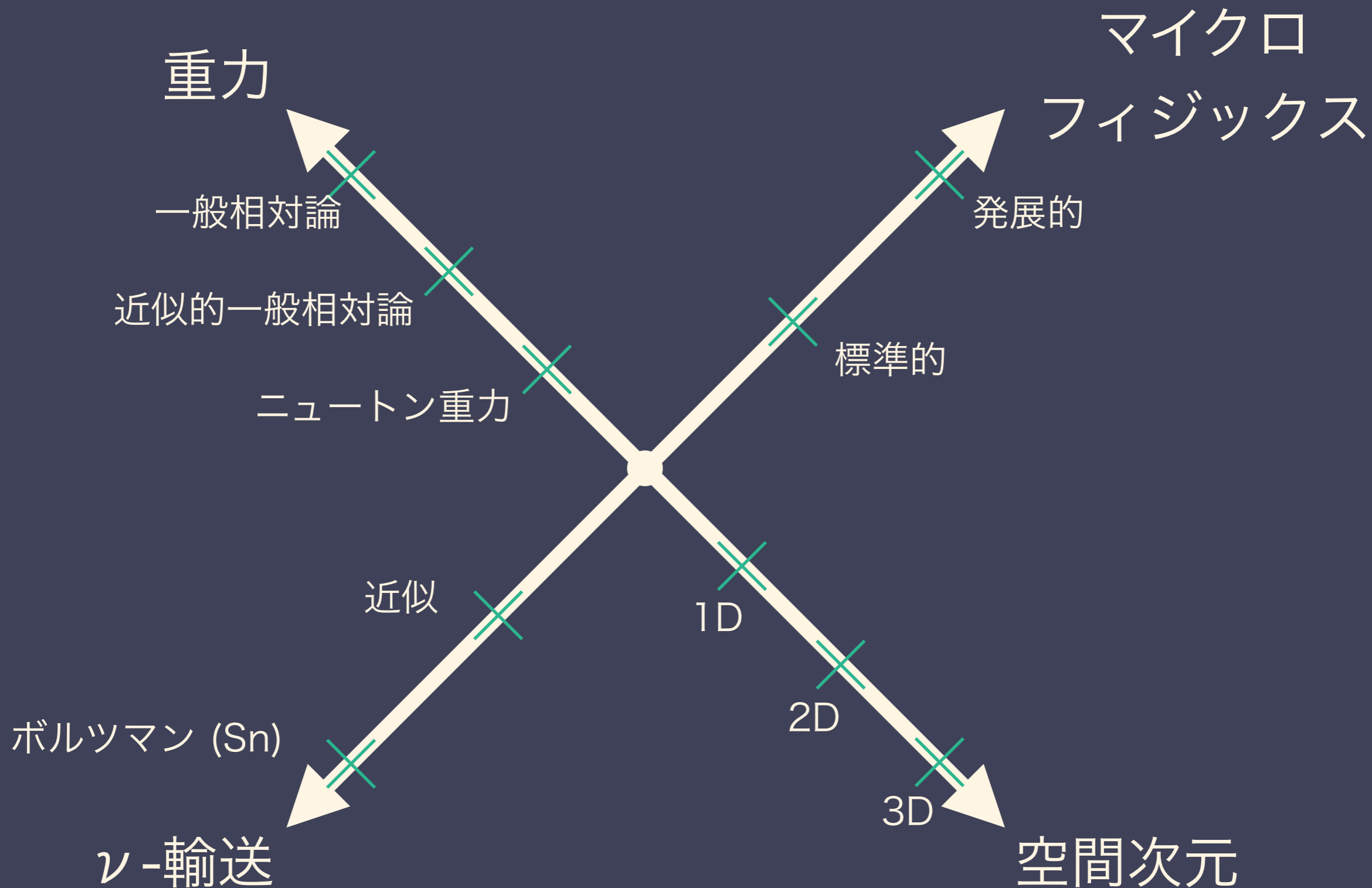
超新星爆発メカニズム

- ・ 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

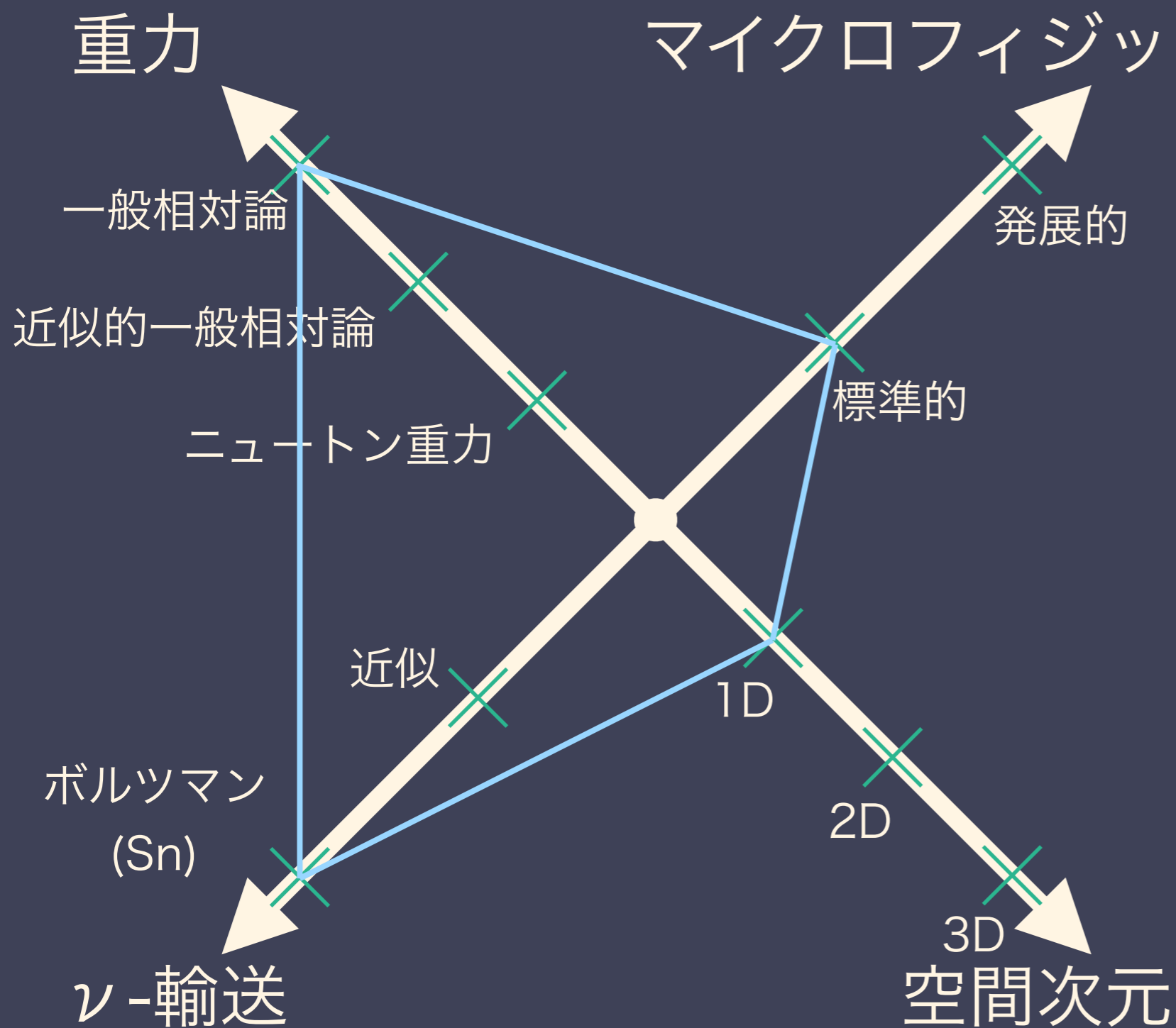
→ニュートリノ加熱メカニズム



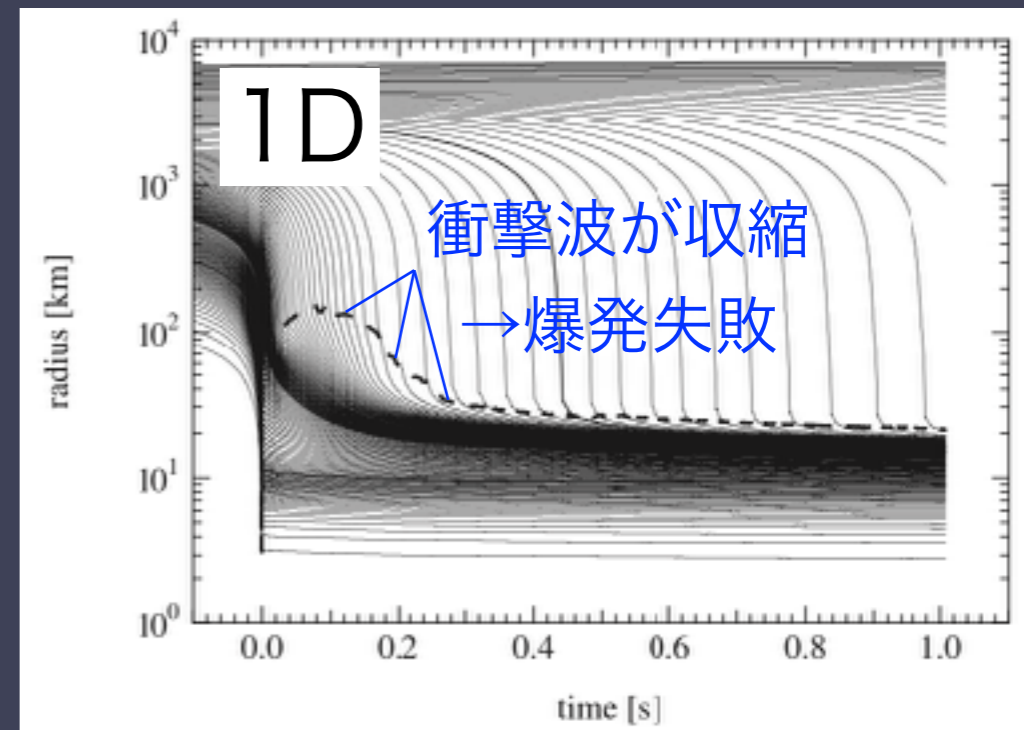
超新星の理論的進展



超新星の理論的進展

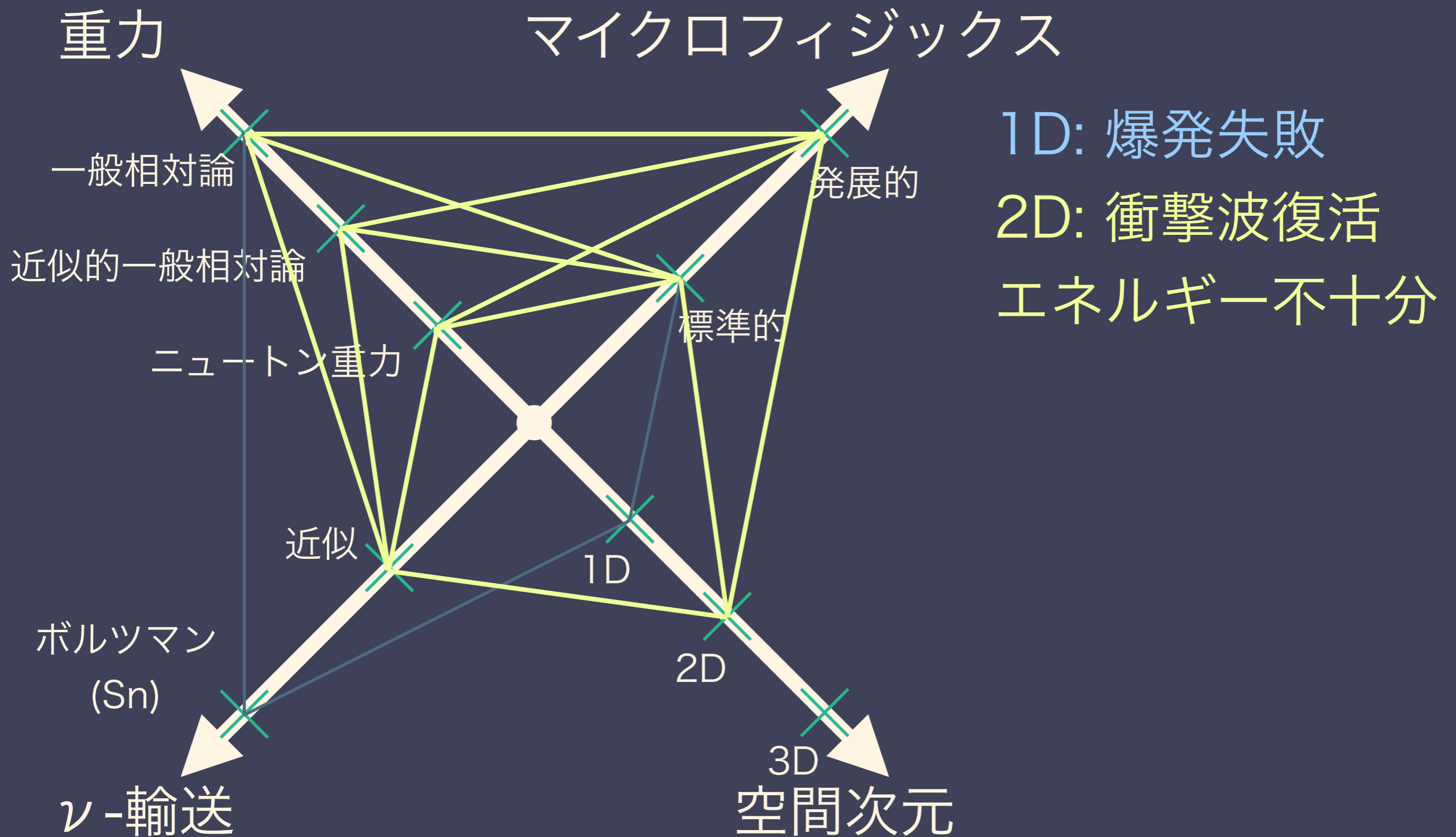


1D: 爆発失敗



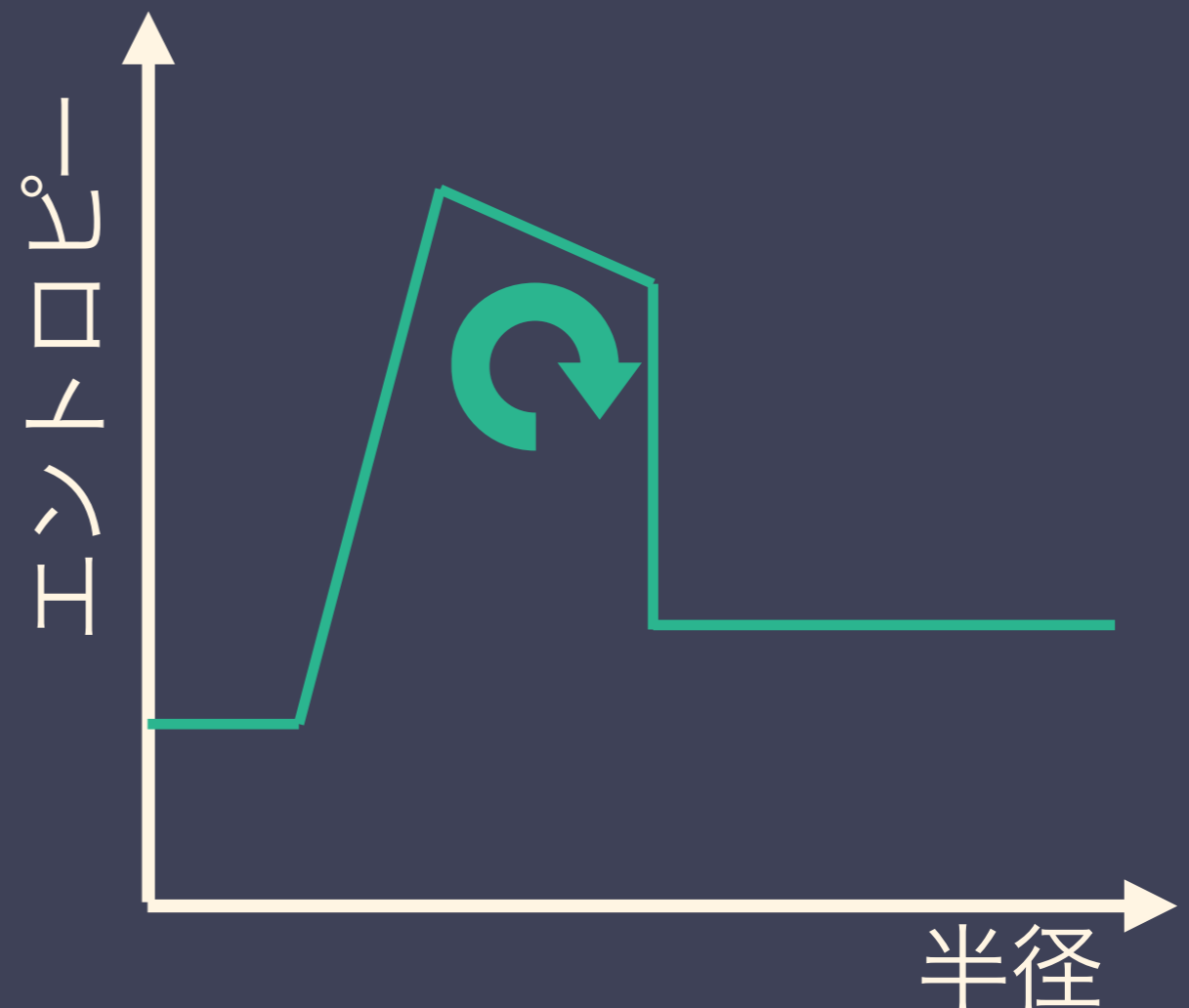
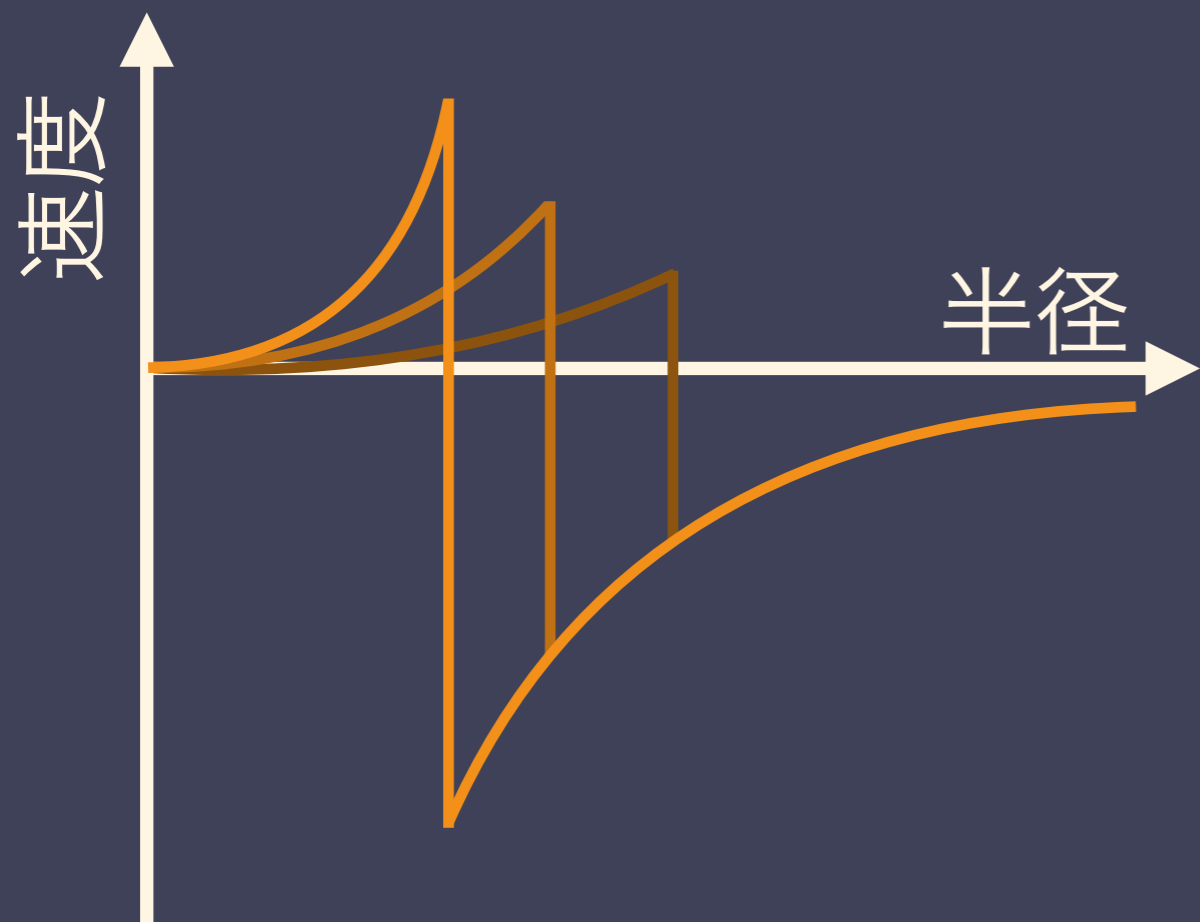
Sumiyoshi+(2005)

超新星の理論的進展

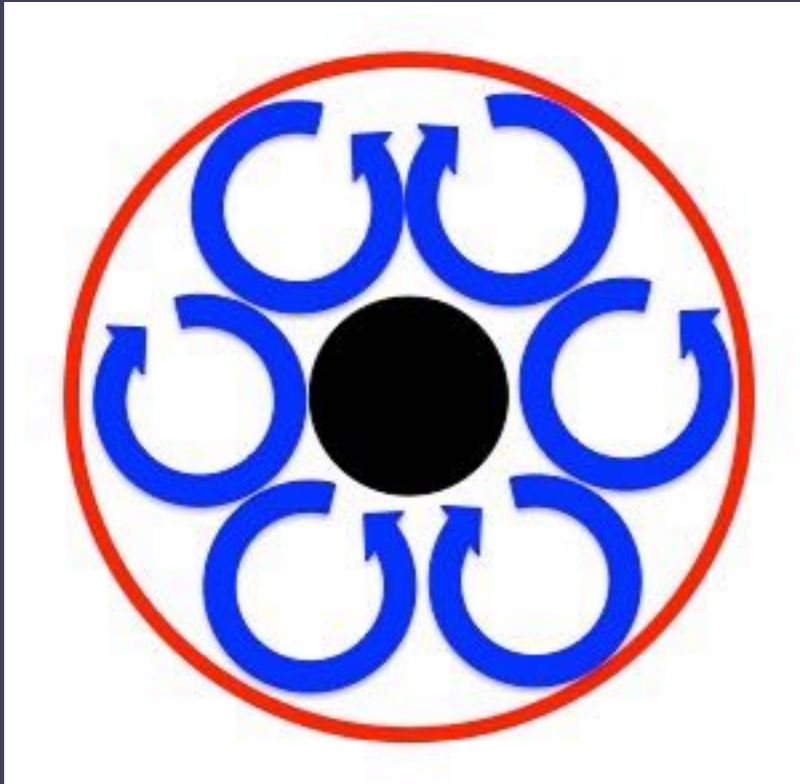


多次元効果-流体不安定性

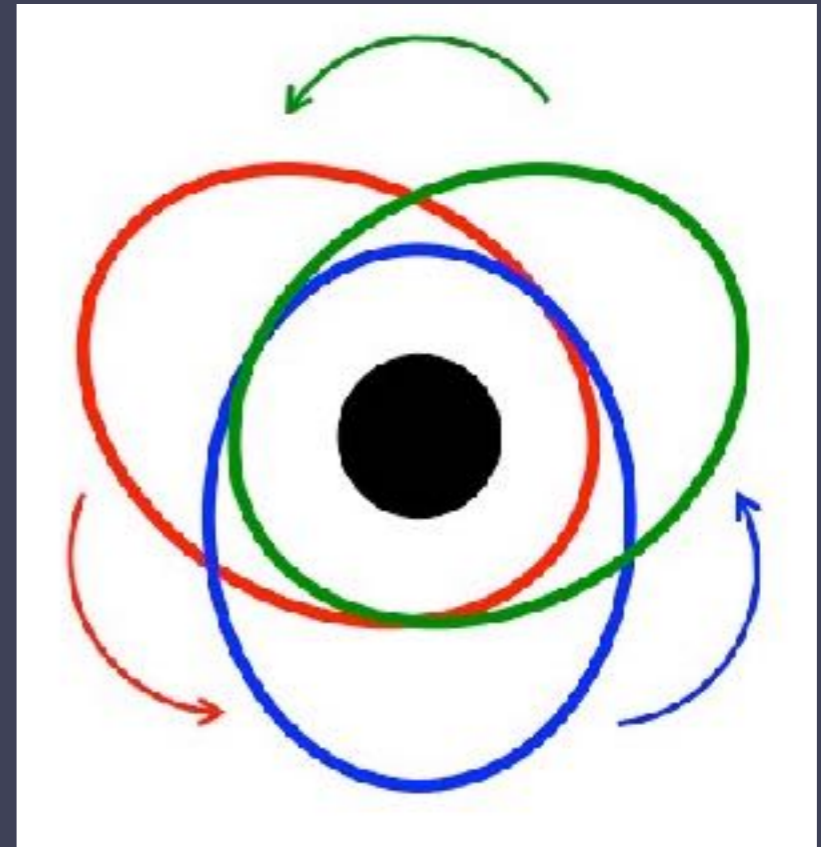
- Prompt convection:
 - ▶ 衝撃波がエネルギーを失いながら伝搬
 - ▶ 負のエントロピー勾配を形成
 - ▶ 対流が発達



多次元効果-流体不安定性



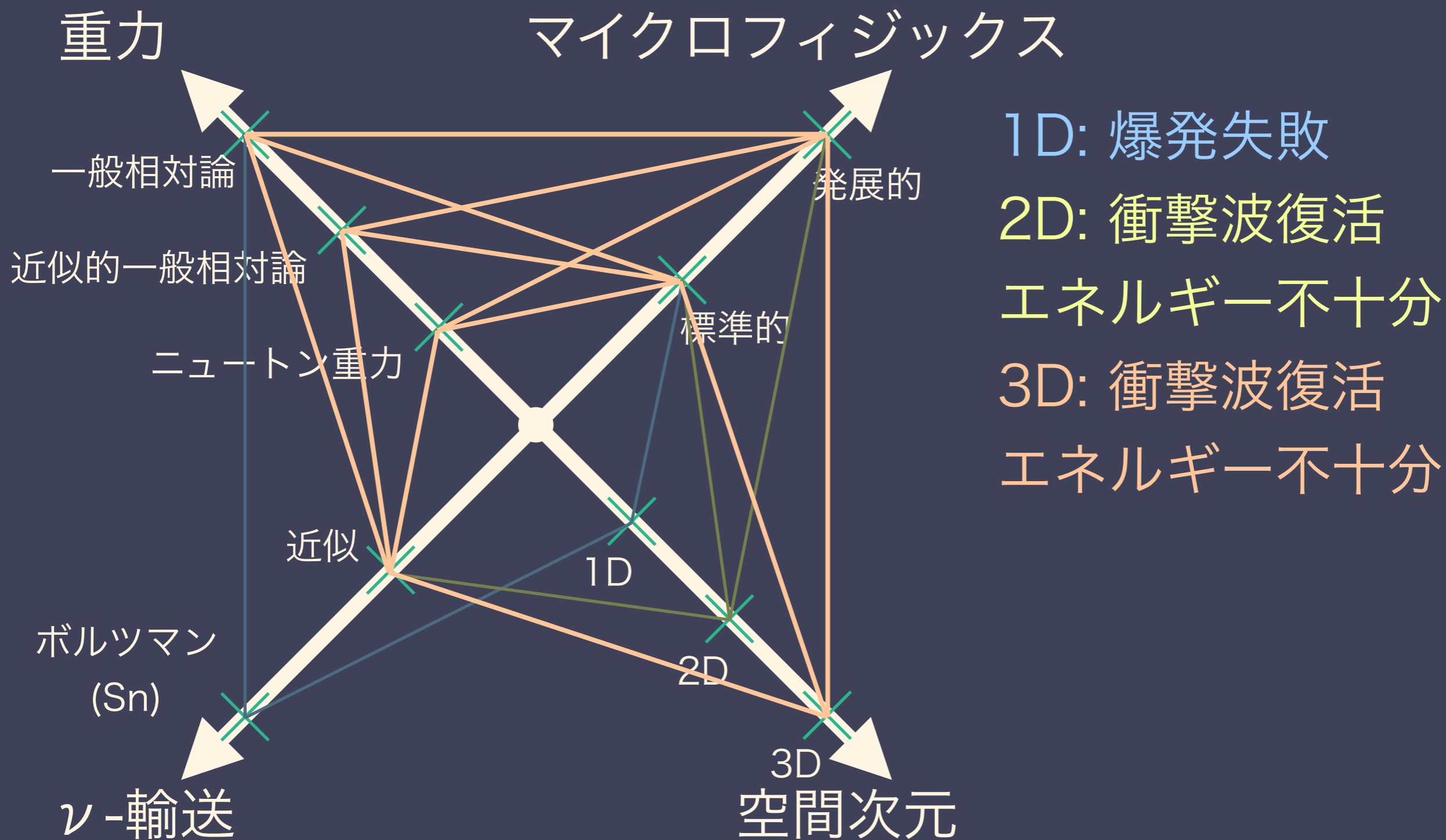
ニュートリノ駆動対流



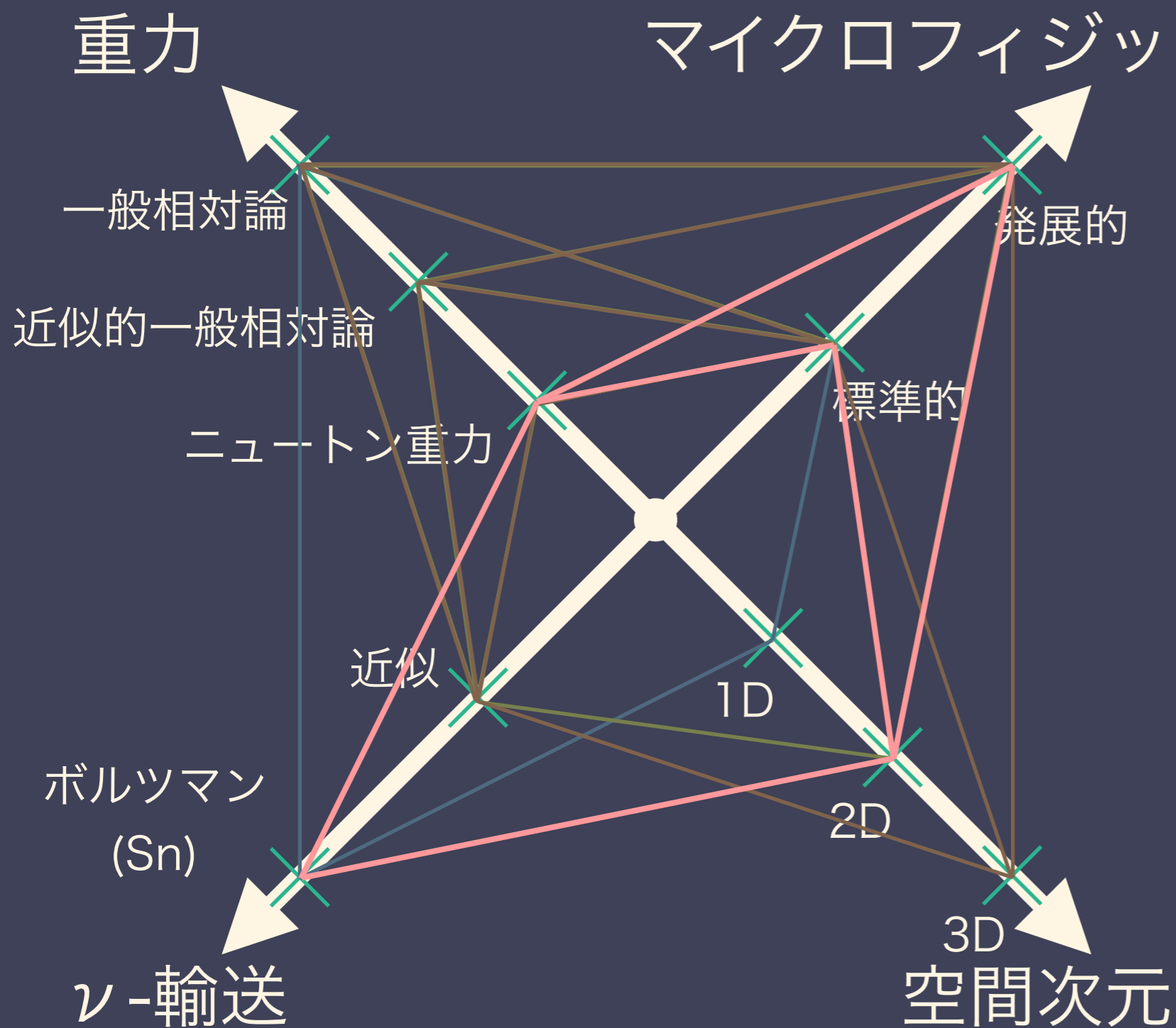
SASI

- ・ 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

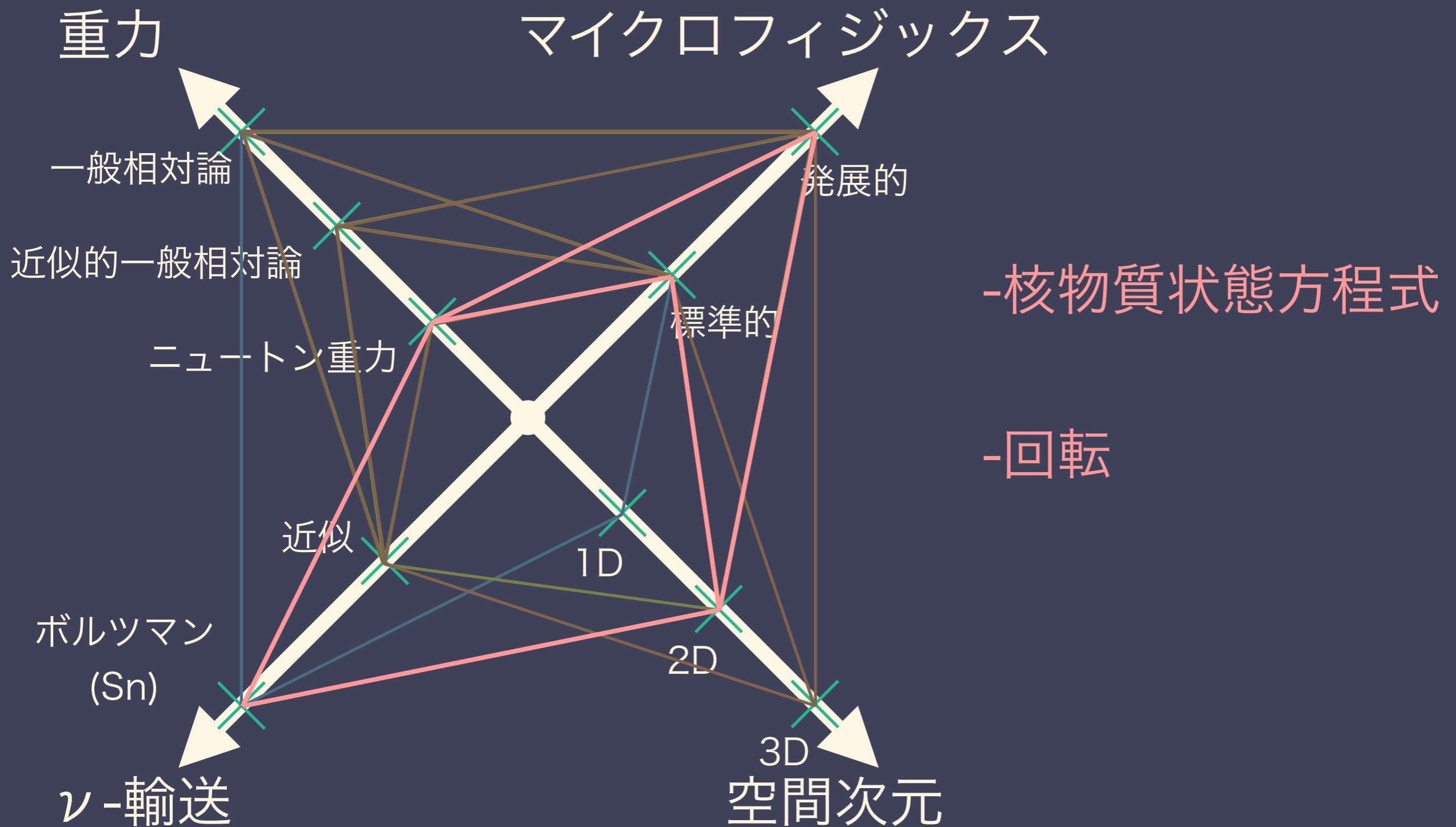
エネルギー不十分

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



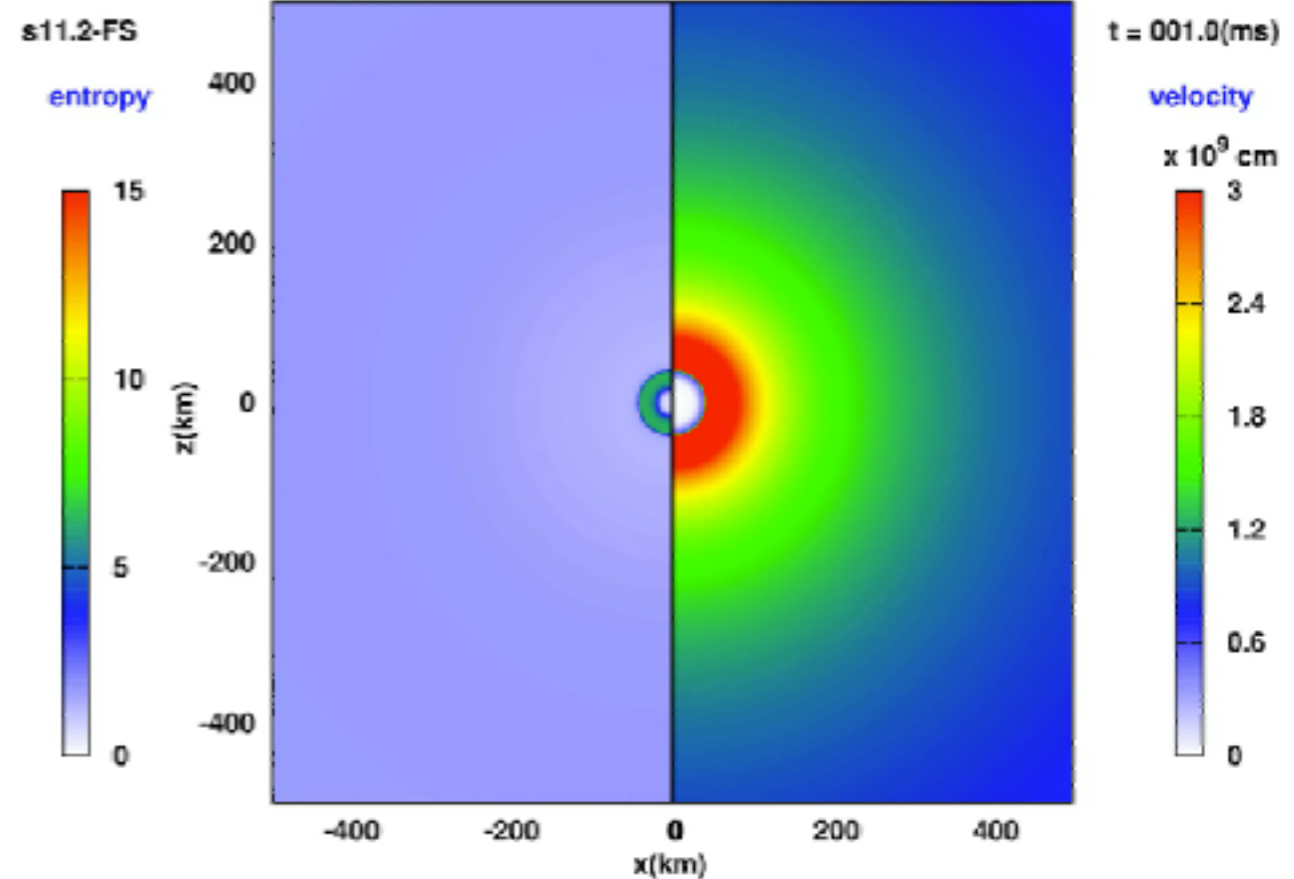
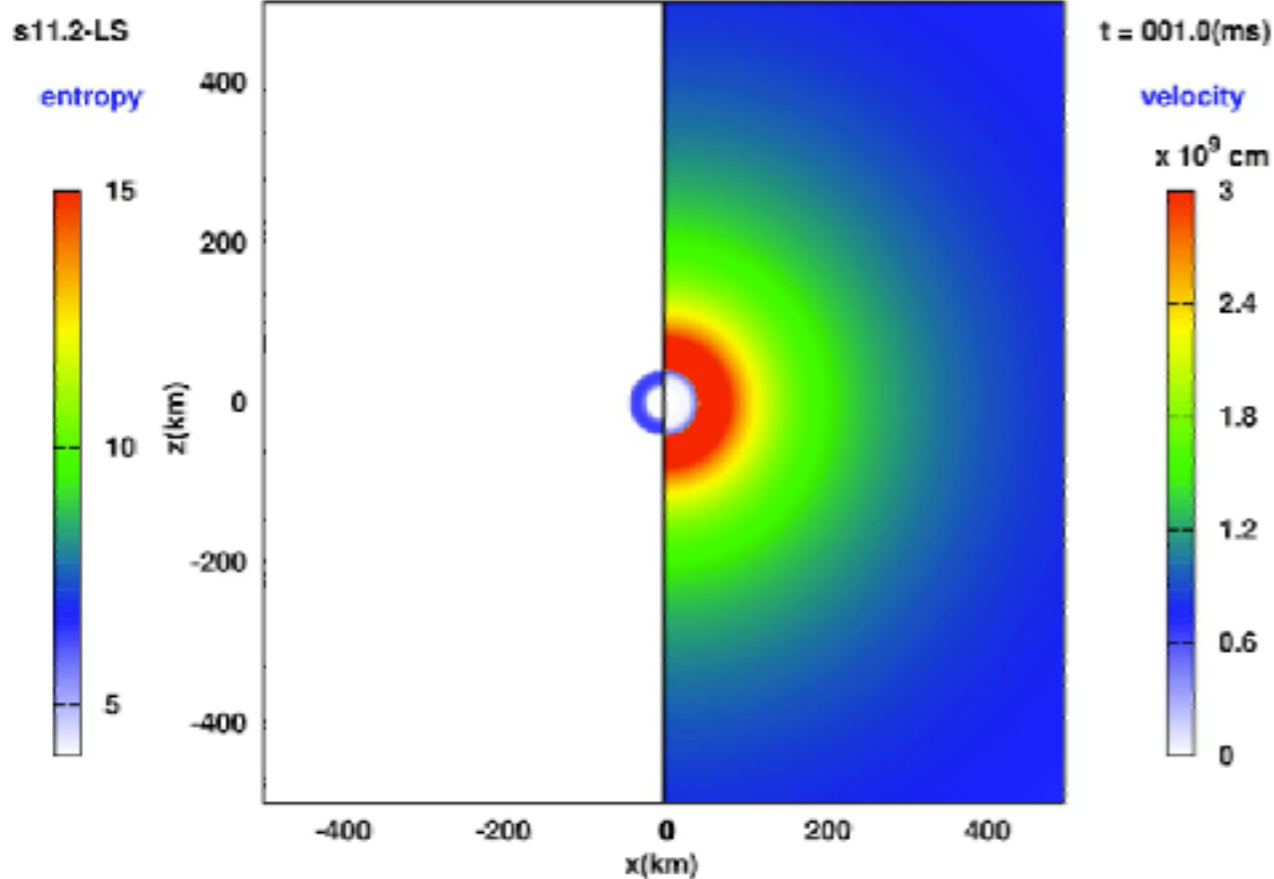
- Lattimer-Swesty (LS) 状態方程式と
Skyrm型、SNA

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

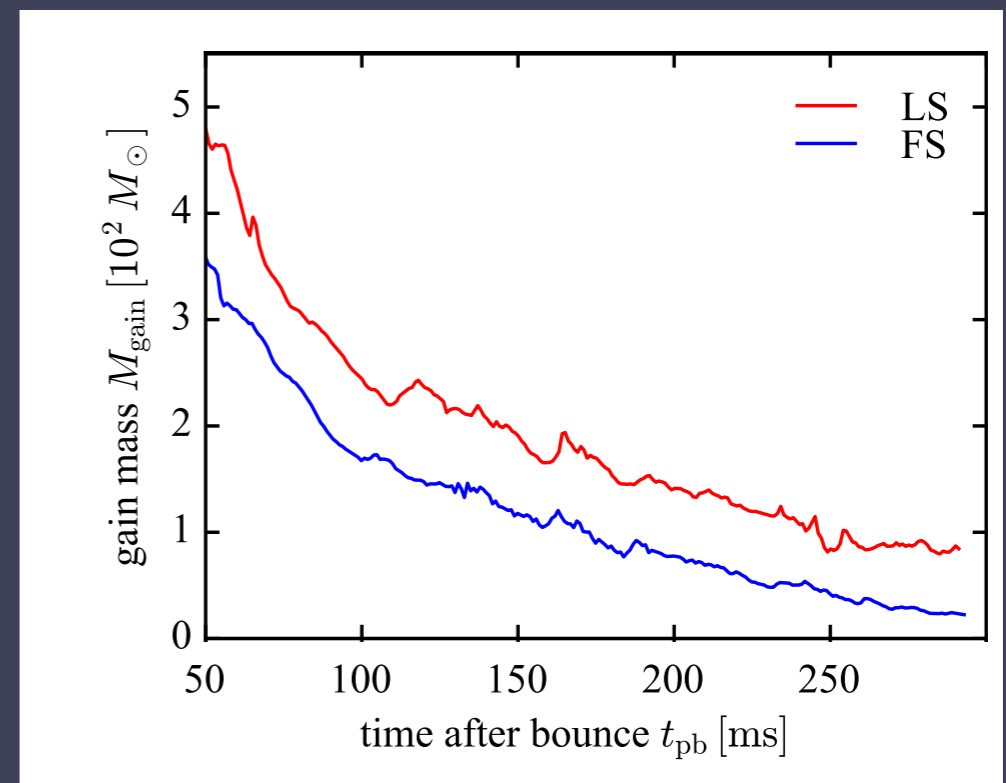
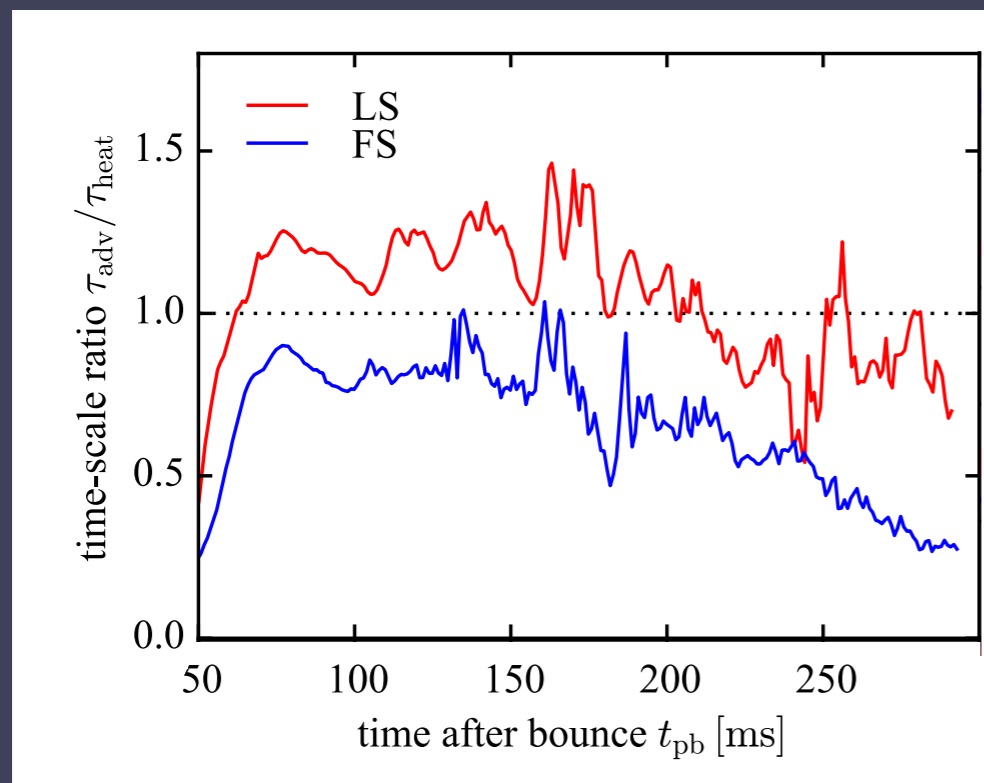
- ・ エントロピーと速度のカラーマップ



Timescale ratio

- 衝撃波はtimescale ratioが1を超えた時に復活する:

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

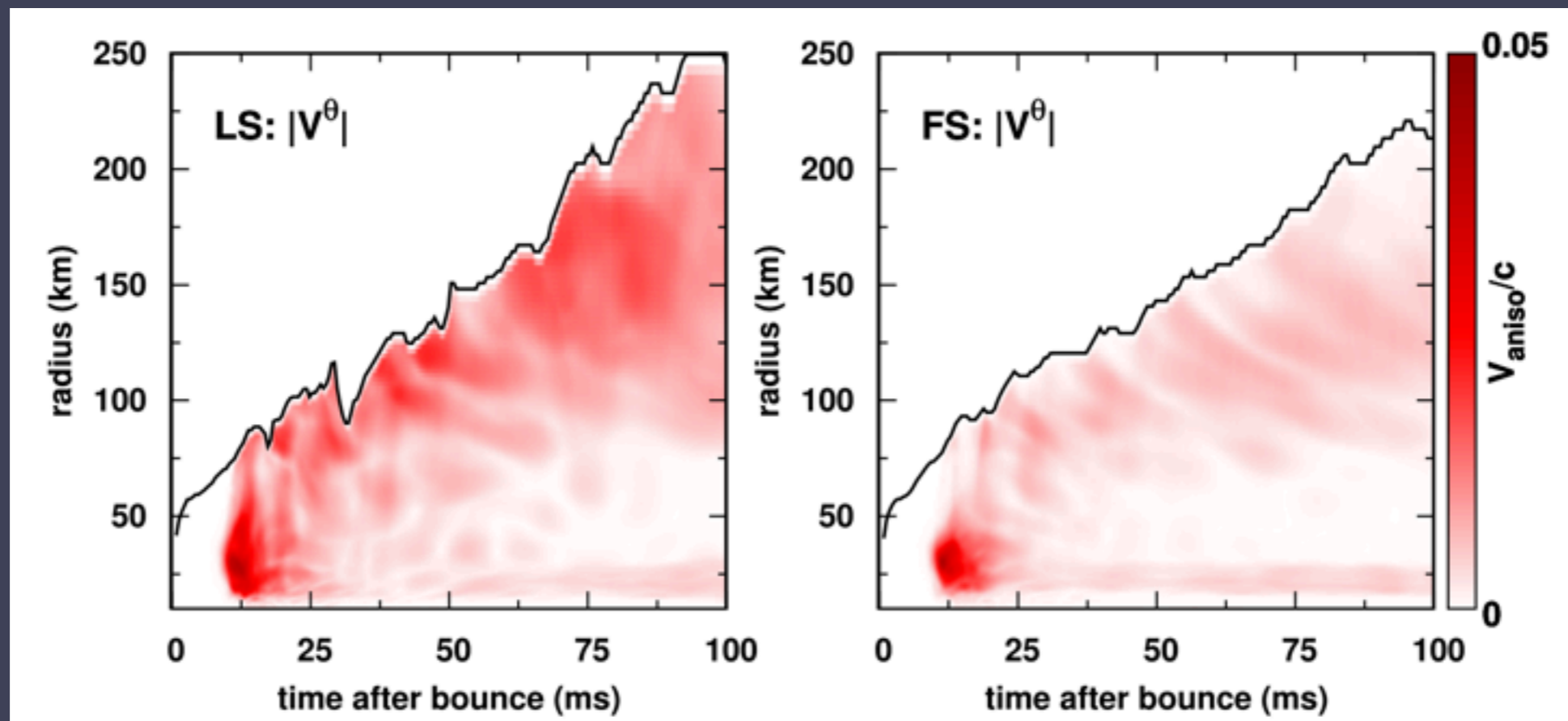


AH+ in prep.

- M_{gain} だけが違い、LSのほうが大きい

乱流の強さの違い

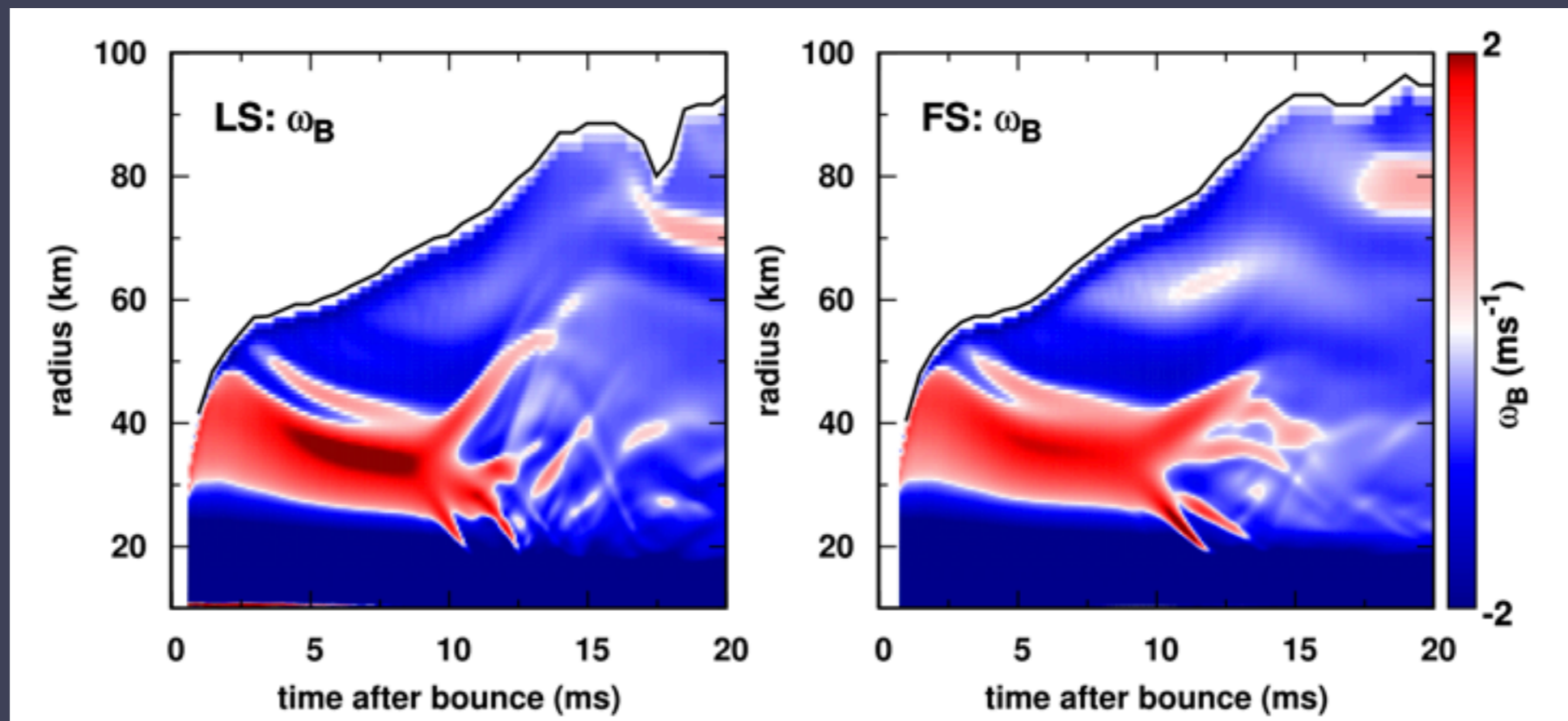
- M_{gain} だけが違い、LSのほうが大きい
- LSモデルのほうが乱流が強い



Nagakura+(2018)

乱流の強さの違い

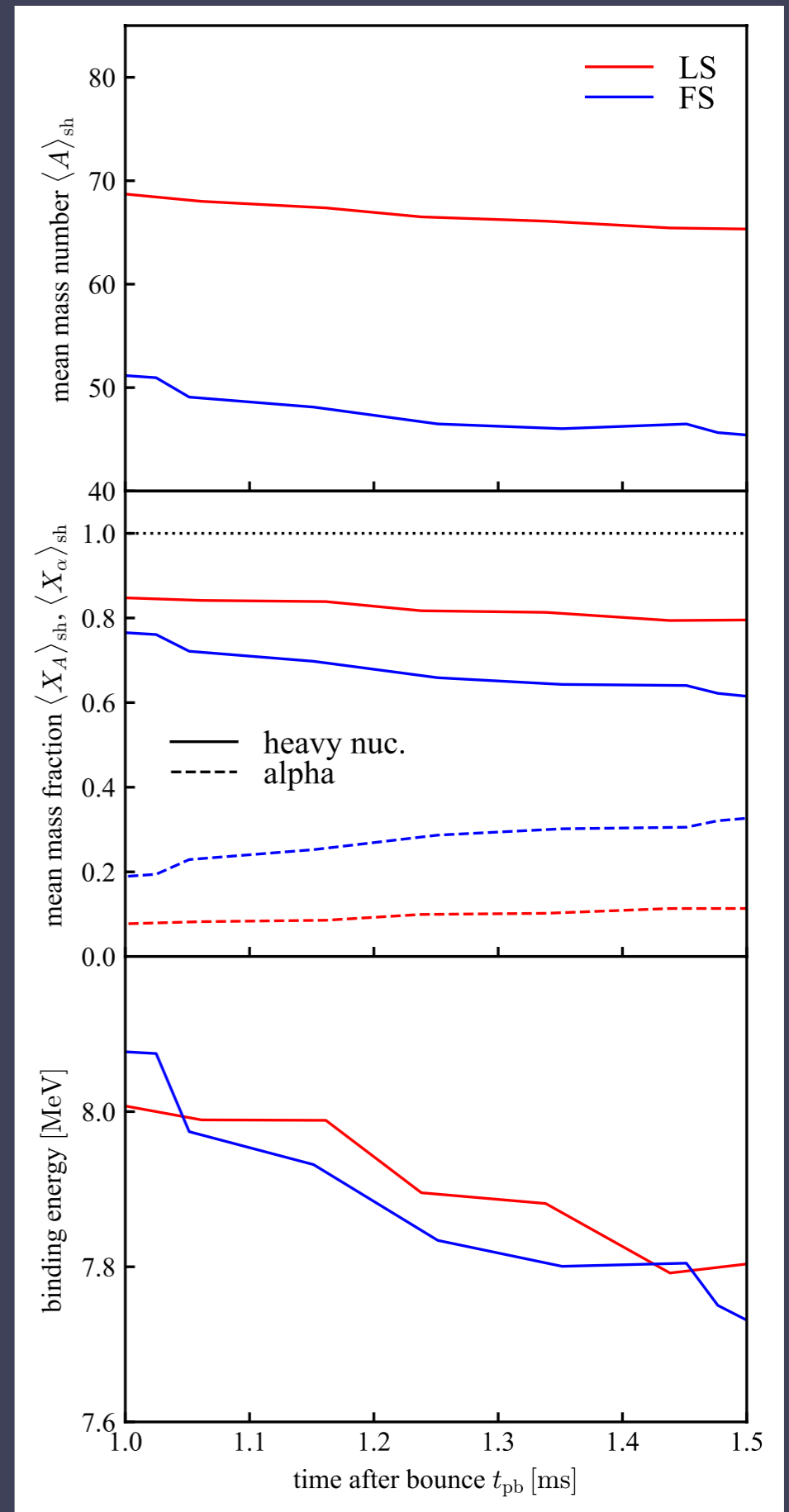
- M_{gain} だけが違い、LSのほうが大きい
- LSモデルのほうが乱流が強い
- 対流成長率(Brunt-Vaisala振動数)も大きい



Nagakura+(2018)

原子核組成の違い

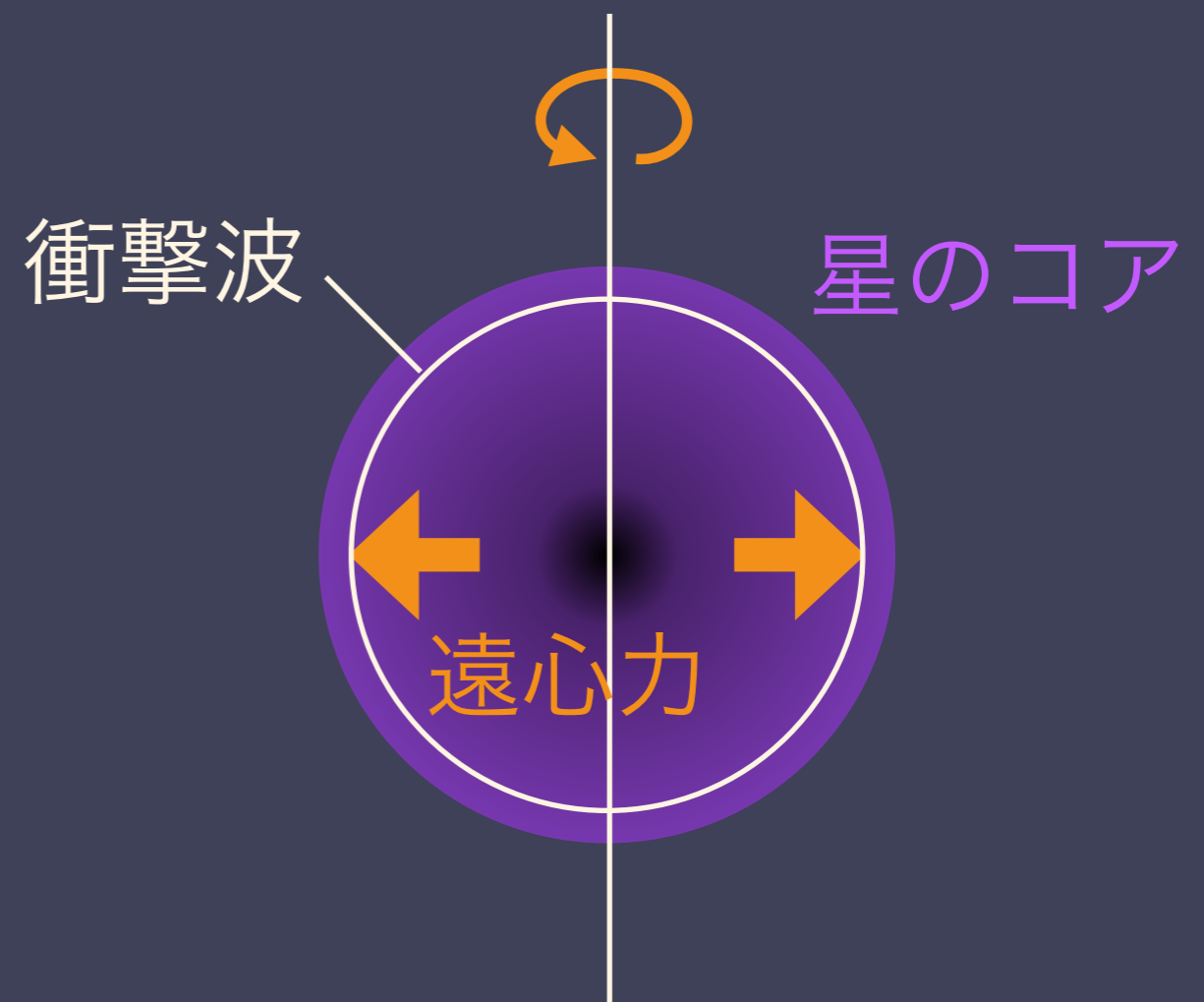
- ・ 降着流の原子核組成が違う:
 - ▶ LS: 重原子核が多く降着してくる
 - ▶ FS: α 粒子が多く降着してくる
- ▶ LSのほうが光分解で多くのエネルギーを消費
- ▶ 衝撃波が急激に弱まり、急峻なエントロピー勾配を形成
- ▶ Prompt convectionが強い



回転

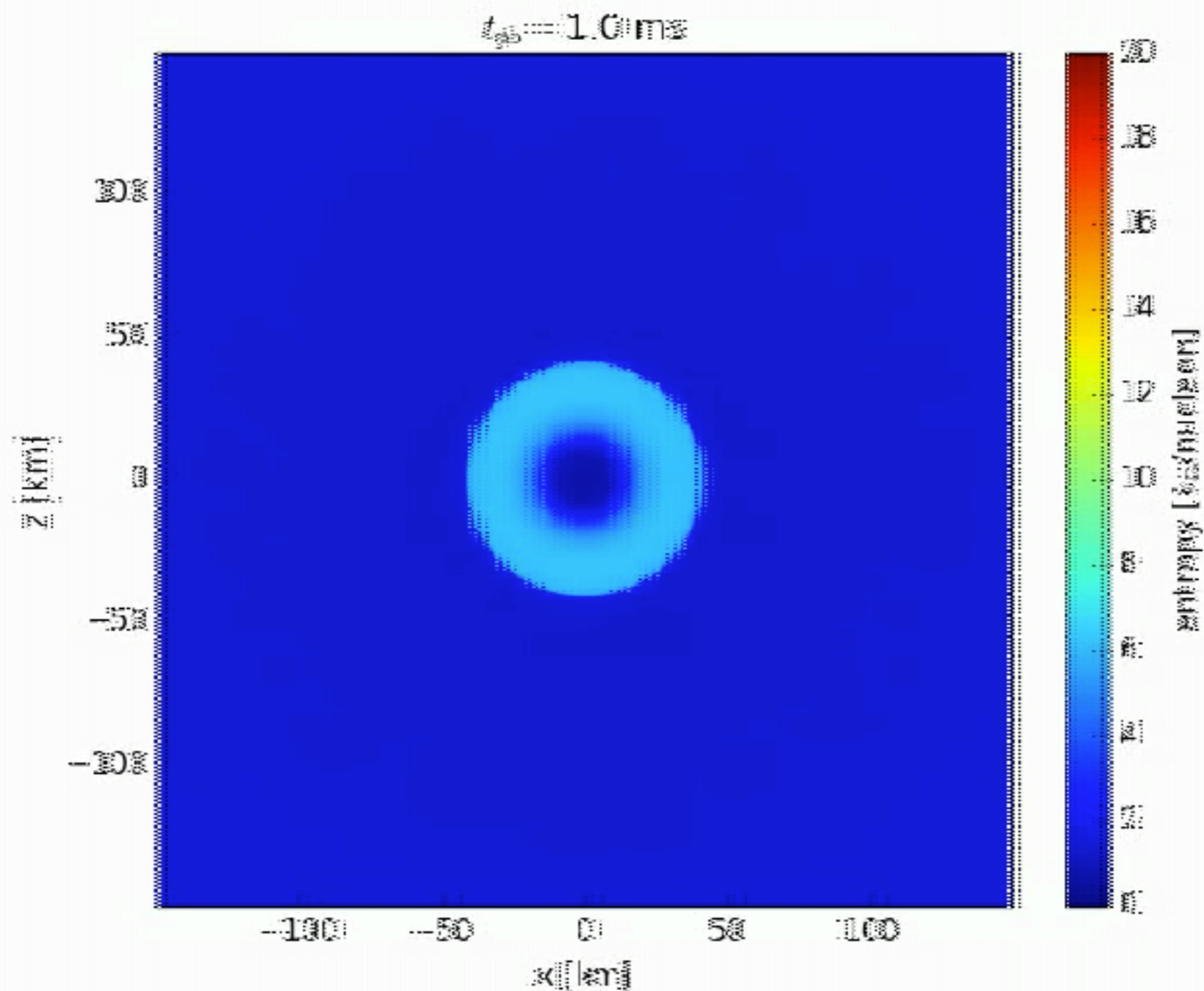
- ・衝撃波復活にはプラスとマイナスの両方の効果がある
- ・ニュートリノ分布が歪む
- ・(ボルツマン方程式を解いているため、) 近似的ニュートリノ輸送の精度を調べられる
- ・回転速度プロファイル:

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



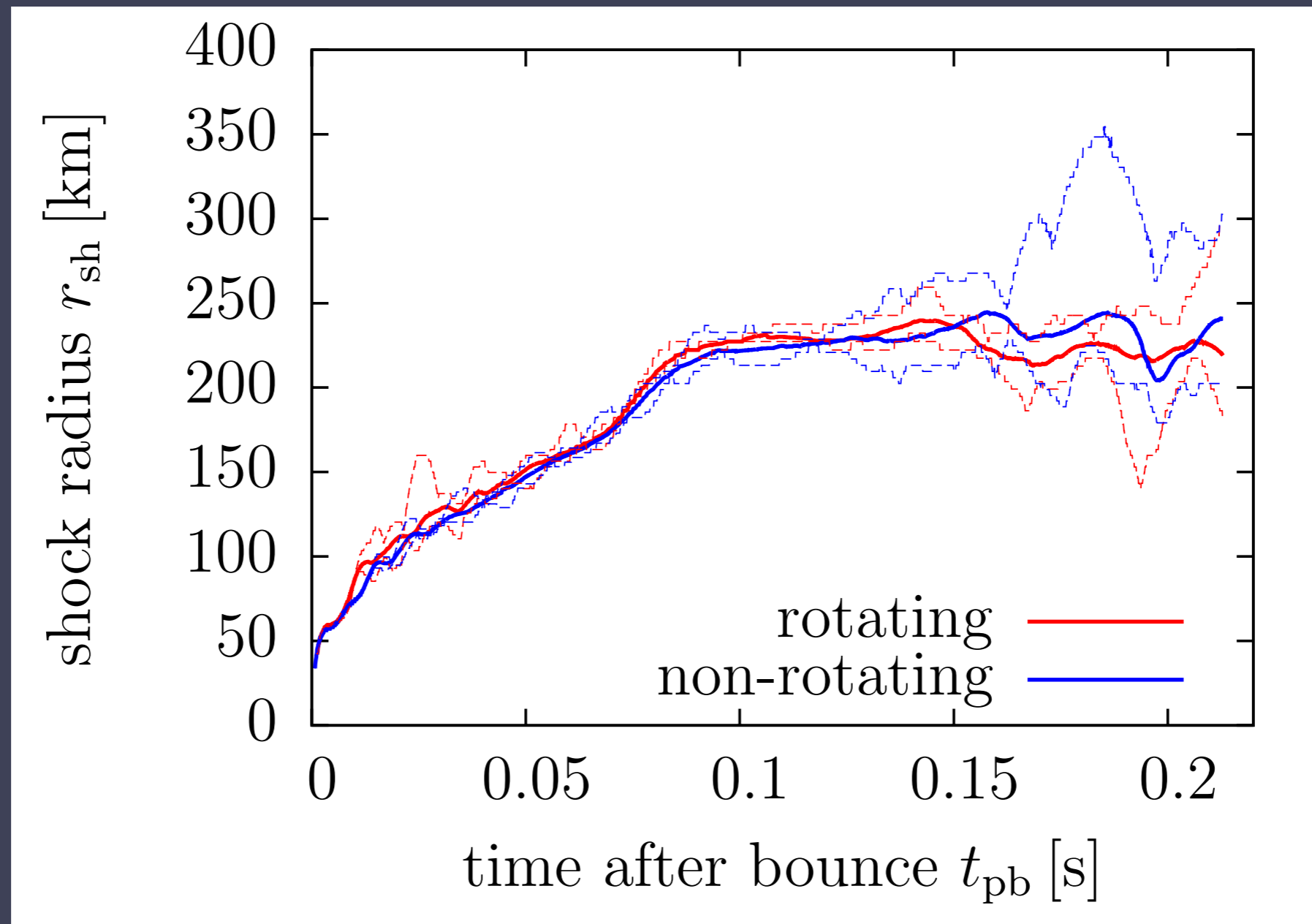
エントロピー分布

- ・バウンス後~200 msまでの時間発展



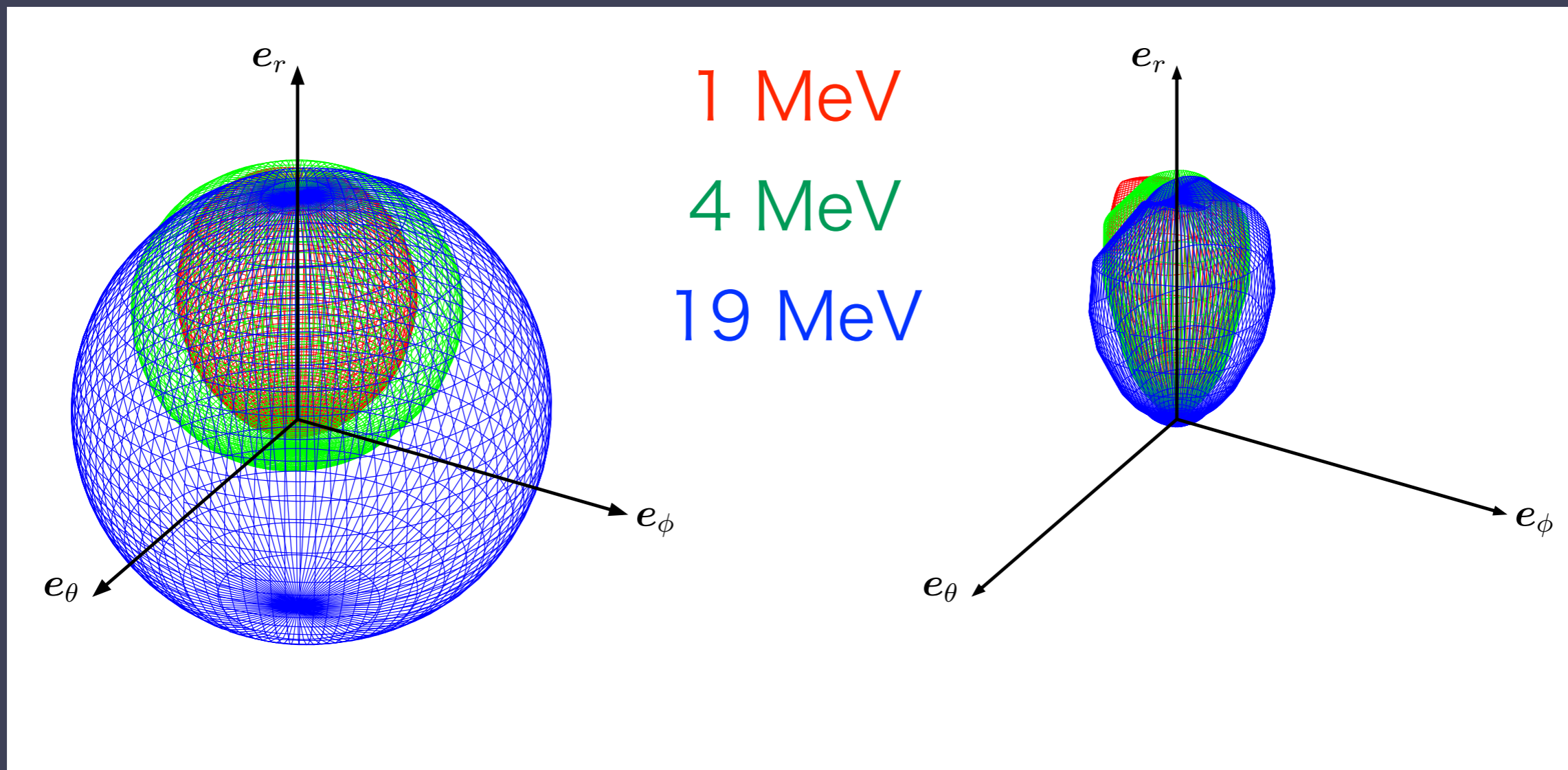
衝撃波の時間発展

- ・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

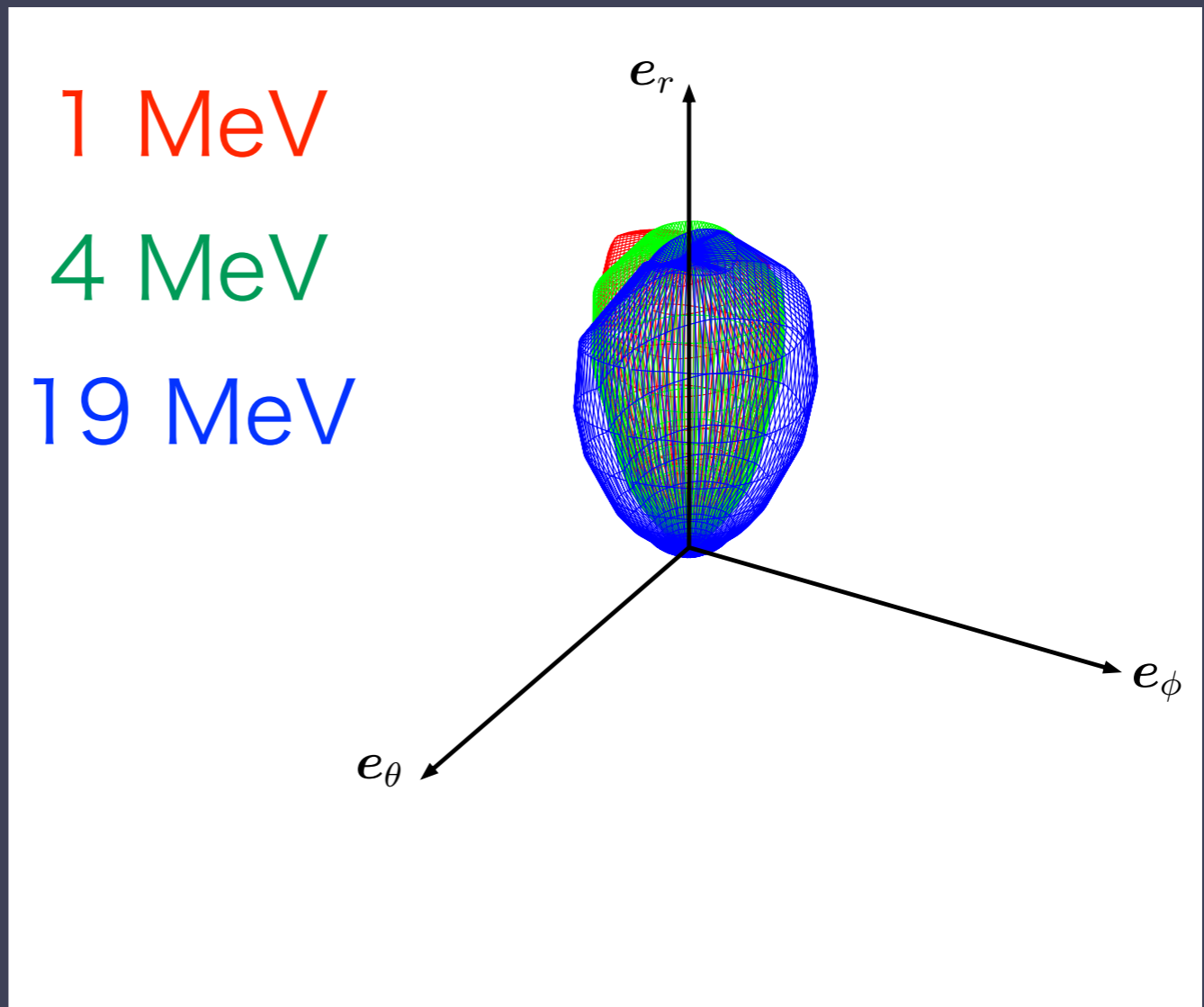
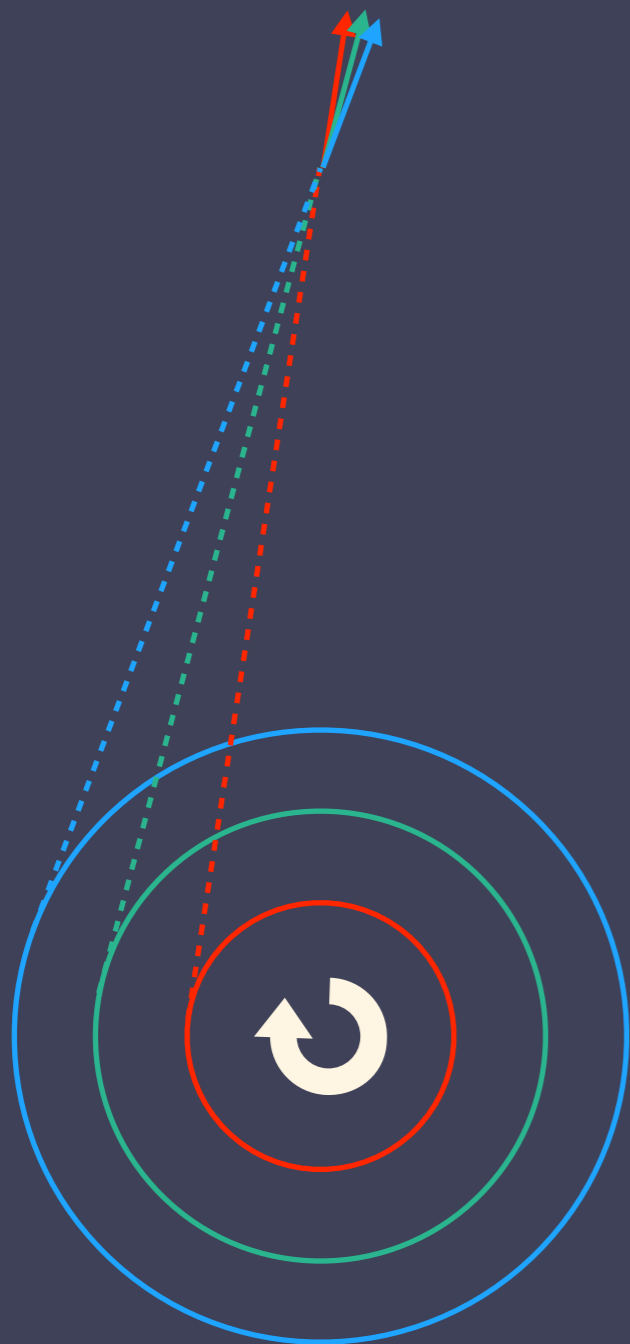


~60 km

~170 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



1 MeV

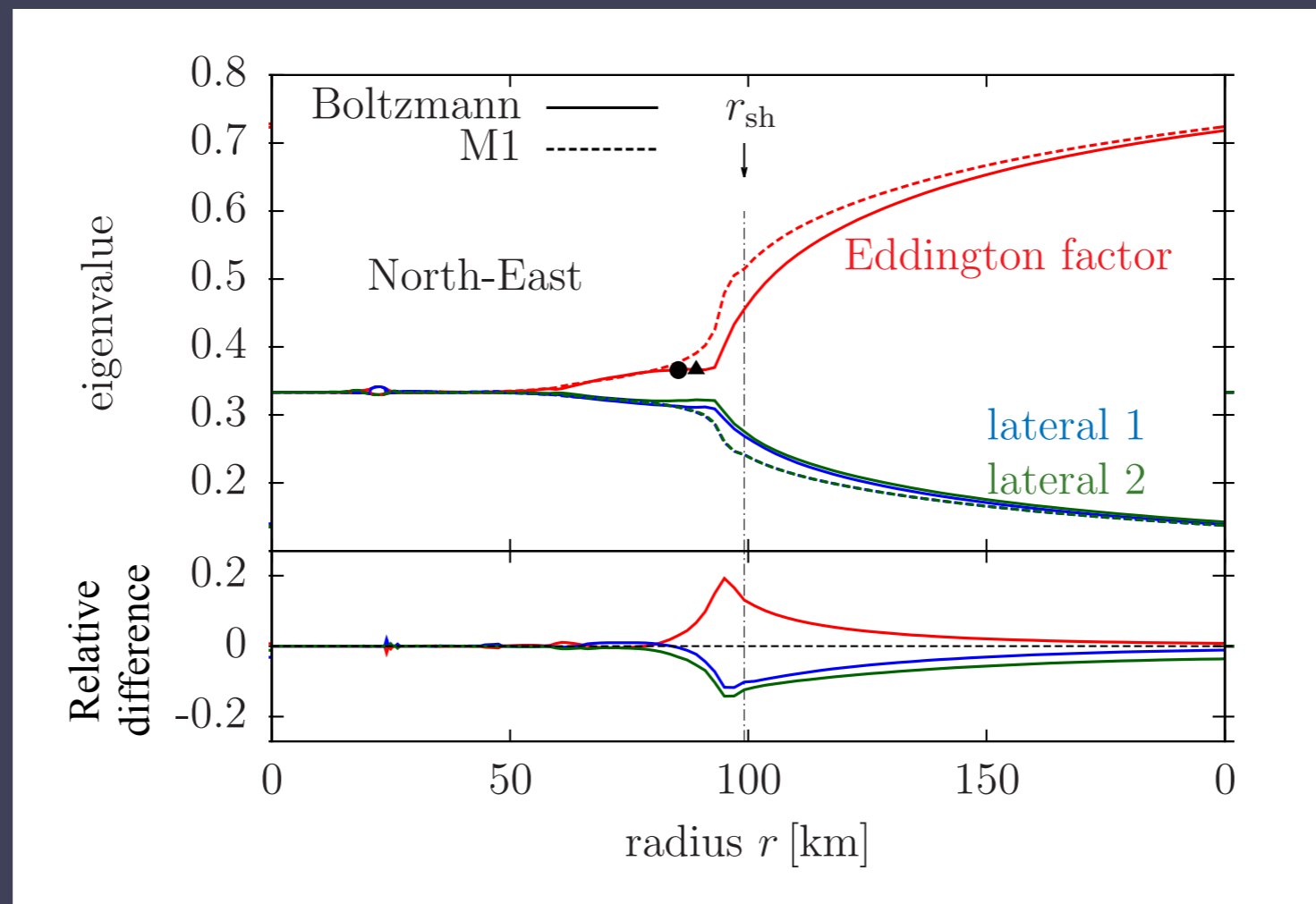
4 MeV

19 MeV

~170 km
AH+(2018)

Eddington factor

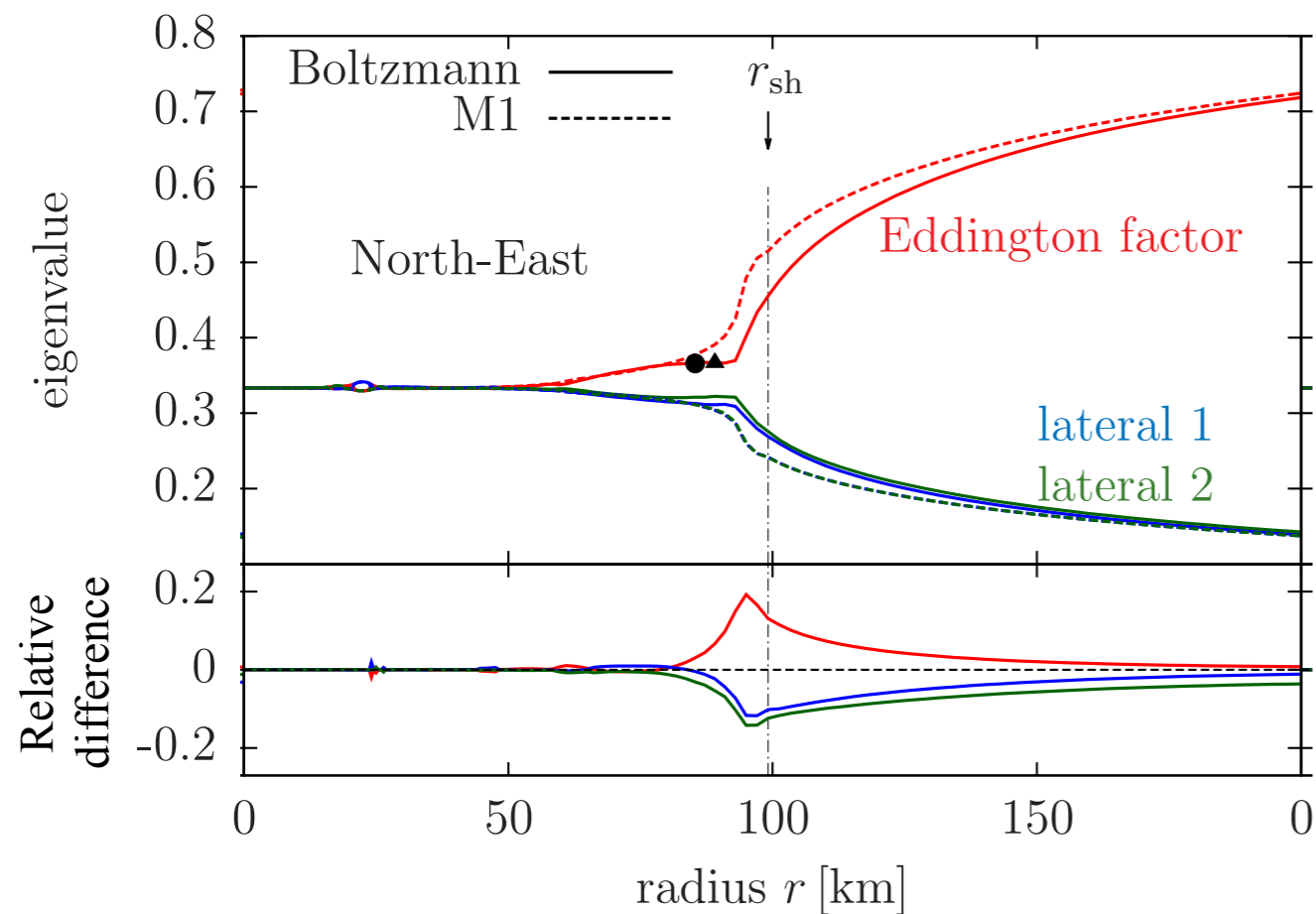
- ・バウンス後~10 msでのEddingtonテンソル
- ・分布関数からのものとM1法によるものとの比較
- ・~20%の違い



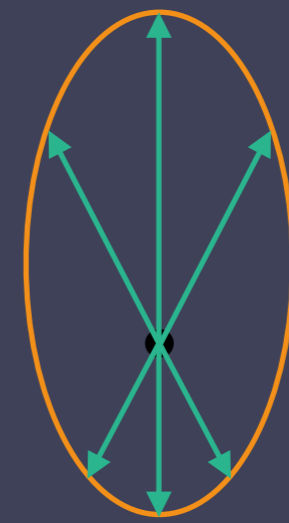
Eddington factor

- ・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



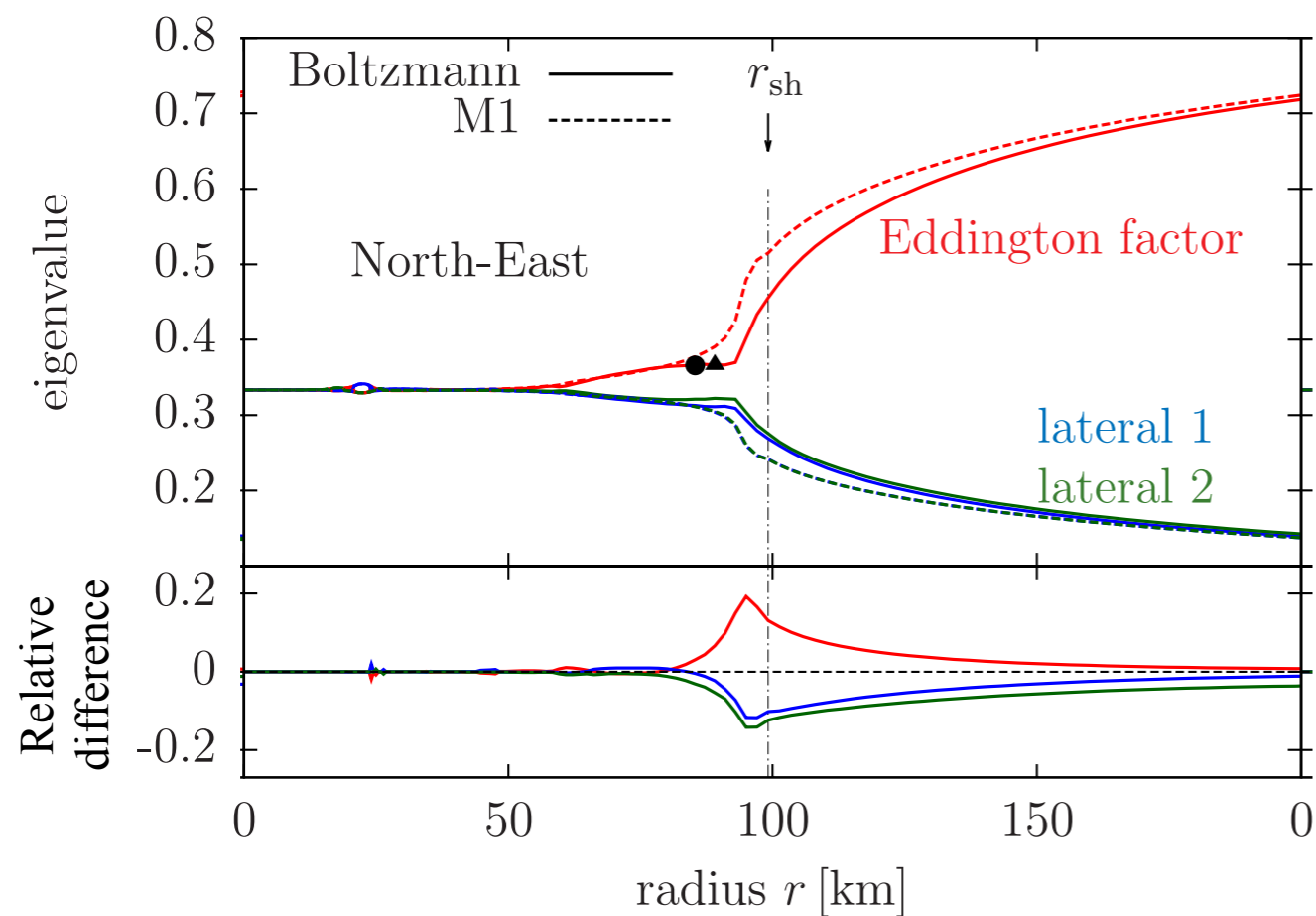
外向き



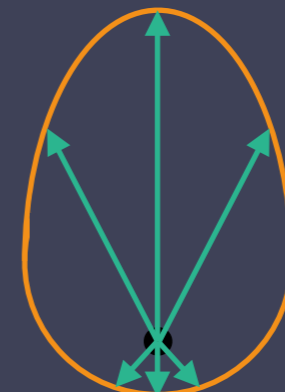
内向き

Eddington factor

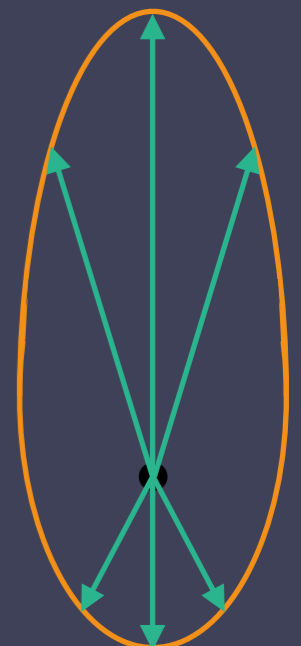
- ・バウンス後~10 msでのEddingtonテンソル
- ・分布関数からのものとM1法によるものとの比較
- ・これらの状況を区別できる情報があればM1法を改善できる可能性



外向き



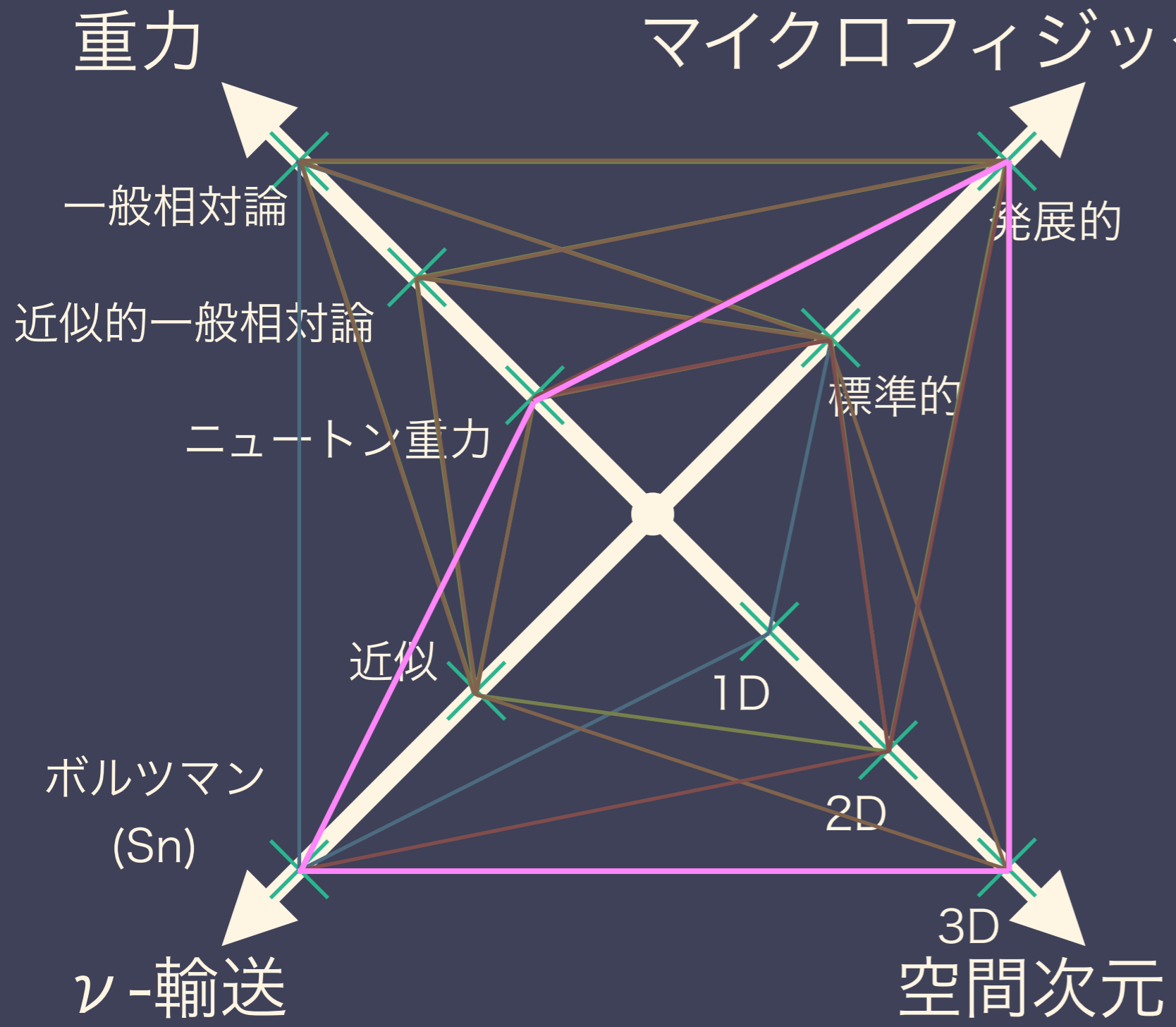
実際



M1

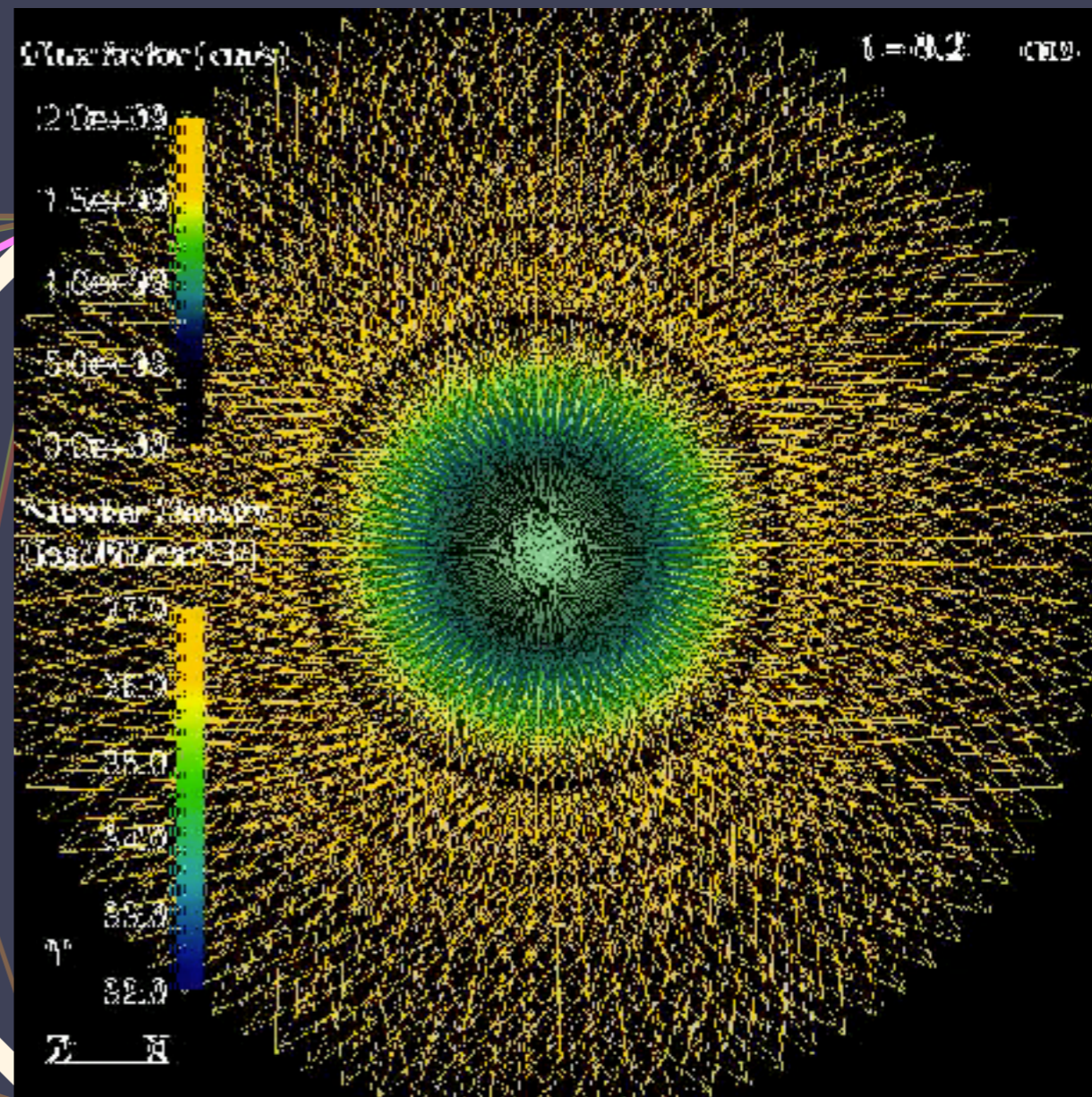
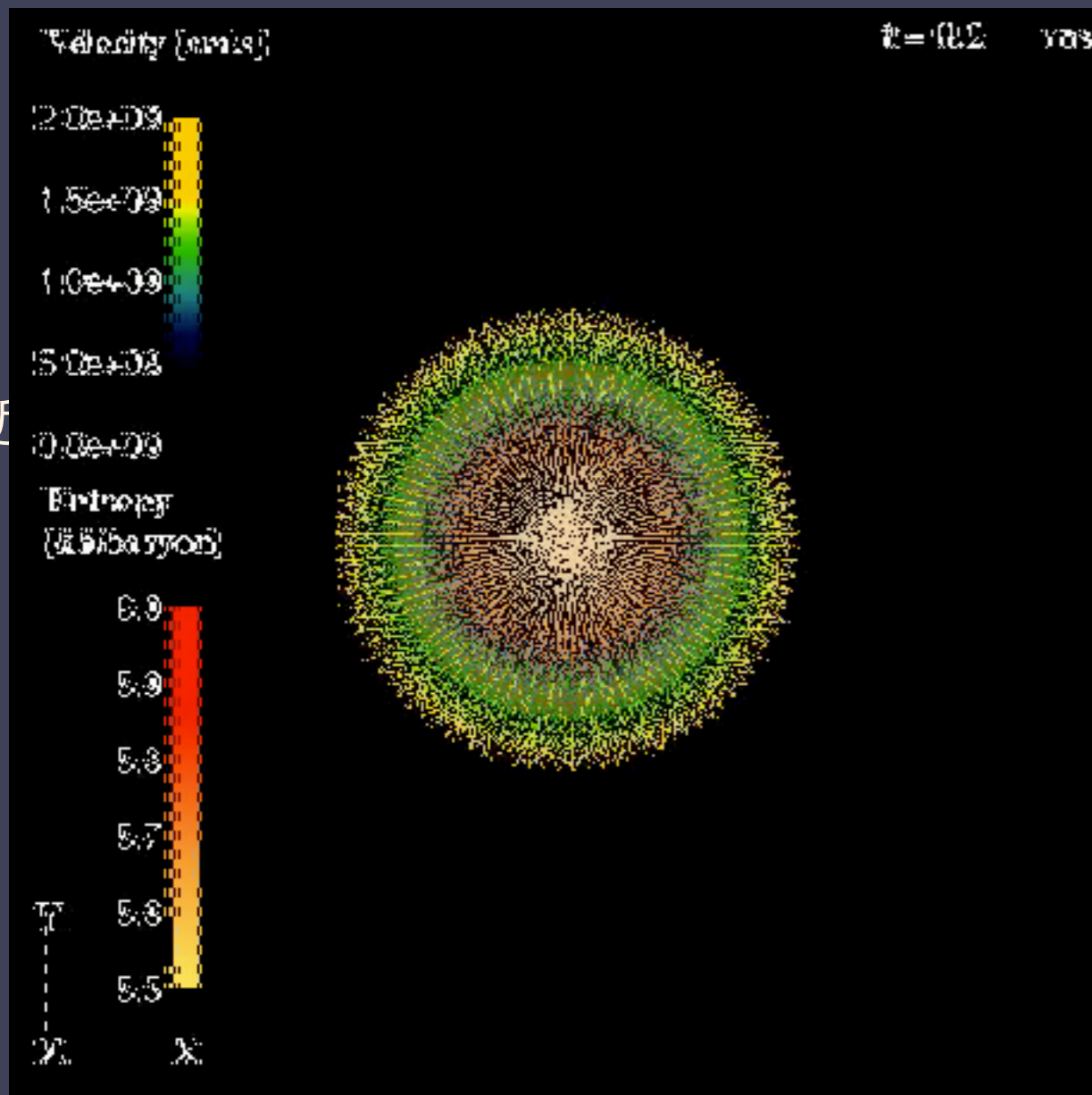
内向き

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



近

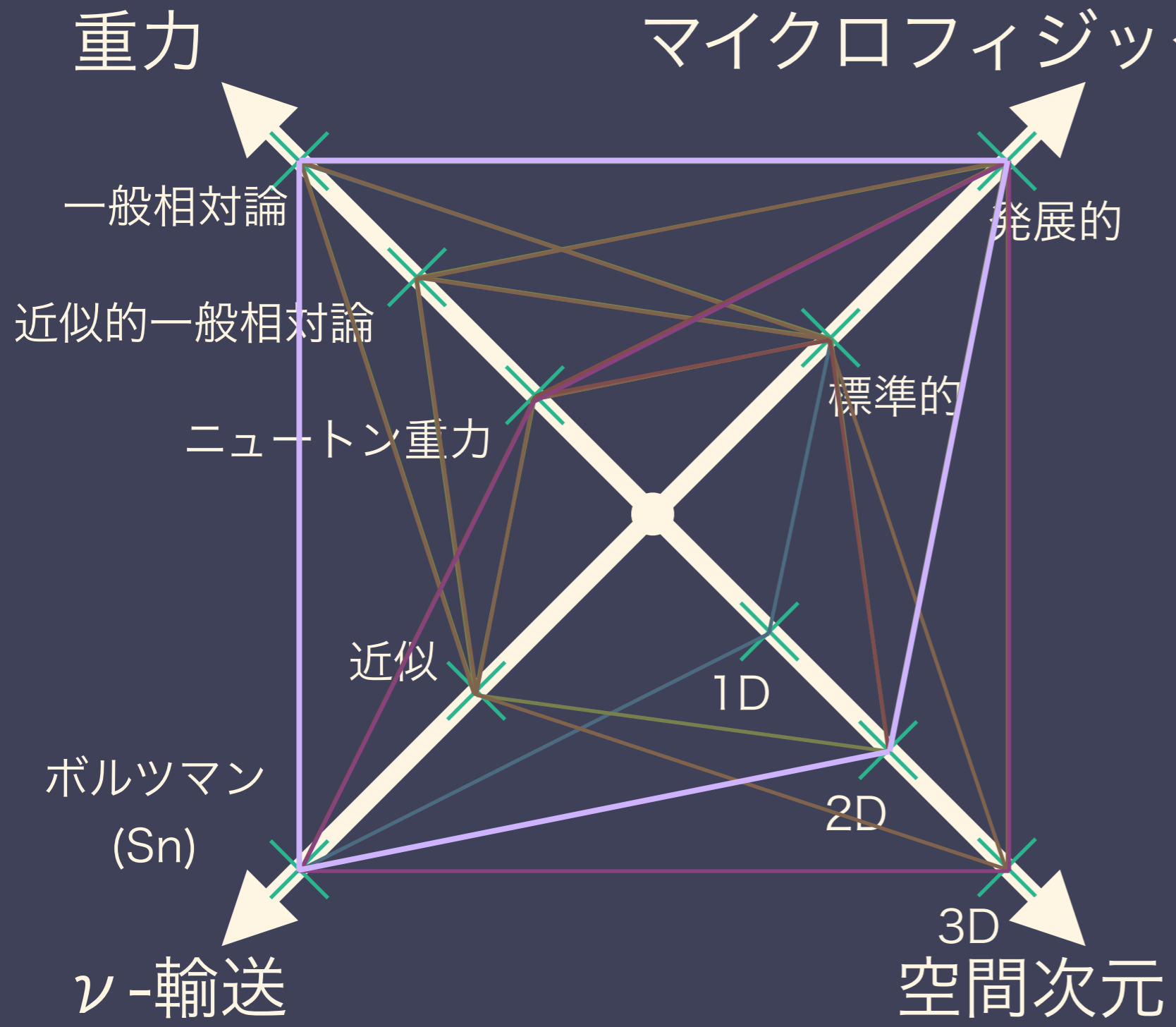
的

ν -輸送

3D
空間次元

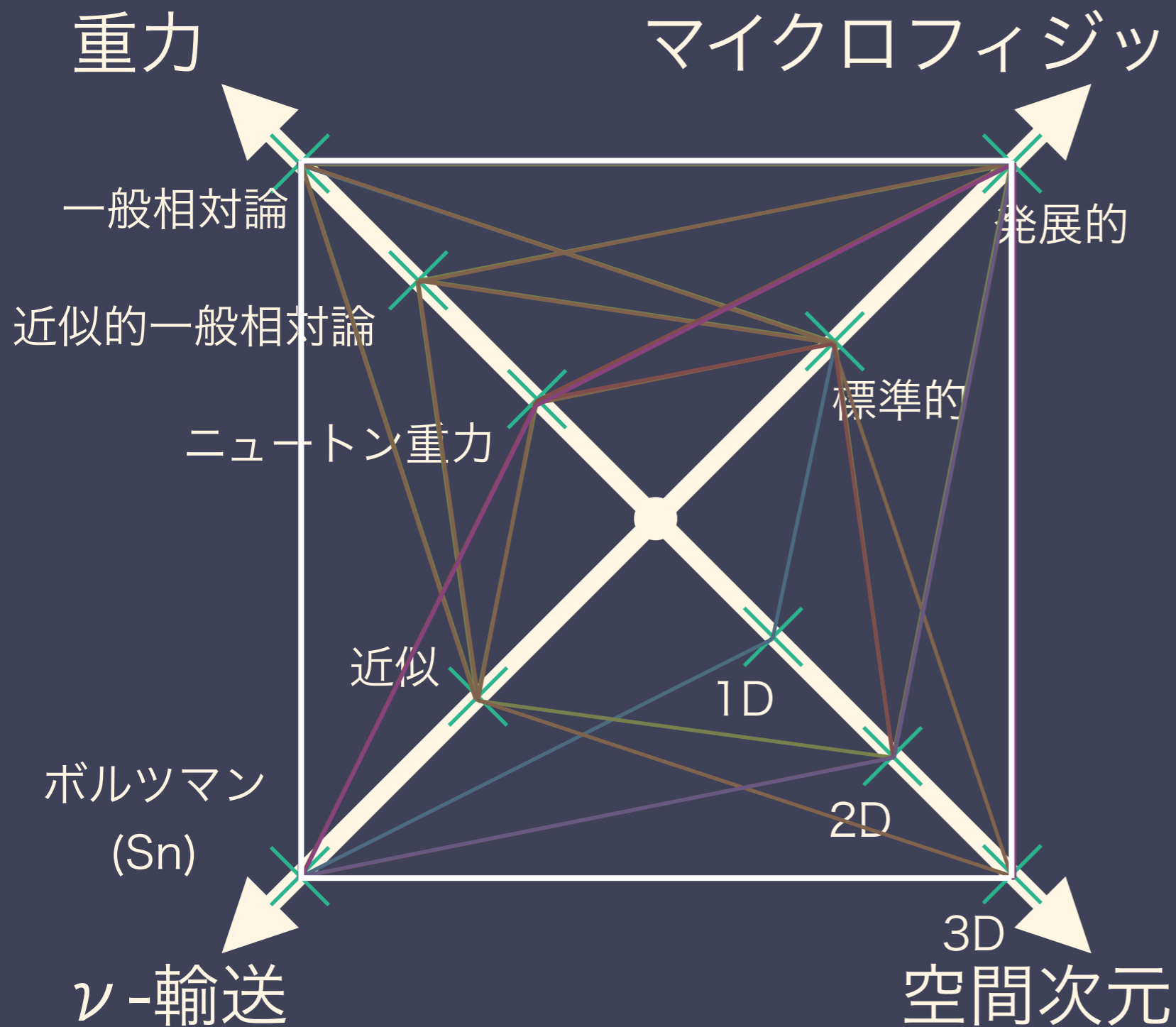
Iwakami+ in prep.

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

