

2008年12月17日

高エネルギー

# 重力崩壊型超新星における 定在降着衝撃波の不安定性の三次元数値解析

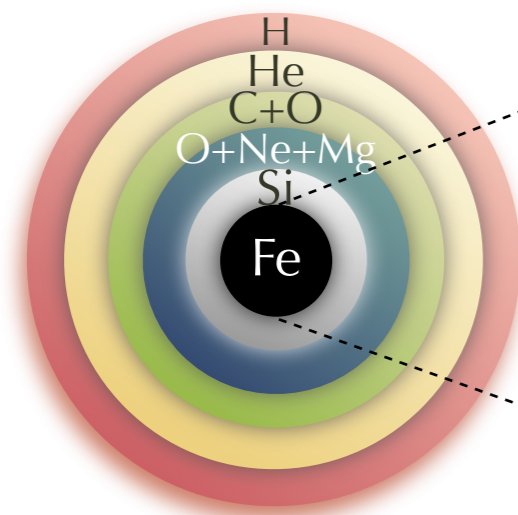
○岩上わかな、大西直文、固武慶、山田章一、澤田恵介

東北大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻 D3

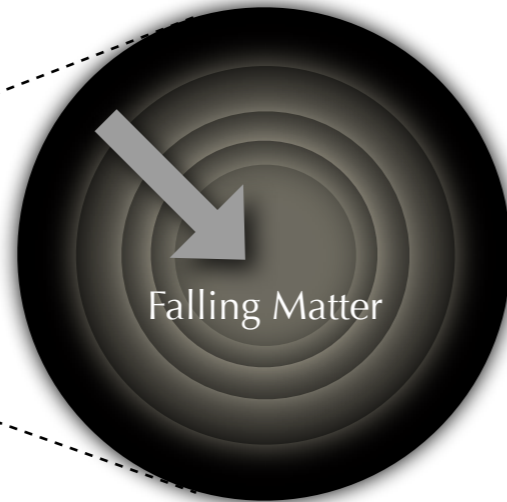
# 重力崩壊型超新星

## 大質量星の進化の最終段階における大爆発

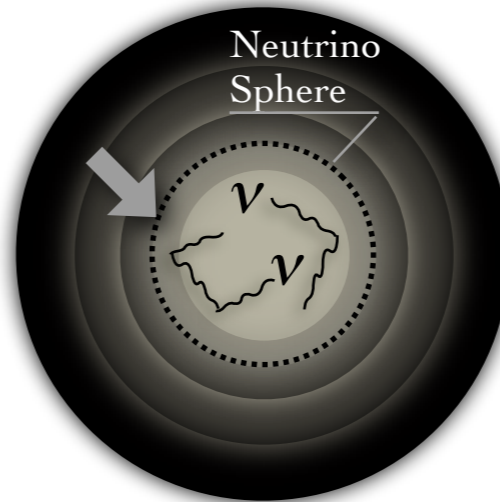
### 爆発の過程



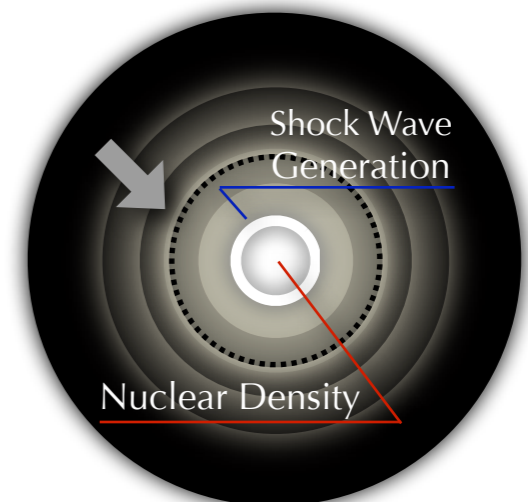
(a) Red Super Giant



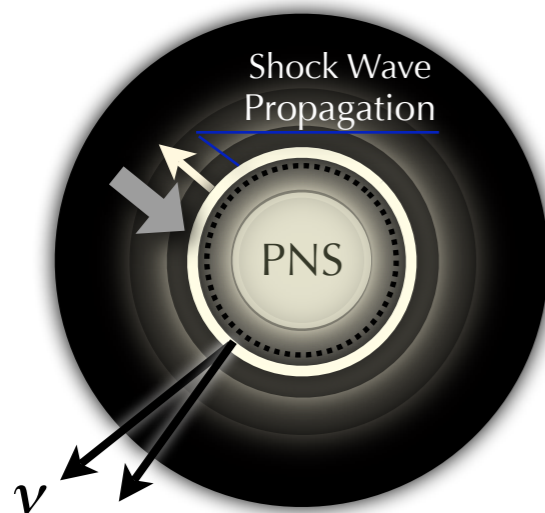
(b) Gravitational Collapse



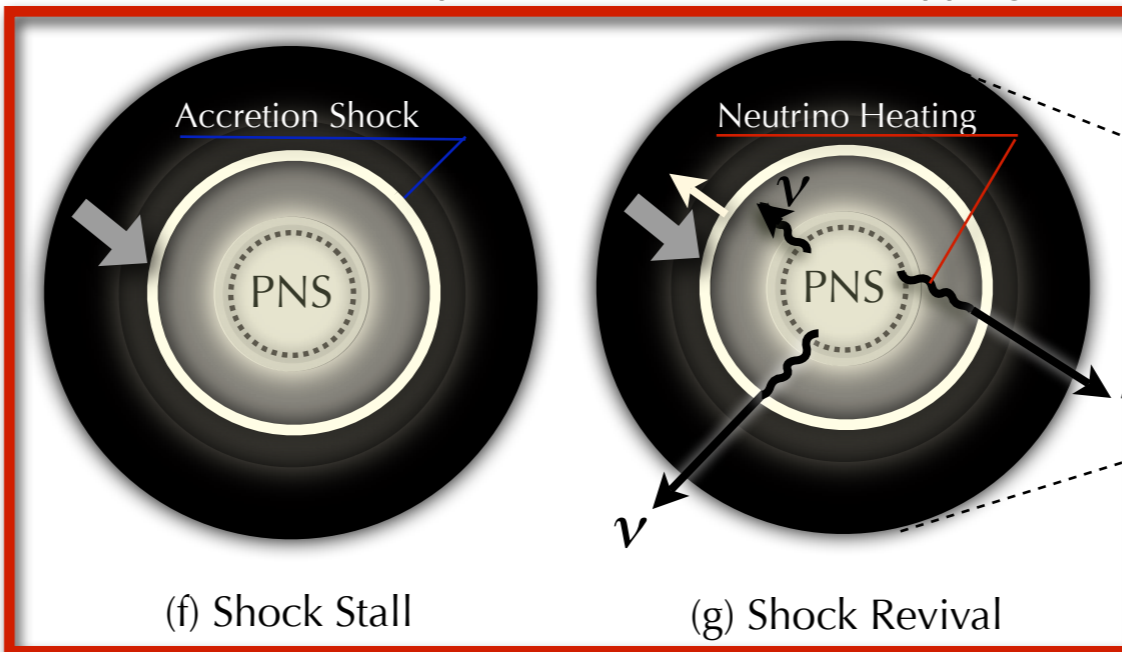
(c) Neutrino Trapping



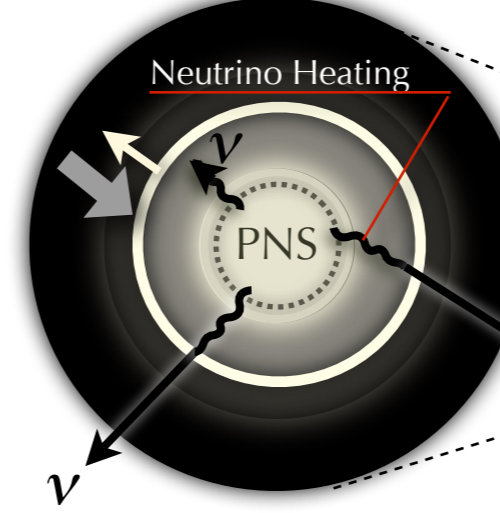
(d) Core Bounce



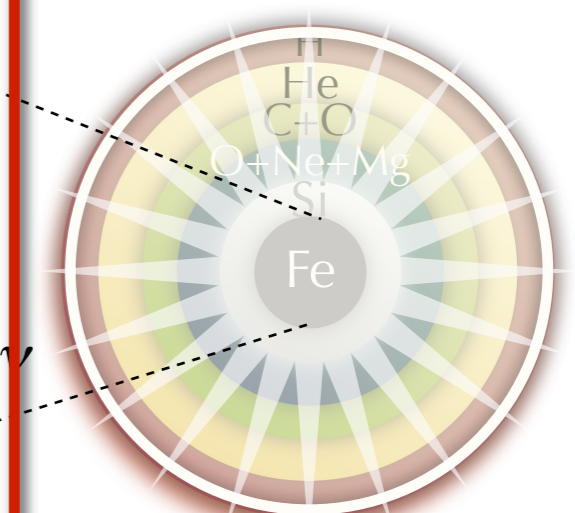
(e) Neutrino Burst



(f) Shock Stall



(g) Shock Revival



(h) Delayed Explosion

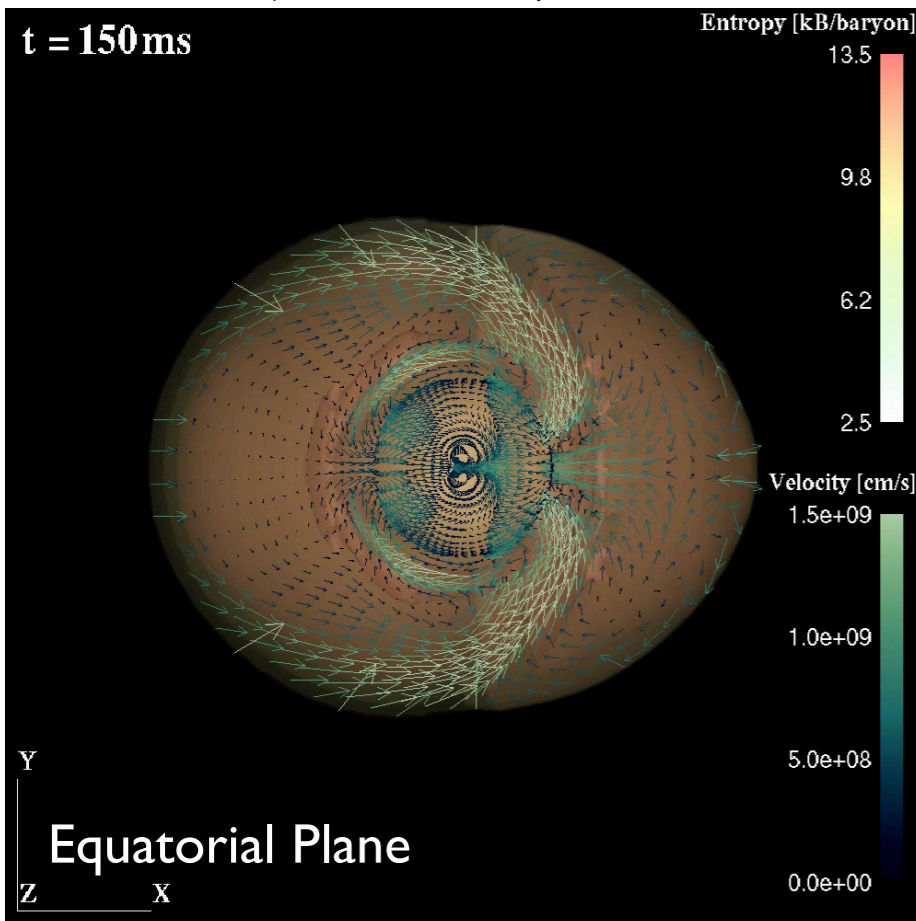
球面衝撃波が不安定になり多次元的に変形

# 定在降着衝撃波の不安定性

## Standing Accretion Shock Instability **SASI**

特徴：低次モードが支配的

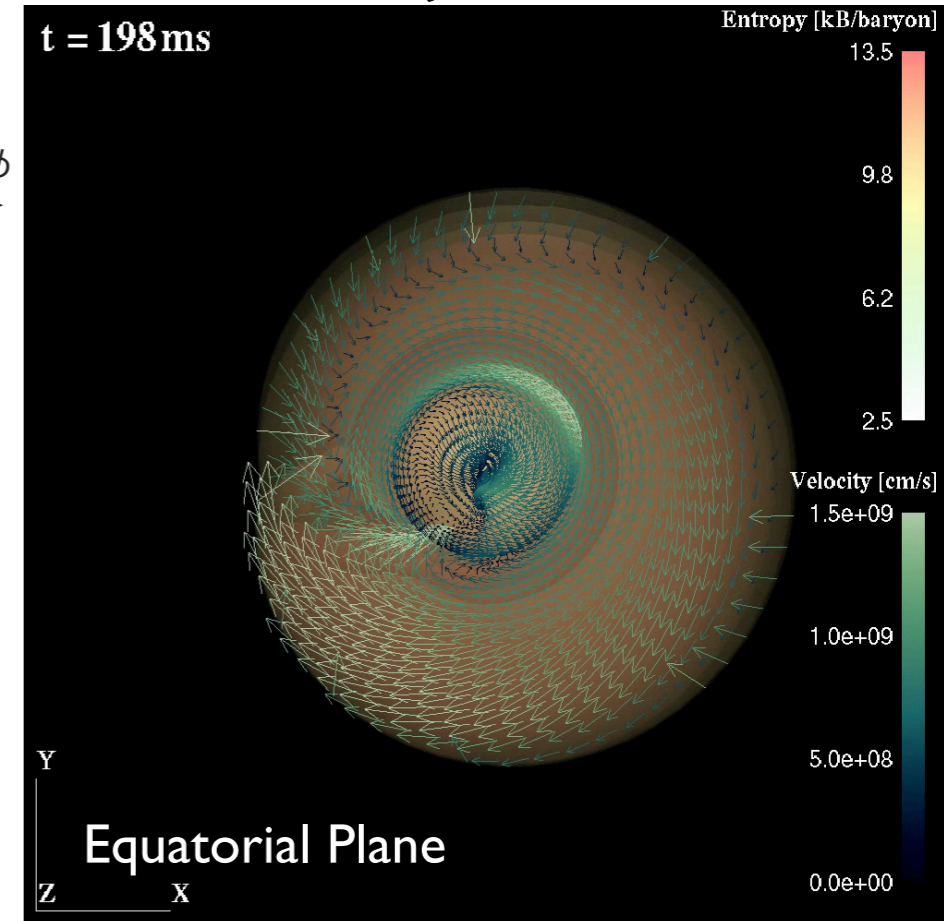
### スロッシングモード



回転なし  $m = \pm 1$

衝撃波が対称軸に沿って振動しながら軸対称変形する

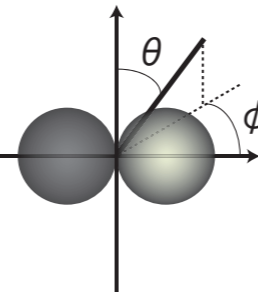
### スパイラルモード



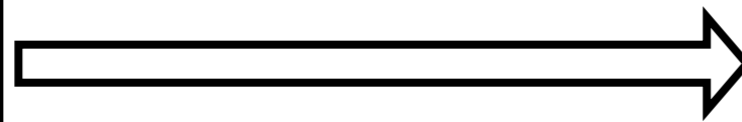
回転あり 反時計まわり:  $m = +1$   
時計まわり:  $m = -1$

衝撃波が一方向に回転しながら非軸対称変形する

球面調和関数  
 $l=1, m=1$  擾乱



対称性が破れる



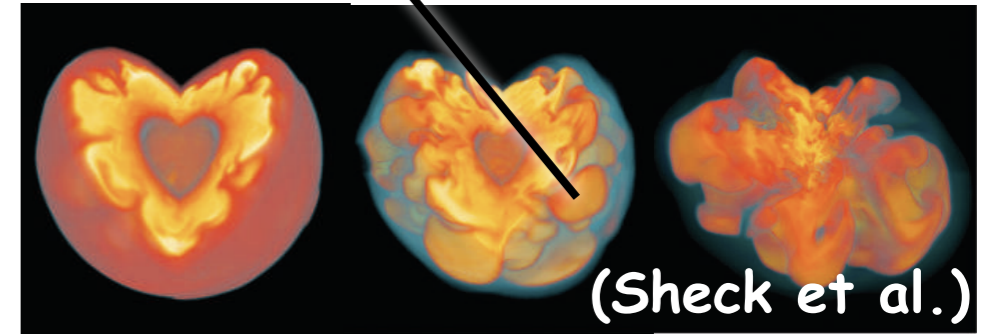
衝撃波内部の大きな対流が、ニュートリノ加熱率の上昇を促進

# 3DSASIに関する研究

## ○対流、原始中性子星キック

- 現実的な状態方程式
- 単純化されたニュートリノ輸送方程式

Large Bubble of Radiation



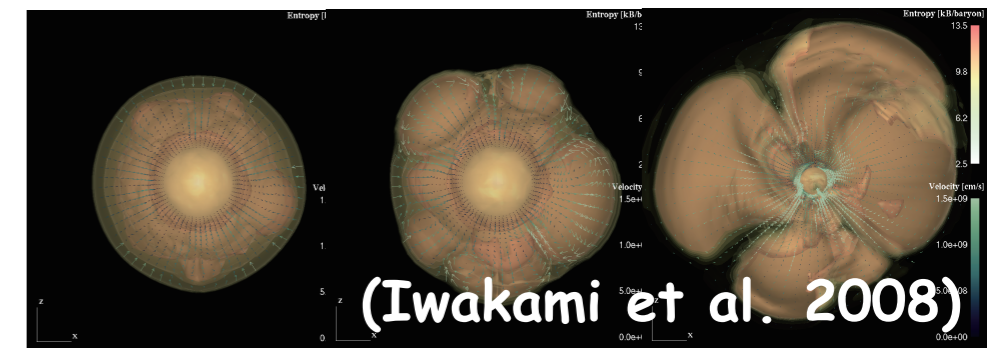
## ○スパイラルモード、原始中性子星スピン、回転

- 理想気体の状態方程式
- ニュートリノ加熱・冷却を考慮していない



## ○モード解析、原始中性子星キック・スピン、回転

- 現実的な状態方程式
- ニュートリノ加熱・冷却を考慮



# 本研究の目的

---

SASIの三次元数値解析を行い、重力崩壊型超新星の爆発と原始中性子星への影響を調べること

## これまでの研究

### -3DSASIの性質

ApJ, **678**, 1207-1228 (2008)、(天文学会07秋期年会で発表)

### -非線形領域における回転の効果

arXiv:0811.0651v1, submitted to ApJ、(天文学会08春期年会で発表)

### -原始中性子星キック・スピンの与える影響

a forthcoming paper、(天文学会08秋期年会で発表)

# 基礎方程式

## 三次元圧縮性オイラー方程式

連続の式: 
$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

運動方程式: 
$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p - \rho \nabla \Phi$$

エネルギー方程式: 
$$\rho \frac{D}{Dt} \left( \frac{e}{\rho} \right) = -p \nabla \cdot \mathbf{v} + Q_E$$

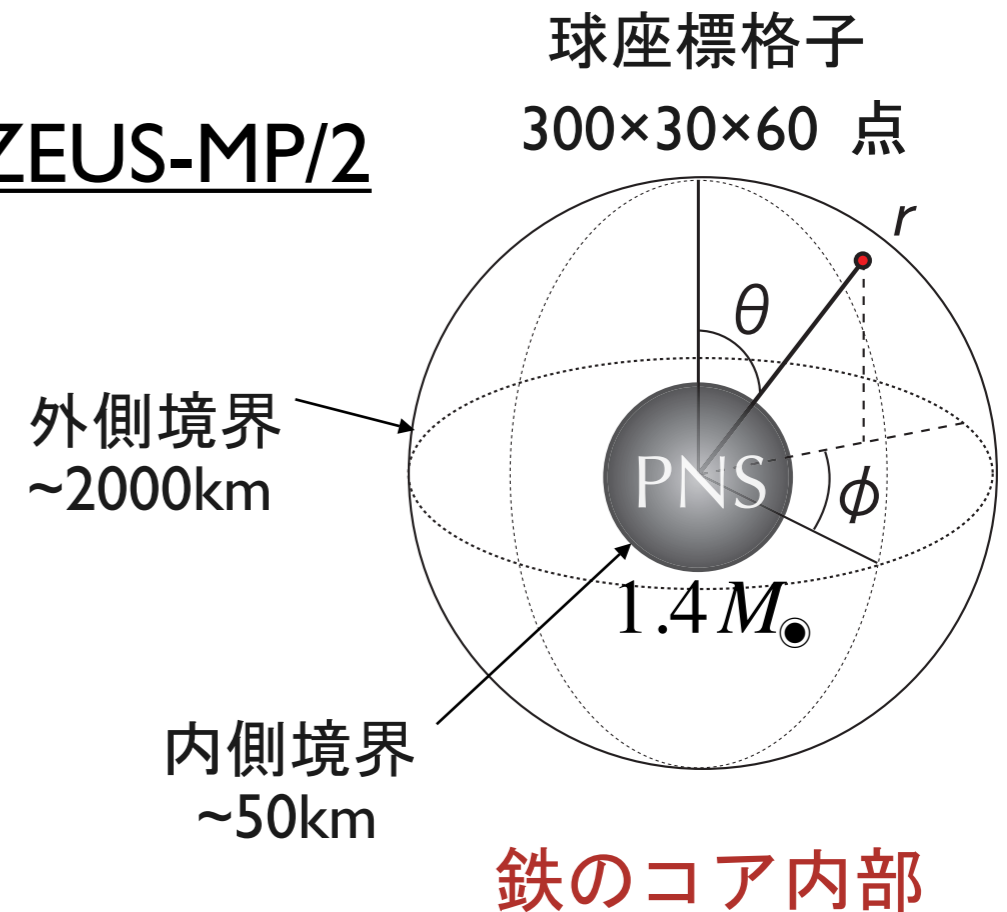
Electron Fraction: 
$$\frac{DY_e}{Dt} = Q_N$$

重力ポテンシャル: 
$$\Phi = -GM/r$$

相対論的平均場理論を基にした核物質の状態方程式 (Shen et al. 1998)

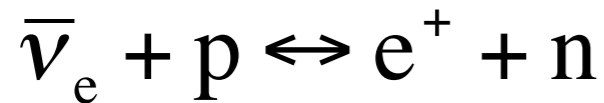
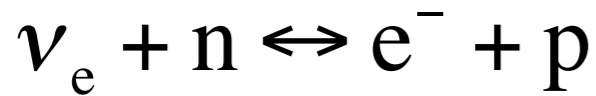
$\rho$ : Mass Density,  $\mathbf{v}$ : Velocity,  $p$ : Pressure,  $\Phi$ : The Gravitational Potential,  $e$ : Internal Energy Density,  $Y_e$ : Electron Fraction,  $Q_E$ ,  $Q_N$ : Parameter of the interactions with neutrinos,  $G$ : Gravitational Constant ( $= 6.67 \times 10^{-8} [\text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{s}^2]$ ),  $M$ : Mass of the central core ( $= 1.4 M_\odot$ ).

ZEUS-MP/2



# ニュートリノの加熱・冷却

- ニュートリノに関する反応



- エネルギー密度と電子数密度

$$Q_E = -\frac{4\pi c}{(2\pi\hbar c)^3} \int_0^\infty \varepsilon^3 d\varepsilon [j(\varepsilon) - [j(\varepsilon) + \kappa(\varepsilon)]f(r, \varepsilon)]$$

$$Q_N = i \frac{m_B}{\rho} \frac{4\pi c}{(2\pi\hbar c)^3} \int_0^\infty \varepsilon^2 d\varepsilon [j(\varepsilon) - [j(\varepsilon) + \kappa(\varepsilon)]f(r, \varepsilon)] \quad i = \begin{cases} -1 & \text{for } \nu_e \\ 1 & \text{for } \bar{\nu}_e \end{cases}$$

Bruenn (1985)

- 分布関数

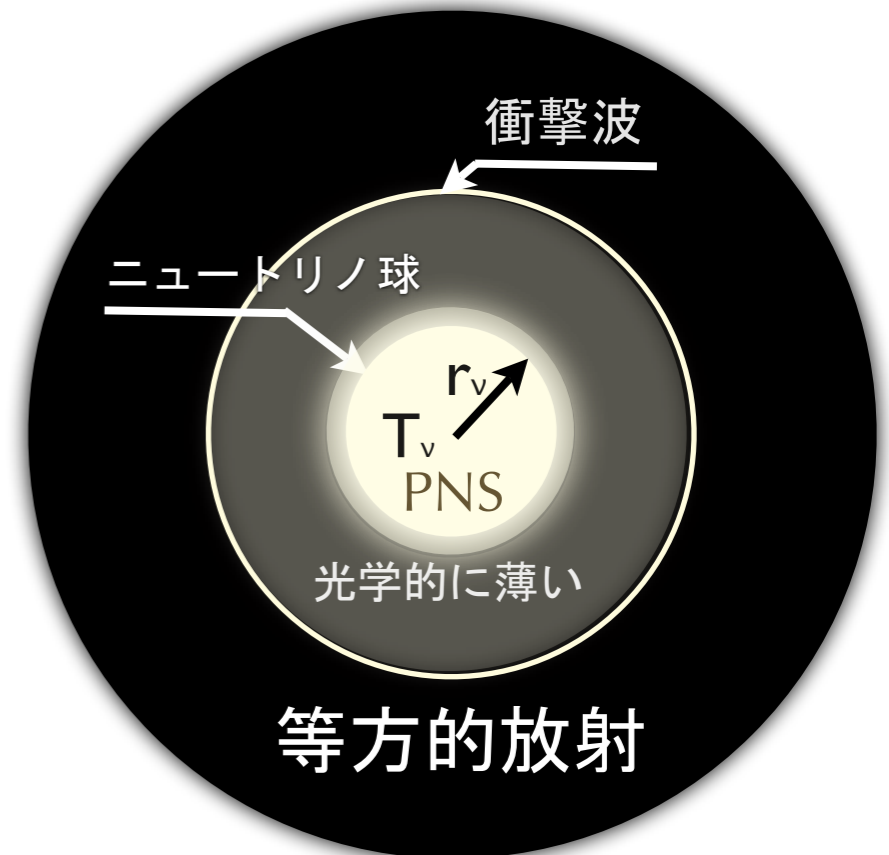
Fermi-Dirac 関数

$$f(r, \varepsilon) = \frac{1}{1 + \exp(\varepsilon/k_B T_\nu)} \frac{1 - \sqrt{1 - (r_\nu/r)^2}}{2\pi}$$

Geometrical Factor

$$\text{ニュートリノ光度: } L_\nu = \frac{7}{16} \sigma T_\nu^4 4\pi r_\nu^2$$

ニュートリノ温度

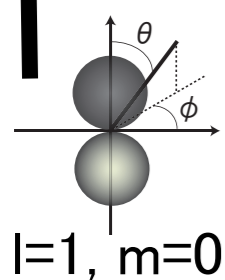
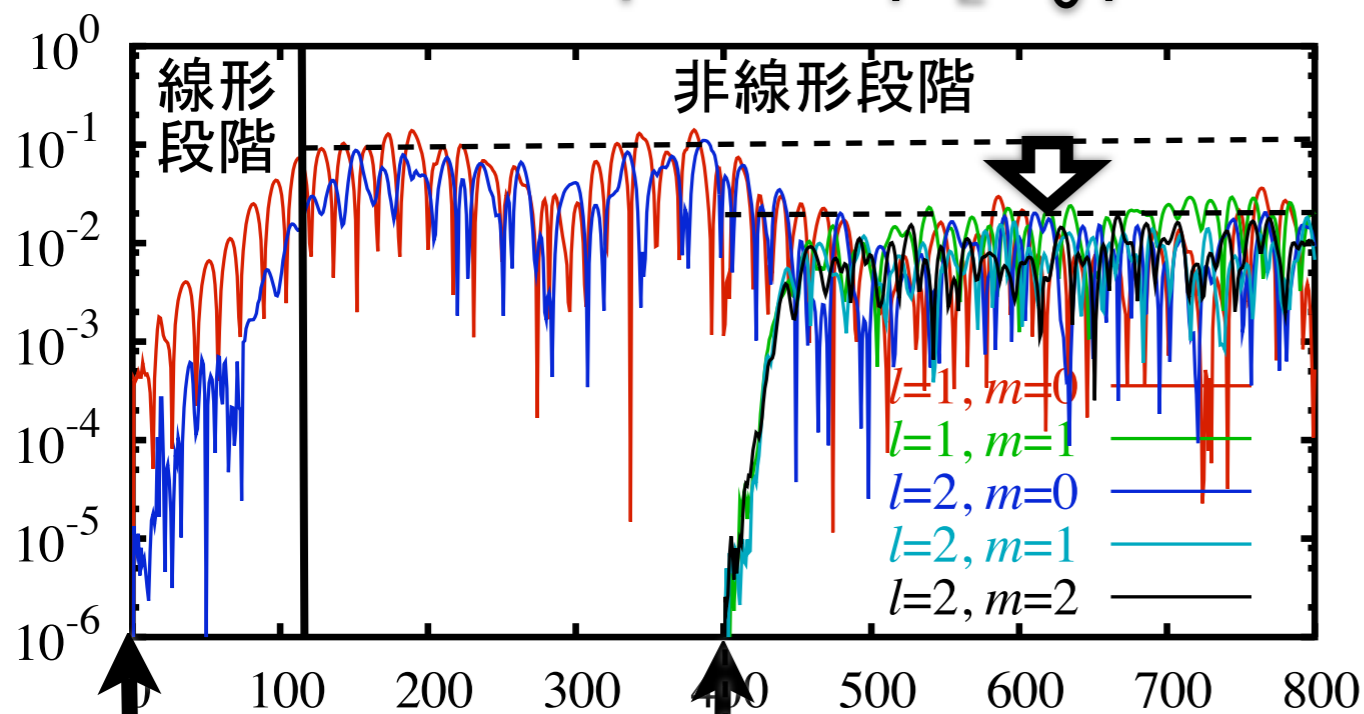


$\varepsilon$ : Neutrino Energy,  $m_B$ : Baryon Density,  $\hbar$ : Dirac's Constant,  $j(\varepsilon)$ : Neutrino Emissivity,  $\kappa(\varepsilon)$ : Neutrino Absorptivity,  $k_B$ : Boltzmann Constant,  $\sigma$ : Stefan - Boltzmann Constant.

# 3DSASIの特徴

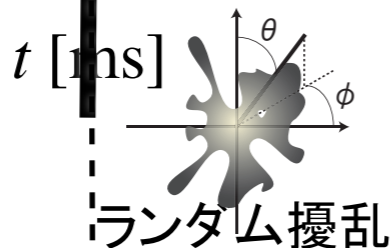
球面調和関数  $Y_L^m$  で展開

Mode Amplitude  $|c_L^m/c_0^0|$



**2D軸対称流**

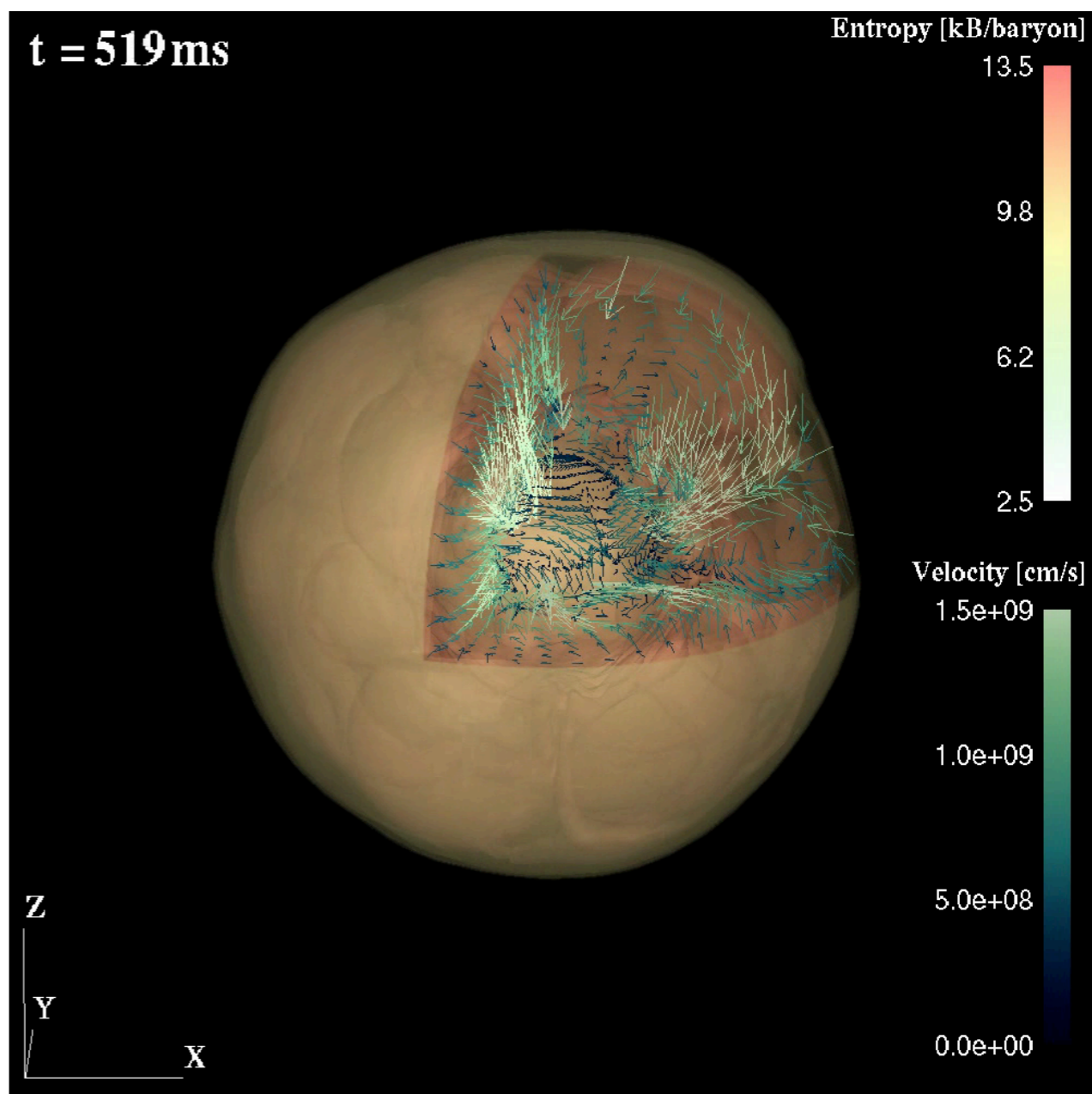
$m=0$  モードのみ



**3D非軸対称流**

全てのモード

エントロピーの等値面と速度ベクトル場



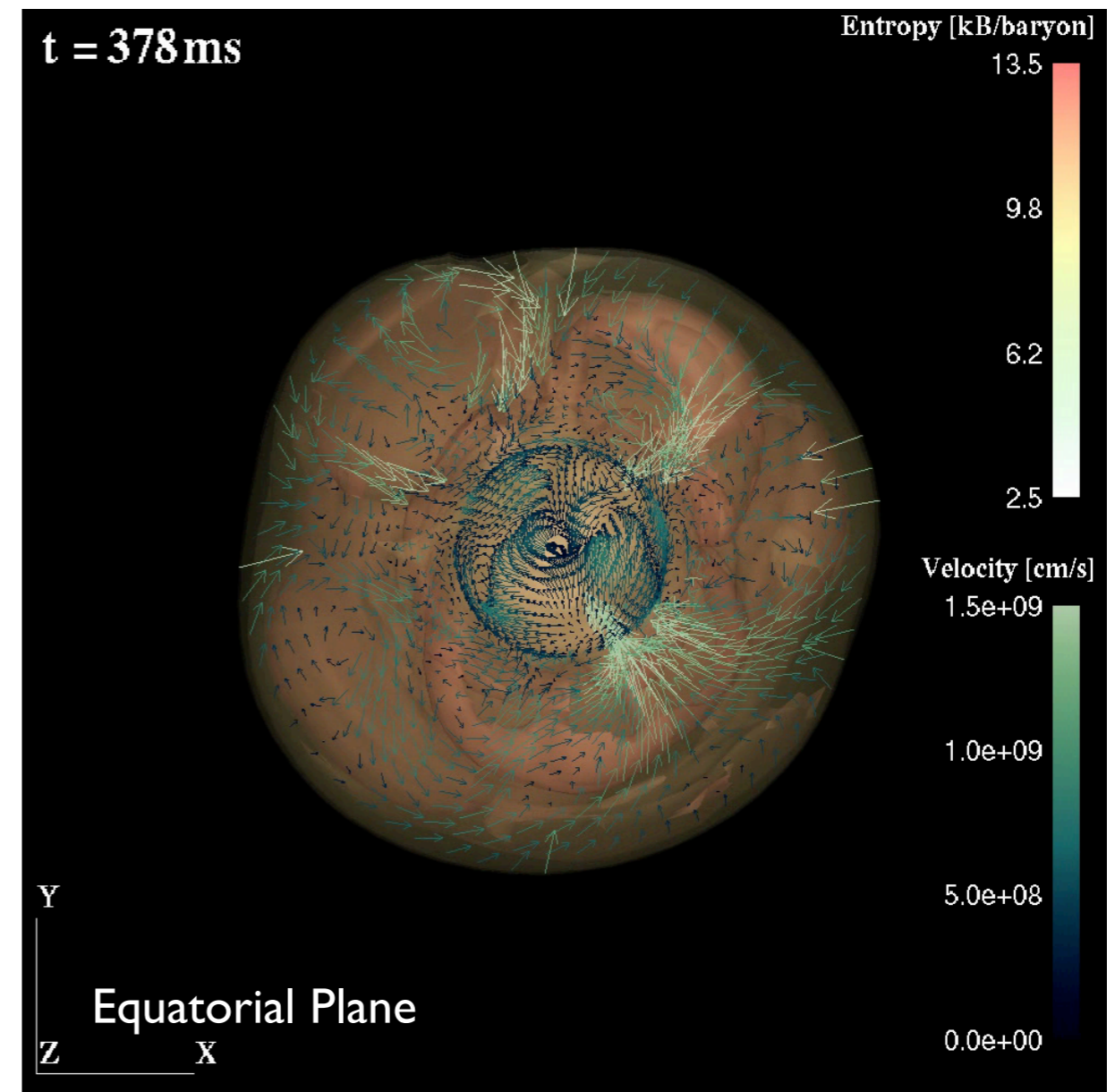
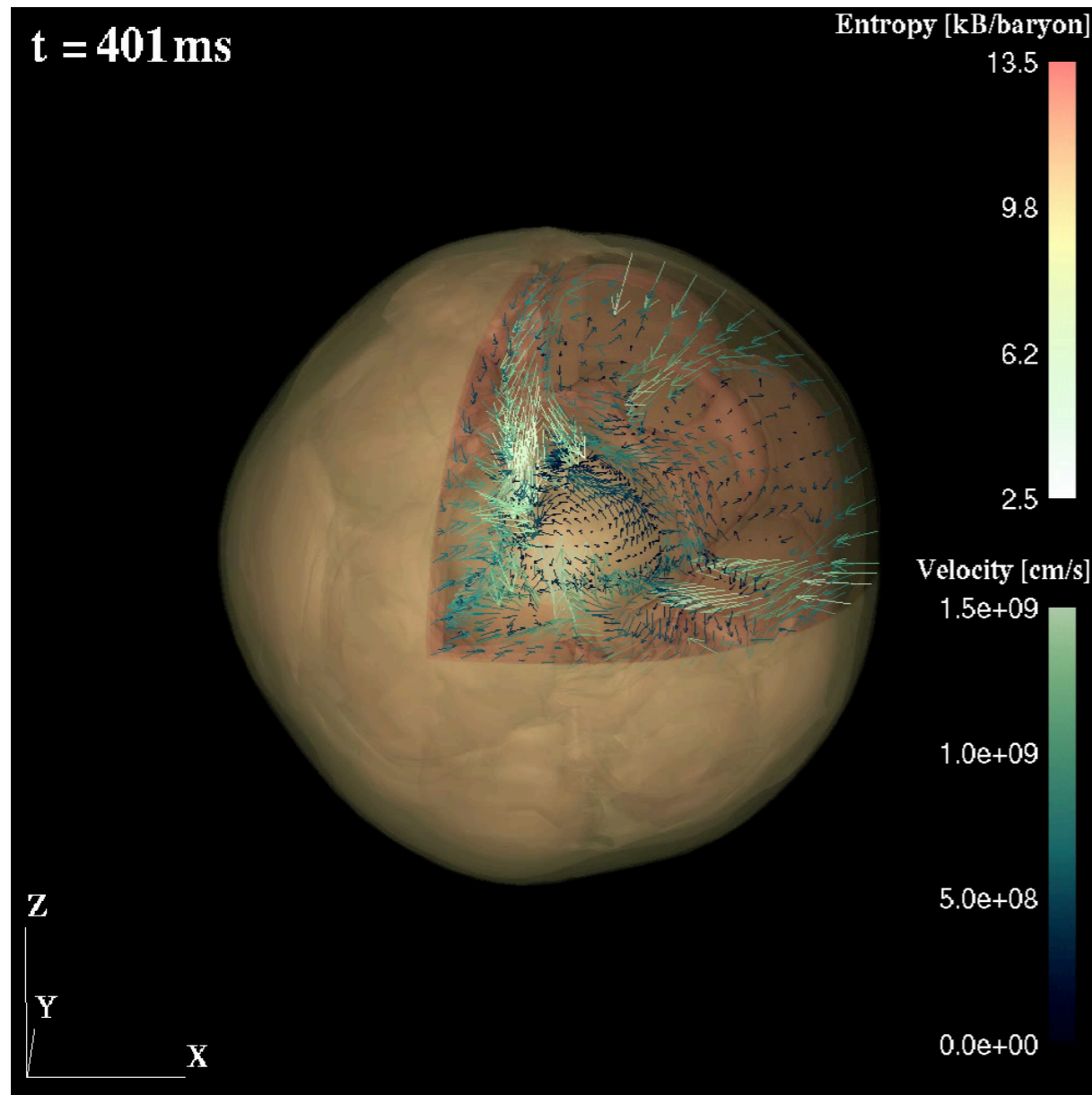
$\approx 5.0 \times 10^7 \text{ cm}$

-  $m \neq 0$  モードの成長により非線形段階でのモード振幅値が低下



# 回転を与えた場合

エントロピーの等値面と速度ベクトル場



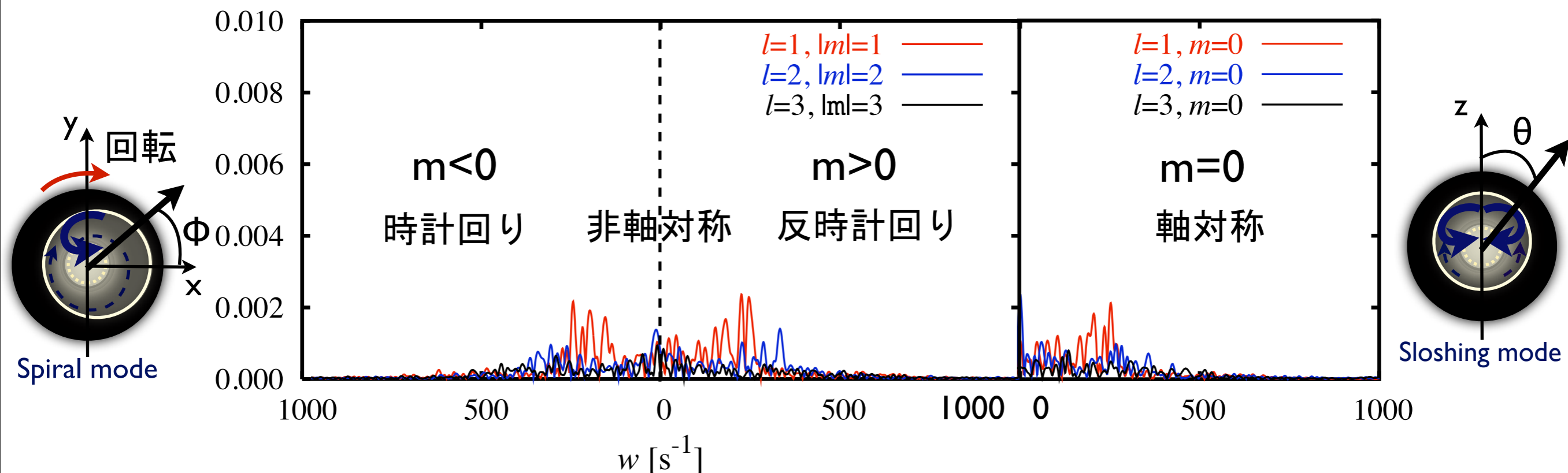
- より大きな高エントロピー領域が形成
- より高速な降着流が原始中性子星に向かって流れ込む

# 3DSASI非線形モード解析

回転なしでランダム擾乱を入れた非軸対称流れ場

- 低次モードが支配的
- $m < 0, m > 0, m = 0$  の最大モード振幅はほぼ同じ程度
- 同じ  $L$  の中では卓越するモードなし

Fourier Transformed Mode Amplitude  $|\tilde{c}_L^m|$   
球面調和関数の展開係数  $|c_L^m/c_0^0|$  をフーリエ展開

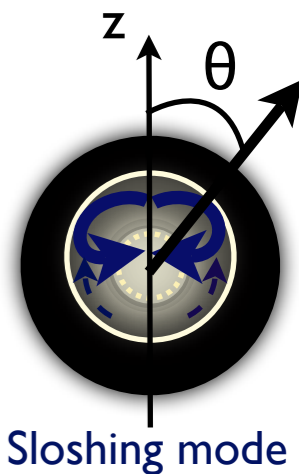
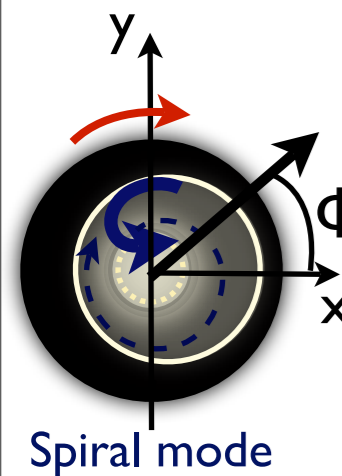
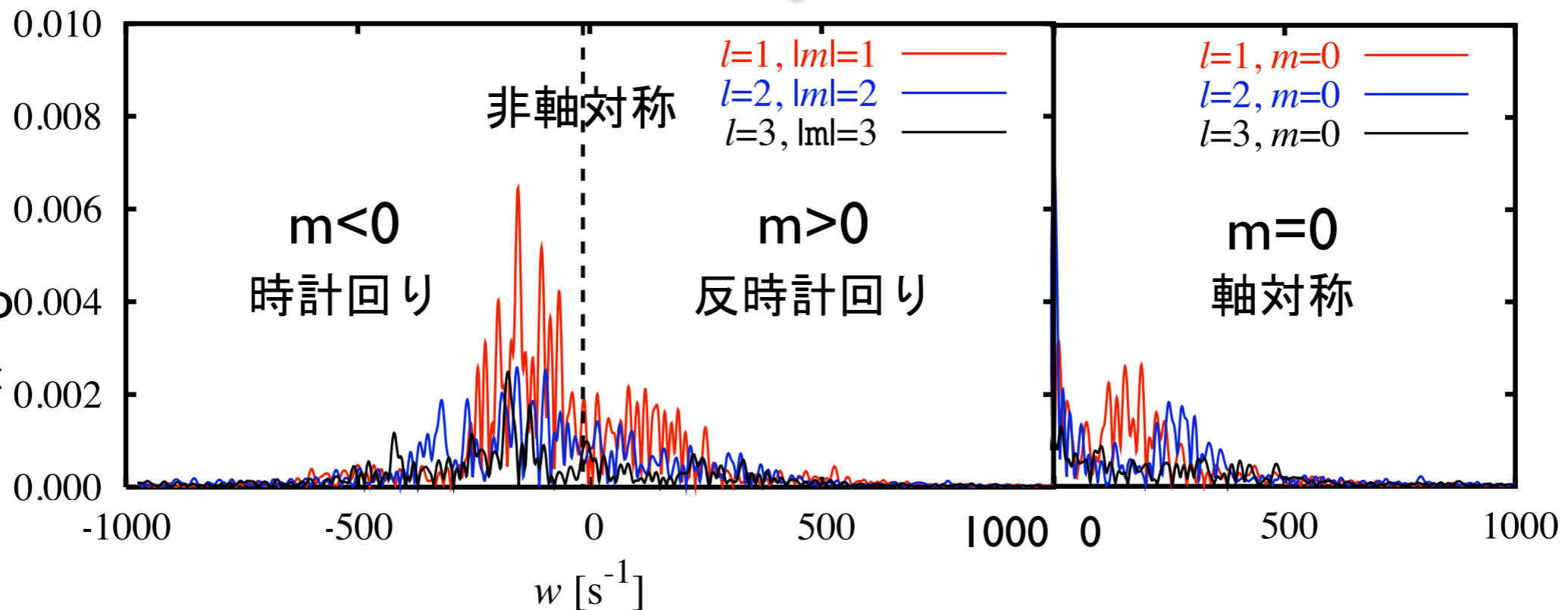


# 回転3DSASI非線形モード解析

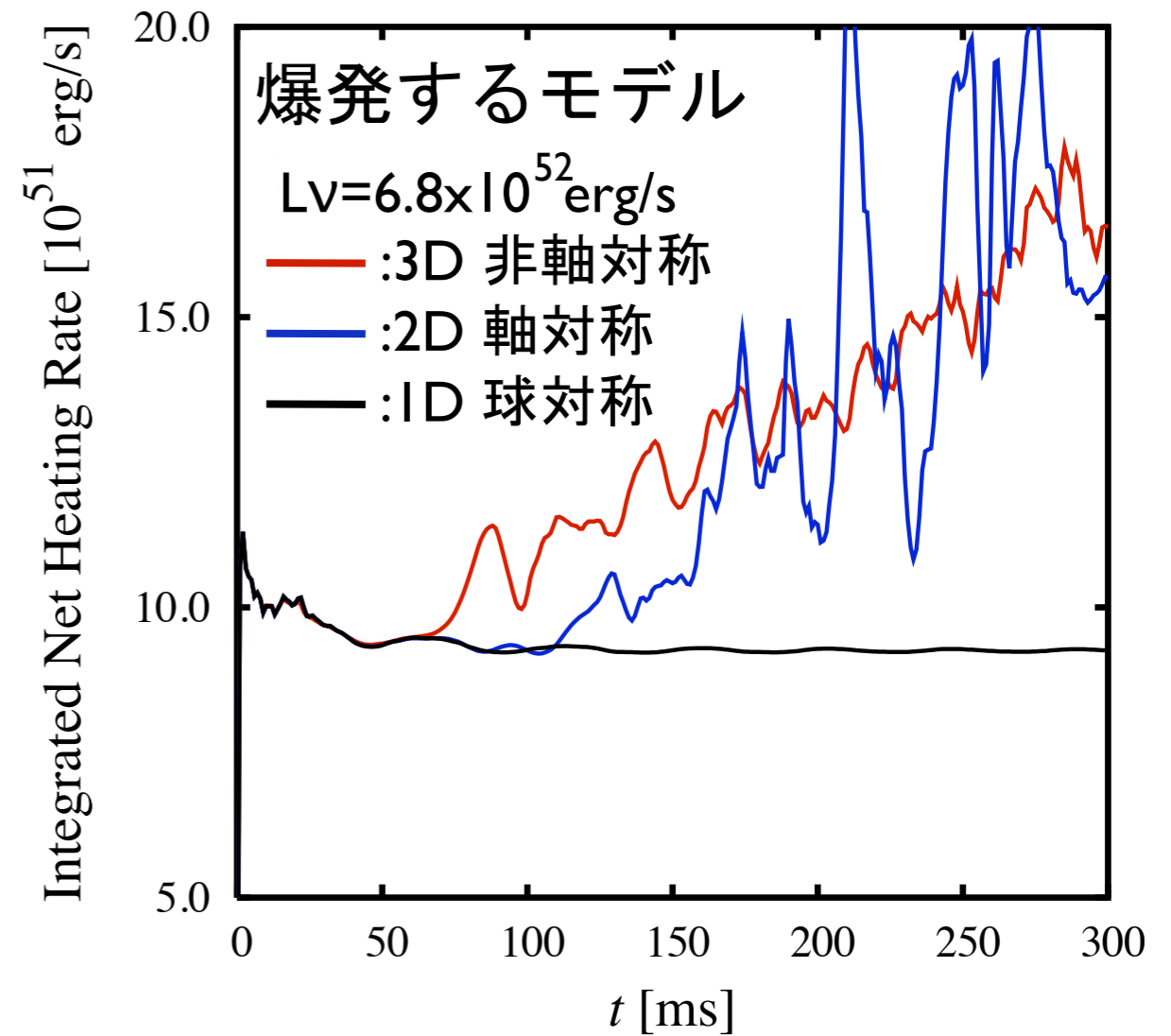
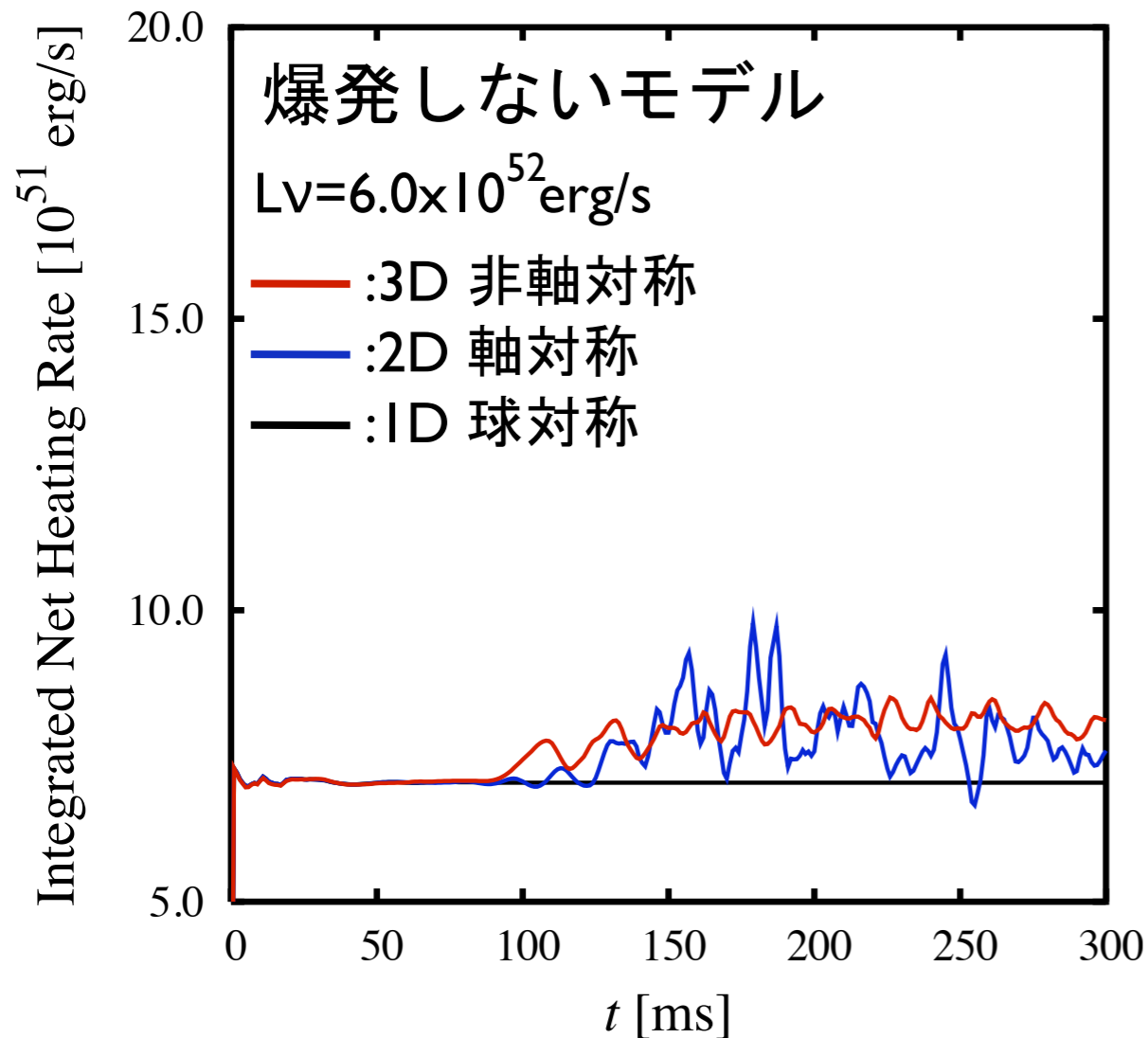
## 回転(時計周り)を入れた非軸対称流れ場

- 低次モードが支配的
- $m < 0$  のモード振幅が増大  
同じ方向に回転するスパイラルモードが卓越

Fourier Transformed Mode Amplitude  $|\tilde{c}_L^m|$   
モード振幅  $|c_L^m/c_0^0|$  をフーリエ展開



# ニュートリノ加熱率 回転なし



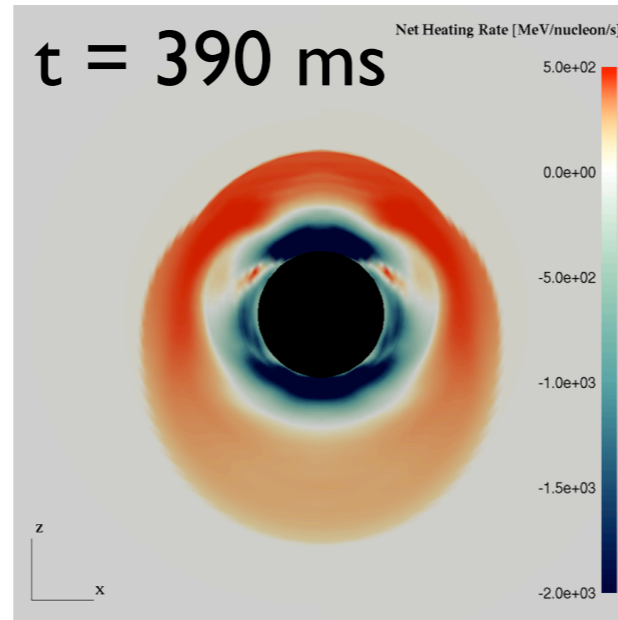
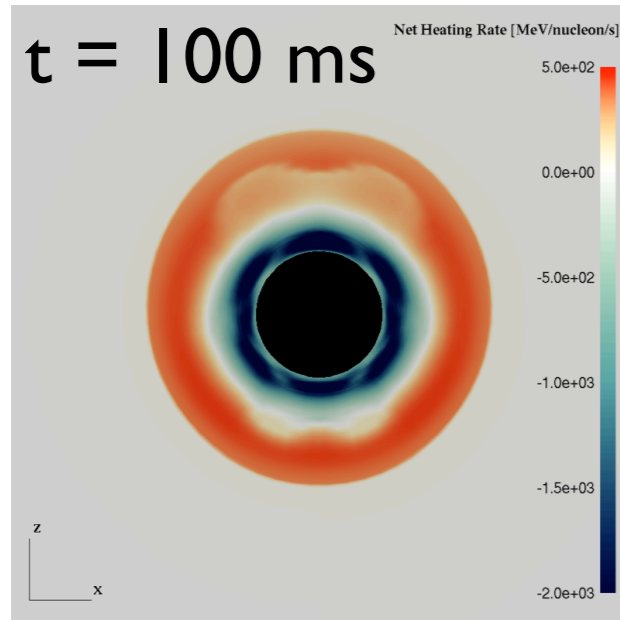
- 2Dと3Dでは臨界ニュートリノ光度はほぼ同じ
- 2Dでは瞬間的にニュートリノ加熱率が大きくなることがある
- 3Dではニュートリノ加熱率の変動は小さく、安定した加熱量が得られる

# ニュートリノ加熱率 回転なし

Late linear phase

Nonlinear phase

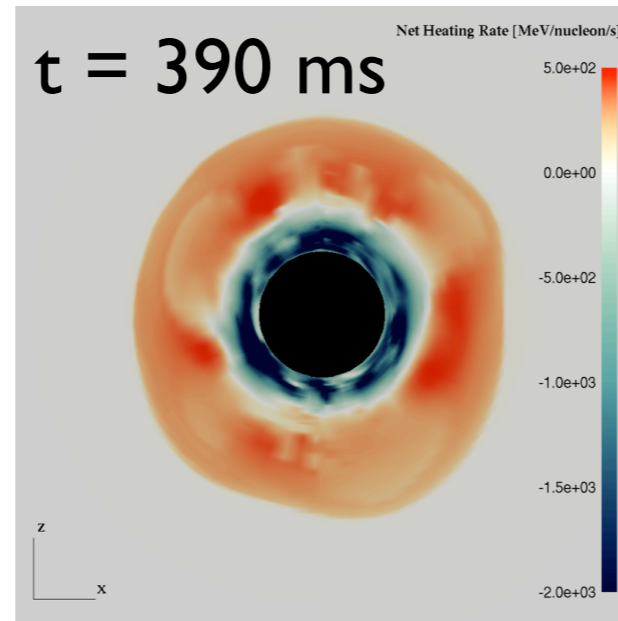
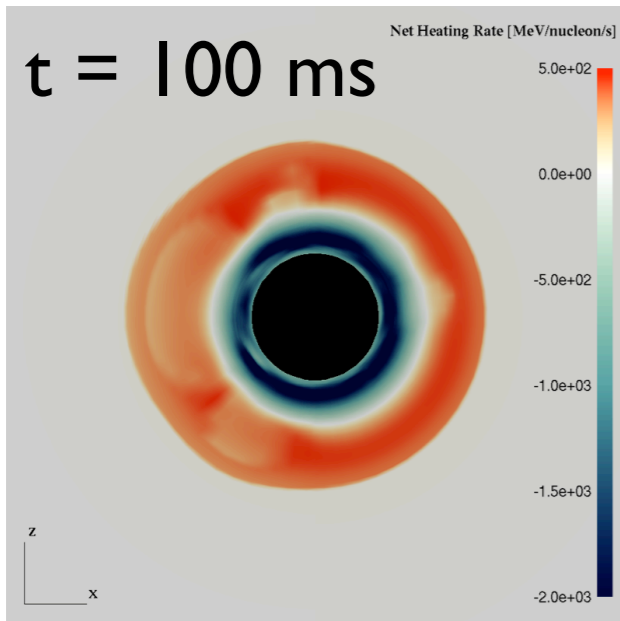
2D



- 高エントロピー領域は周囲の流体よりもニュートリノ加熱量が小さくなる

- 下から上へ循環流が形成される高エントロピー領域の下側で、冷却領域の面積が減少

3D

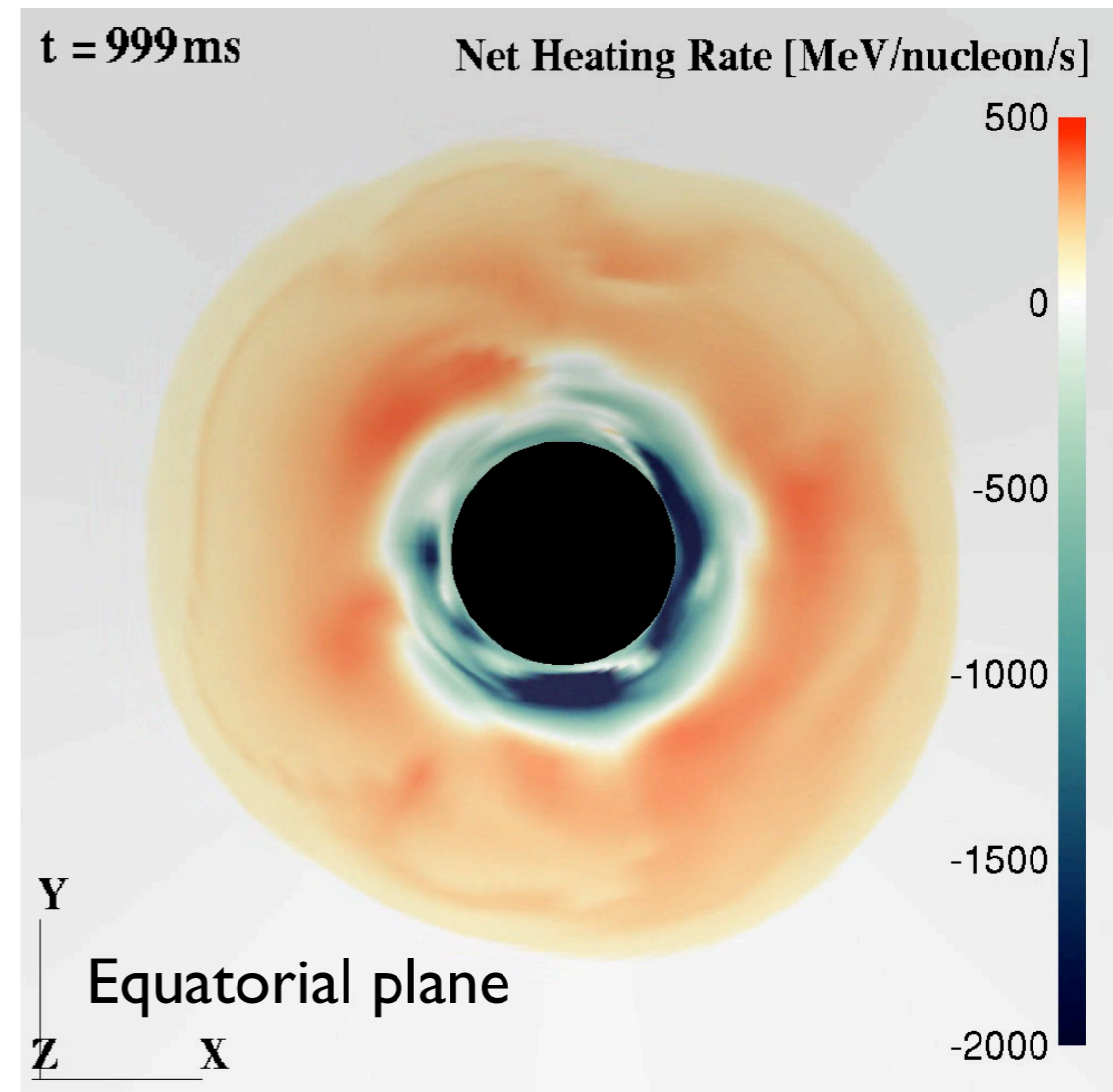
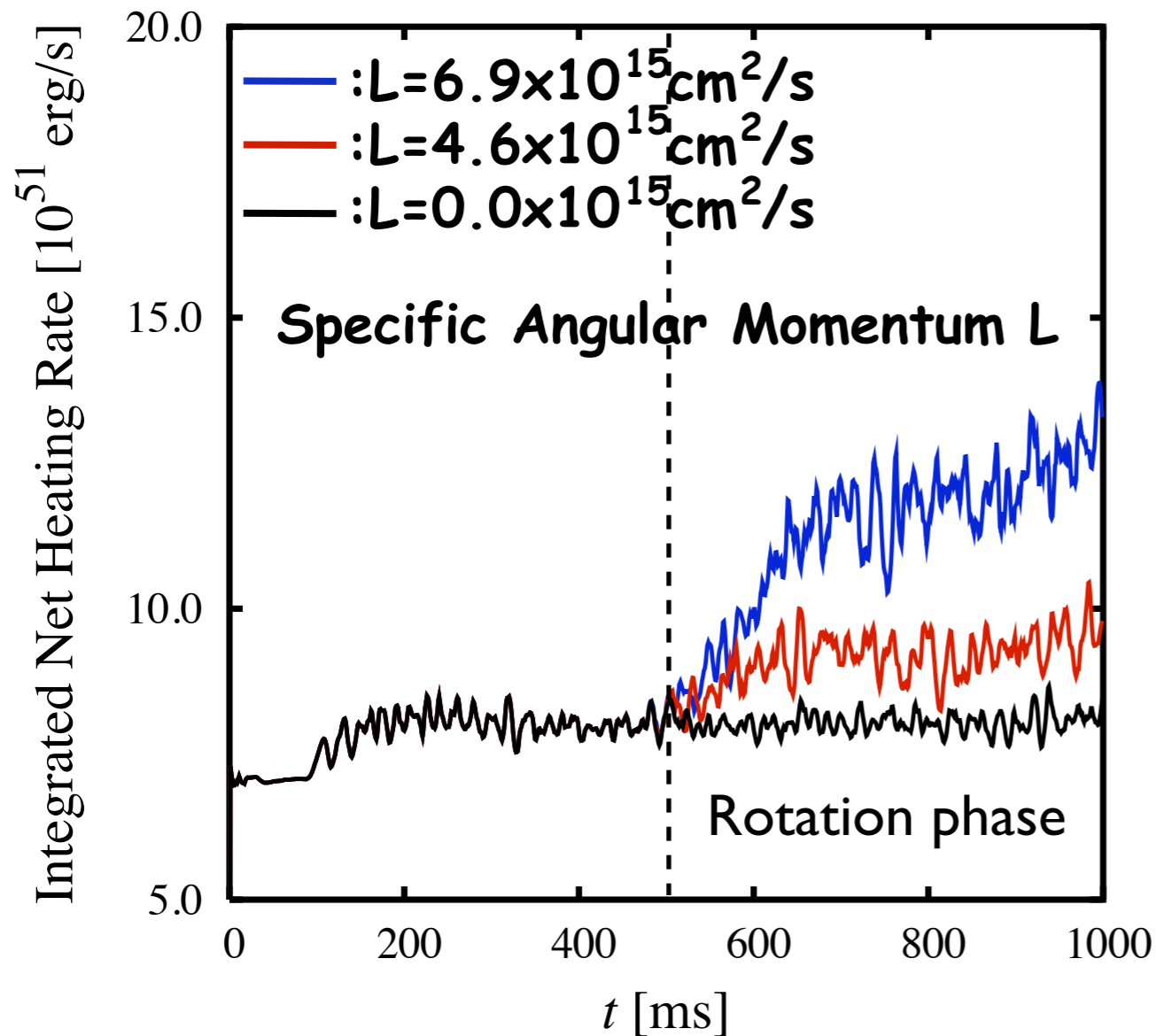


- 局所的に強く加熱される領域や冷却される領域が形成

- 2Dではその領域が大きい

- 3Dではその領域が小さく分かれている

# ニュートリノ加熱率 回転あり



- 回転を入れるとニュートリノ加熱量が増加する
- 回転速度が上昇するとニュートリノ加熱量が増加する傾向がある
- 回転を入れると高エントロピー領域が大きく広がる

# まとめ

---

---

SASIの三次元数値解析結果から、衝撃波形状に関するモード解析を行い、爆発への影響を調べた。

## 3DSASIの特徴

- 低次モードが支配的
- 非線形段階でのモード振幅は2Dの値よりも低くなる
- 特定のスパイラルモードだけが卓越することはない
- ニュートリノ加熱量は2Dで3Dそれほど変わらない

## 非線形領域における回転の効果

- 低次モードが支配的
- 同じ方向に回転するスパイラルモードが卓越する
- 回転を与えるとニュートリノ加熱量が増加する

ご清聴、ありがとうございました

岩上わかな