

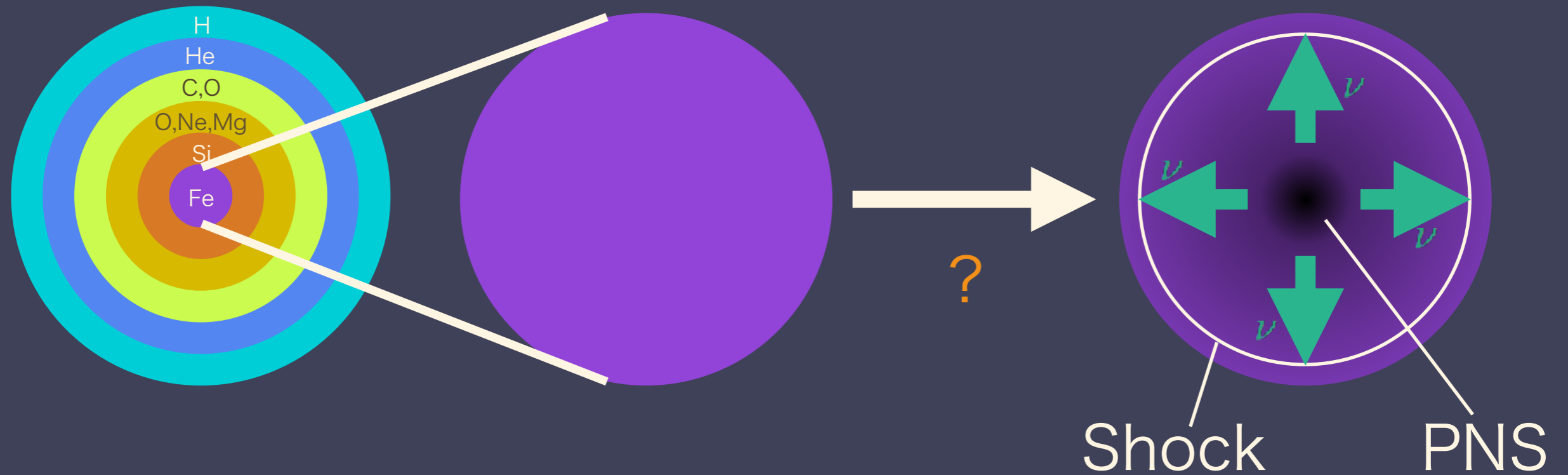
ボルツマン輻射輸送計算による 回転星の超新星爆発

原田 了 (東京大学)

共同研究者: 岩上わかな、大川博督、山田章一 (早稲田大学)

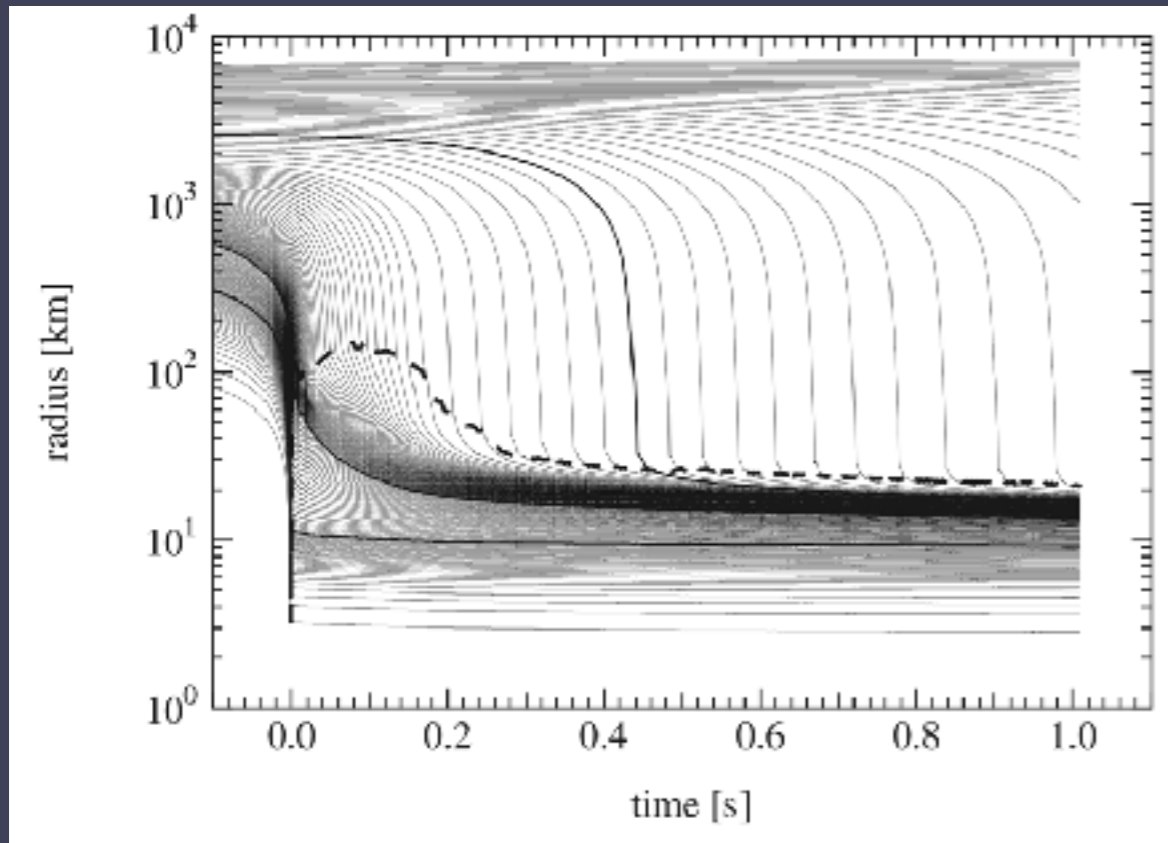
長倉洋樹 (Caltech)、住吉光介 (沼津高専)、松古栄夫 (KEK)

重力崩壊型超新星爆発

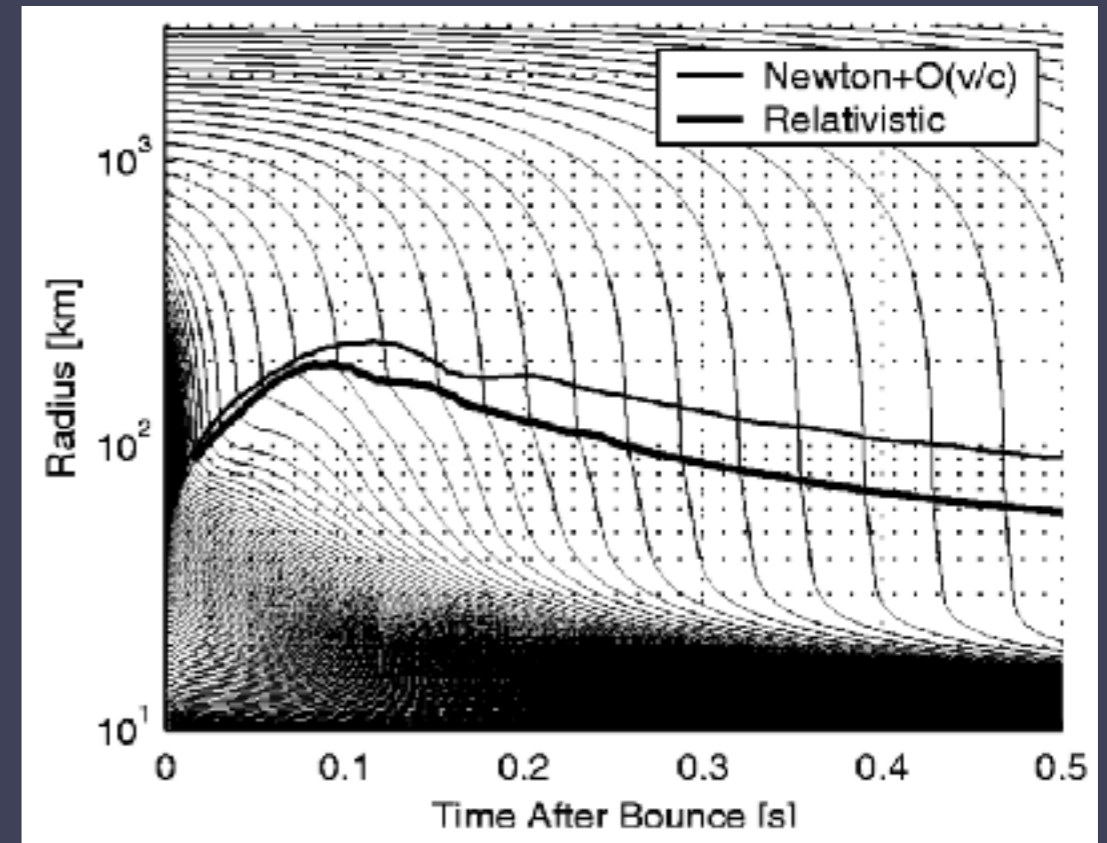


- ・ 重力崩壊→コアバウンス→停滞衝撃波
- ・ ニュートリノ加熱メカニズム？

ボルツマン輻射流体計算



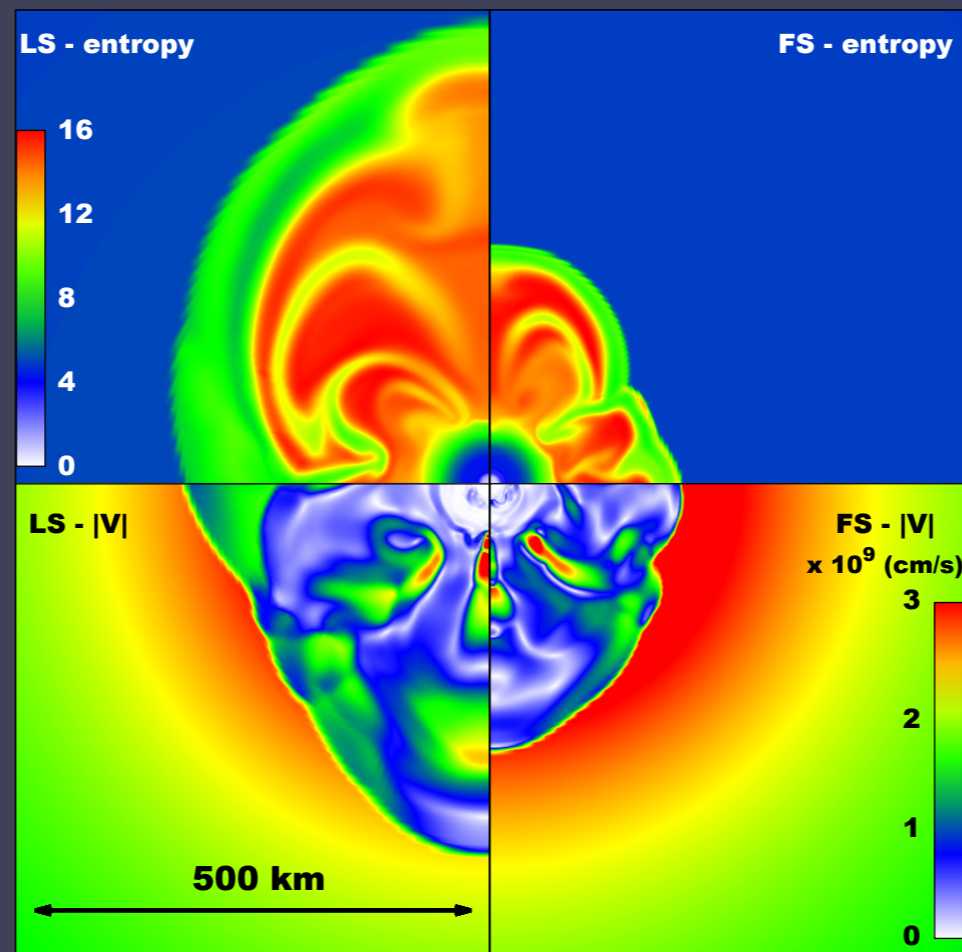
Sumiyoshi+ (2005)



Liebendoerfer+ (2001)

- ・球対称では爆発しない←ボルツマン輻射流体計算による
- ・多次元でも同様に、ボルツマン輻射流体計算をする

多次元ボルツマン輻射流体計算



Nagakura+ (2017)

- ・多次元ボルツマン輻射流体計算の結果は出始めている
- ・ $11.2 M_{\odot}$ (Woosley+ 2002)の重力崩壊
- ・状態方程式の比較を示す

セットアップ

- ・親星：11.2 M_⊙ (Woosley+ 2002)
- ・EOS：古澤EOS (多核種、相対論的平均場に基づく)
- ・ ν 反応：Bruennの標準セット
+GSI電子捕獲率、核子制動放射
- ・角速度プロファイル：Sheller回転

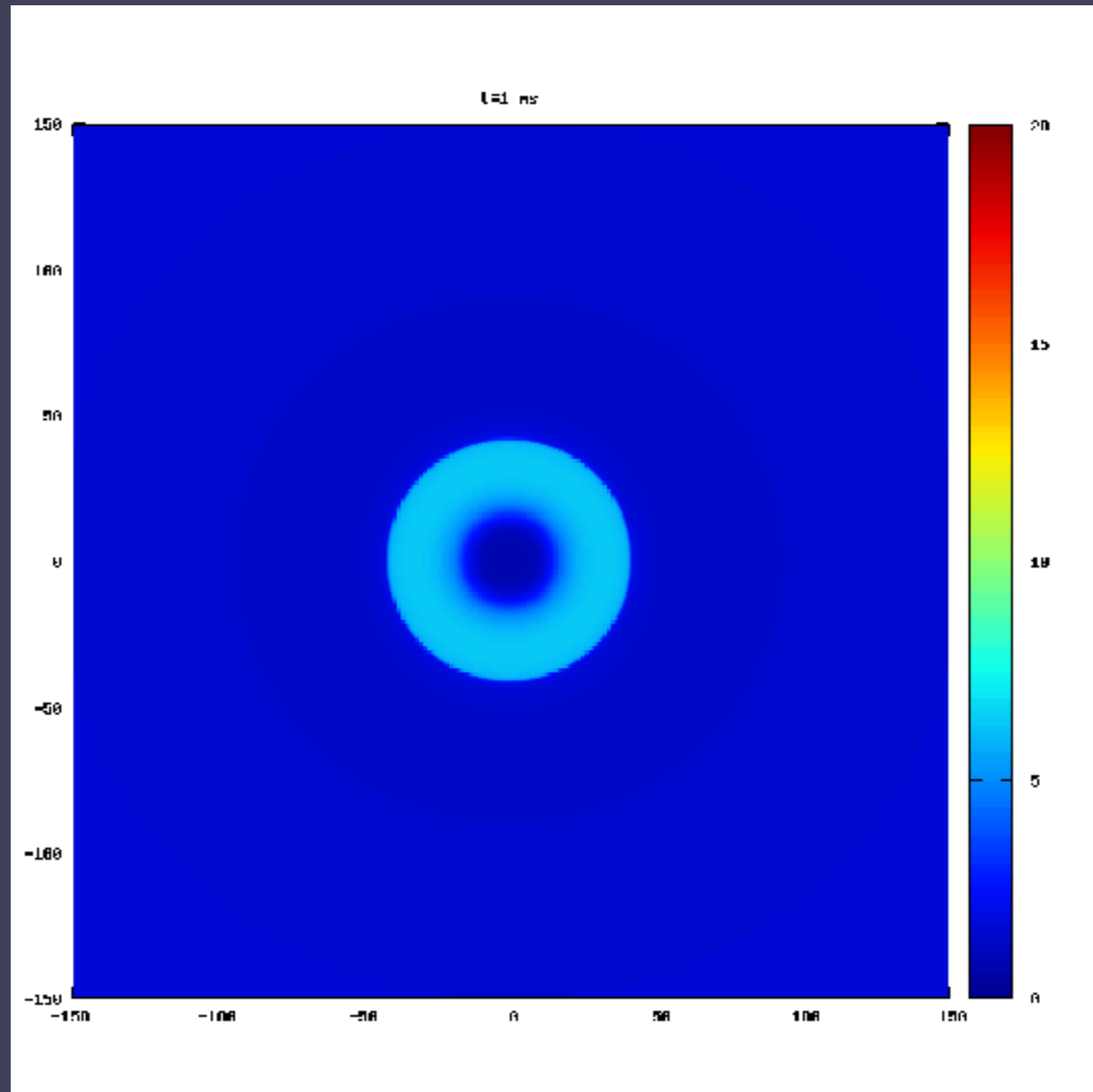
$$\Omega(r) = \frac{1 \text{ rad/s}}{1 + (r/10^8 \text{ cm})^2}$$

- ・グリッド：

$$(N_r, N_\theta, N_\phi, N_\nu, N_{\bar{\theta}}, N_{\bar{\phi}}) = (384, 64[128], 1, 20, 10, 6)$$

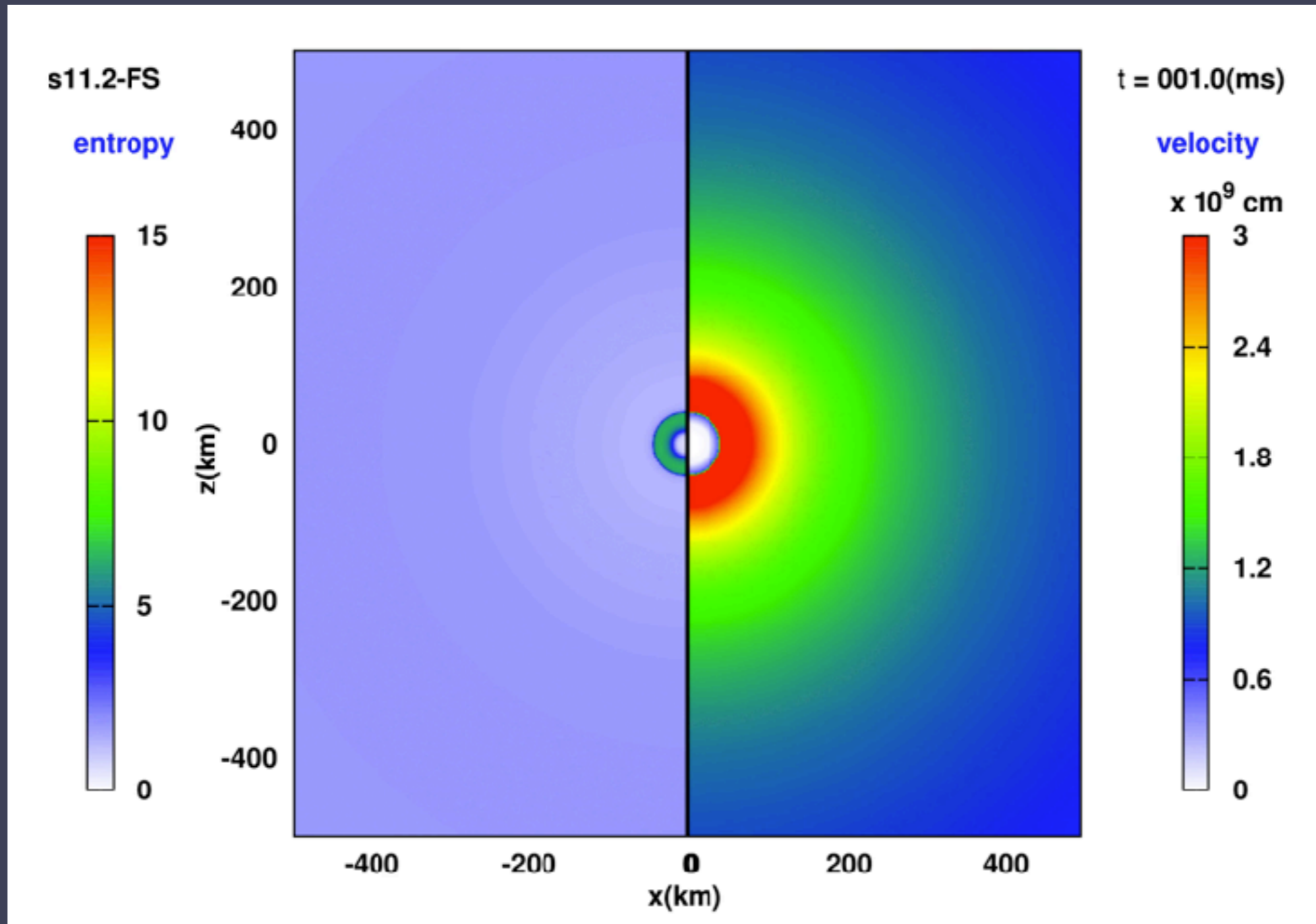
エントロピー分布 (回転モデル)

- ・バウンス後~200 msまでの時間発展



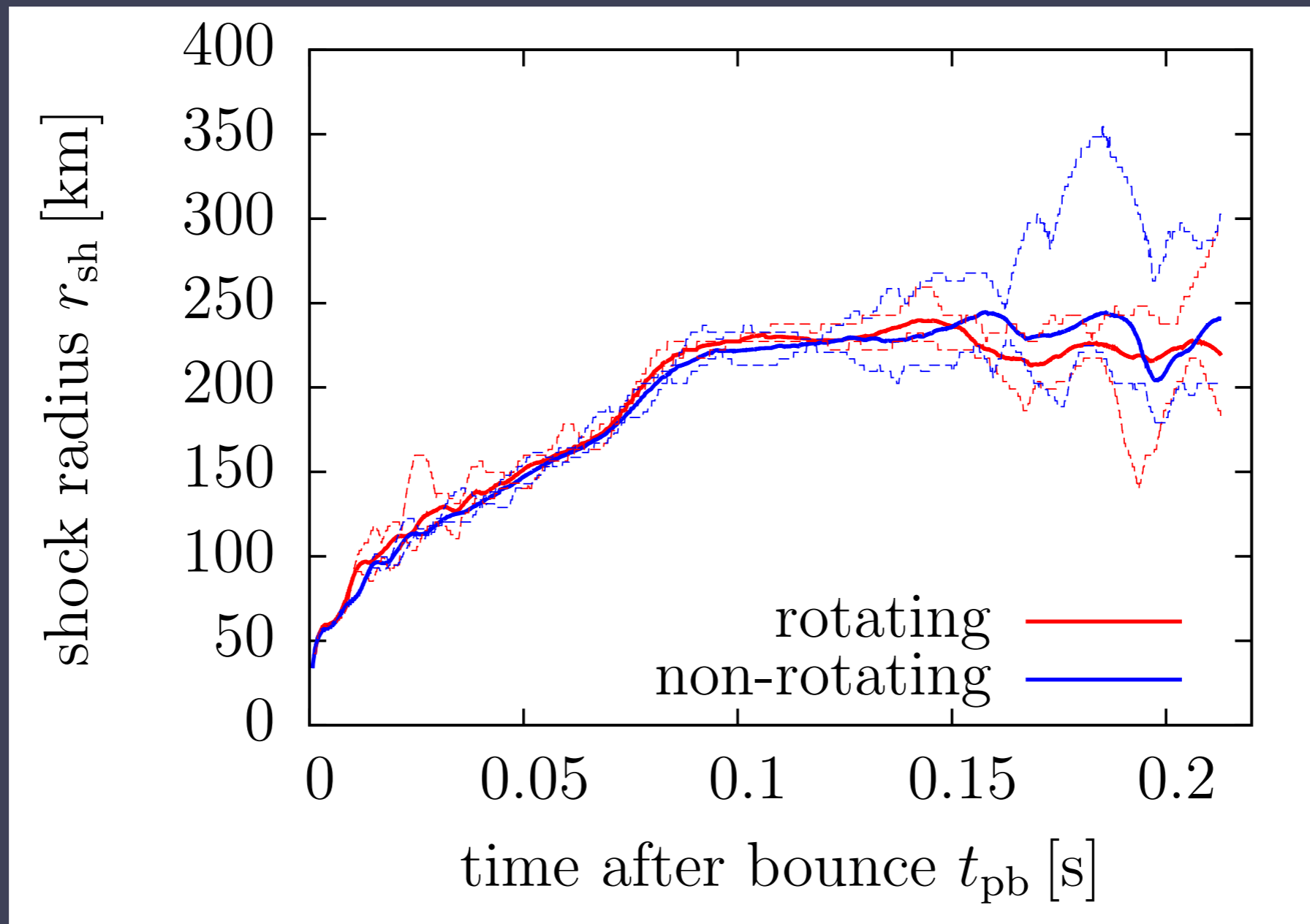
エントロピー分布 (無回転モデル)

- ・バウンス後~200 msまでの時間発展



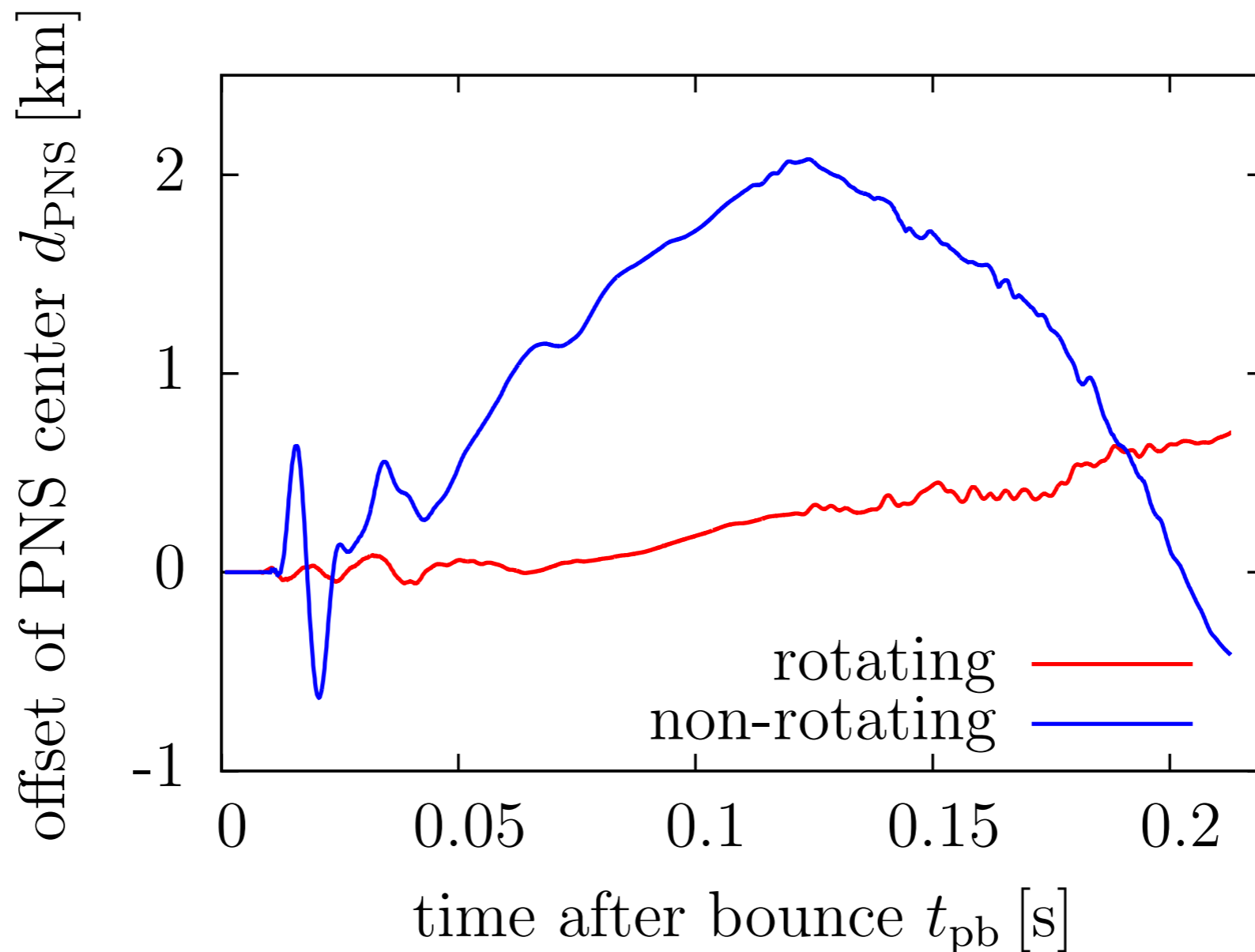
衝撃波の時間発展

- ・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



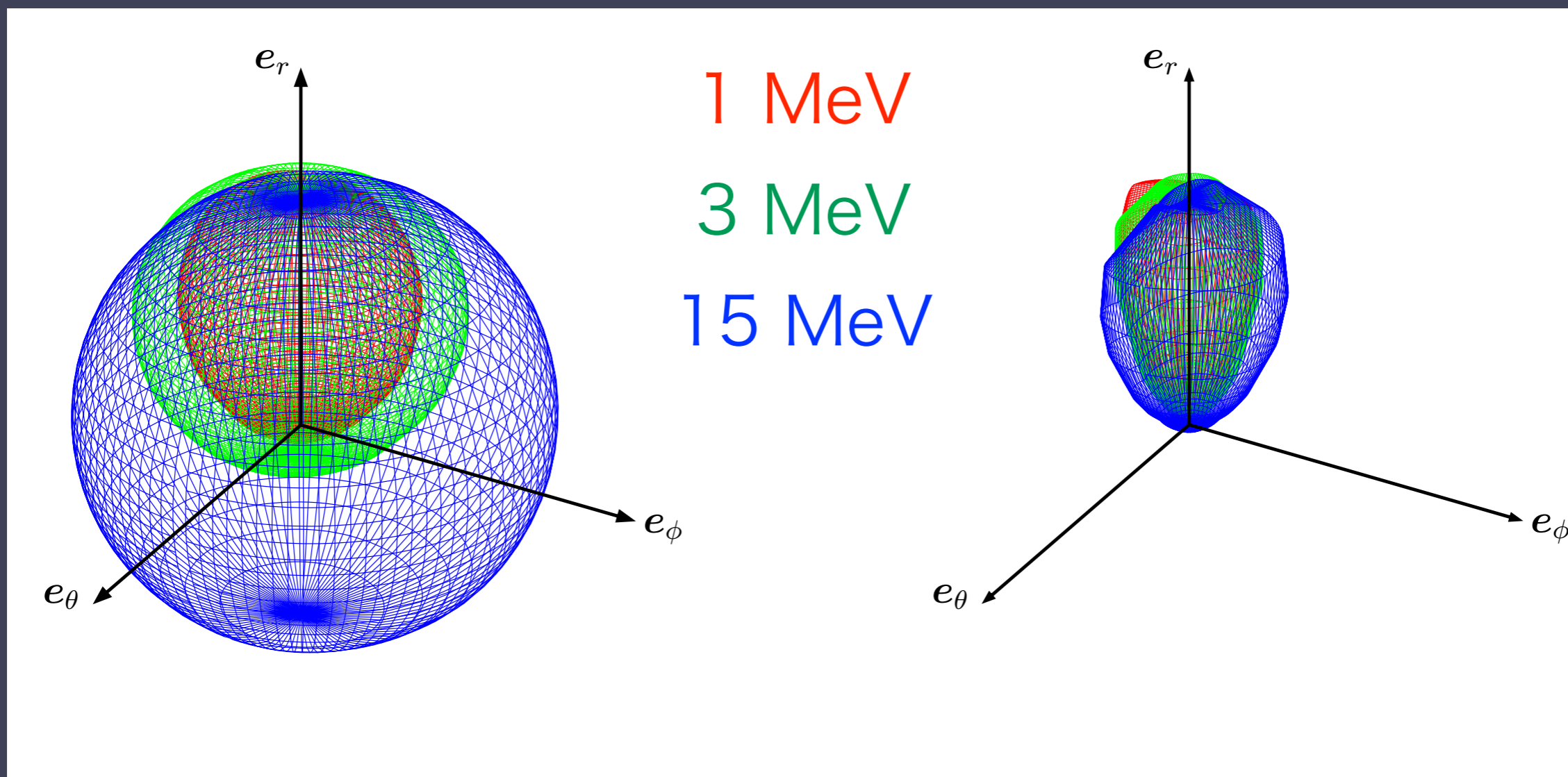
原始中性子星中心の軌跡

- ・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



ニュートリノ分布関数

- ・バウンス後~10 msでの分布関数

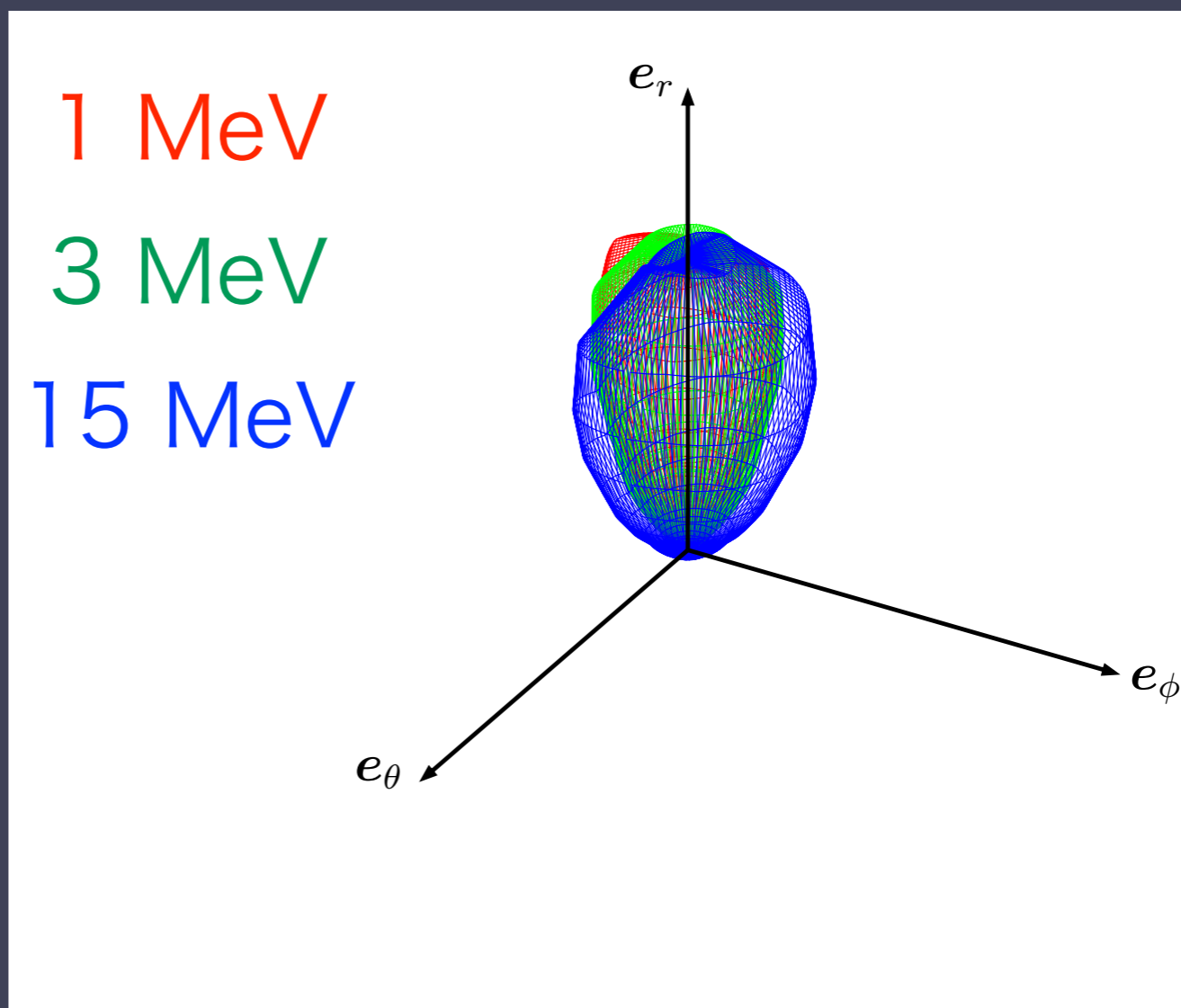
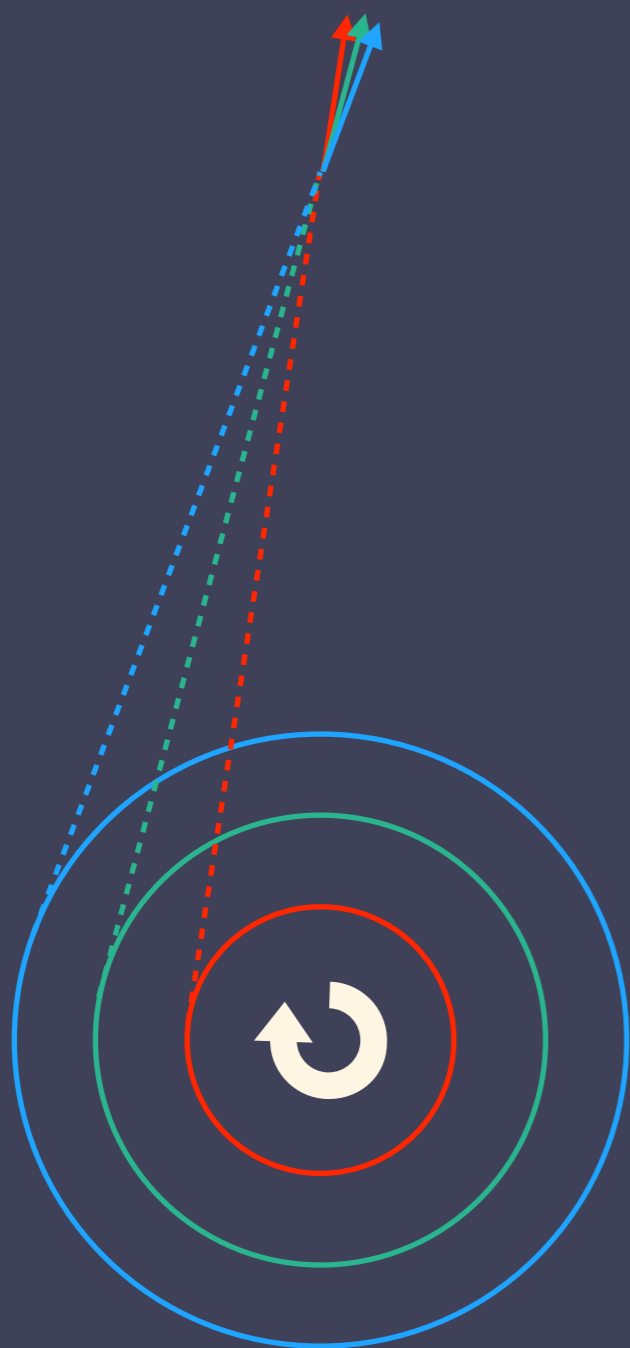


~60 km

~170 km

ニュートリノ分布関数

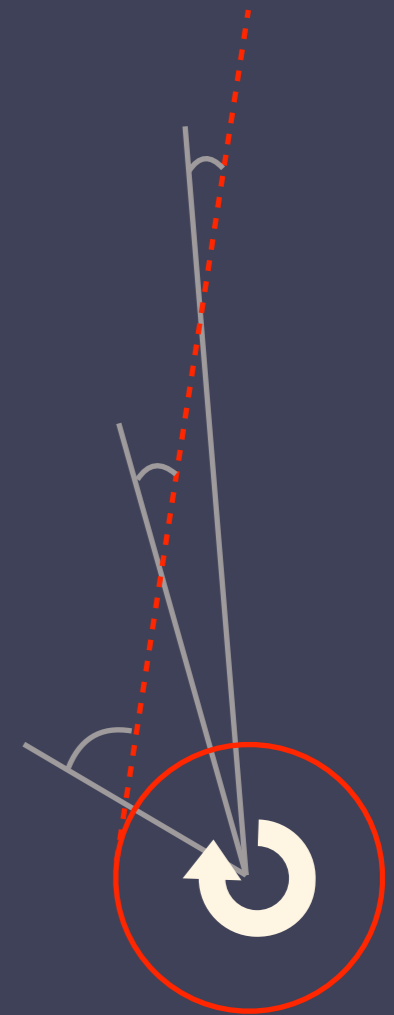
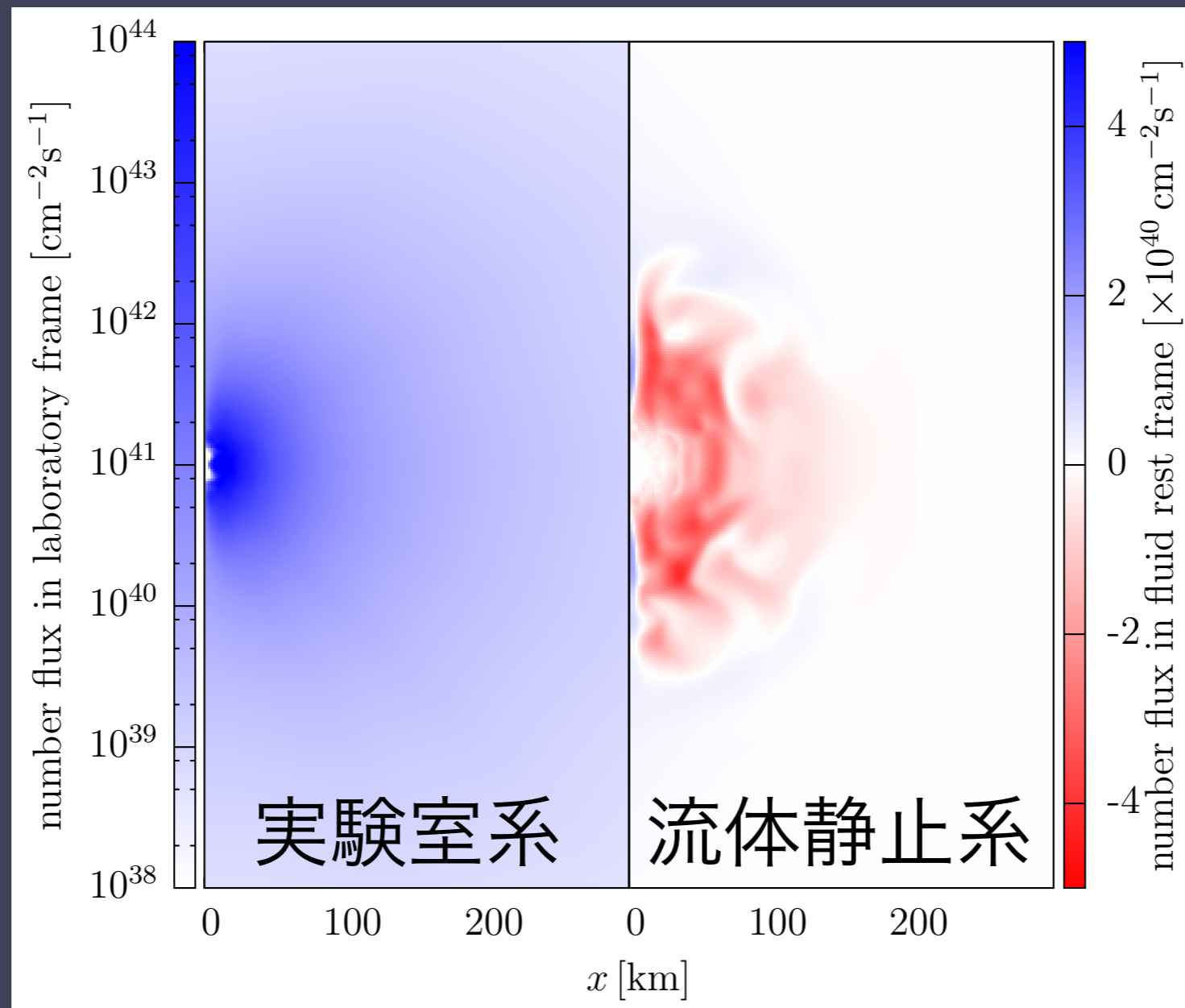
- ・バウンス後~10 msでの分布関数



~170 km

ニュートリノフラックス

- ・バウンス後~10 msにおける回転方向のニュートリノフラックス
- ・流体静止系と実験室系でフラックスの符号が違う
- ・Ray-by-Ray近似では見られない特徴



エディントンテンソル

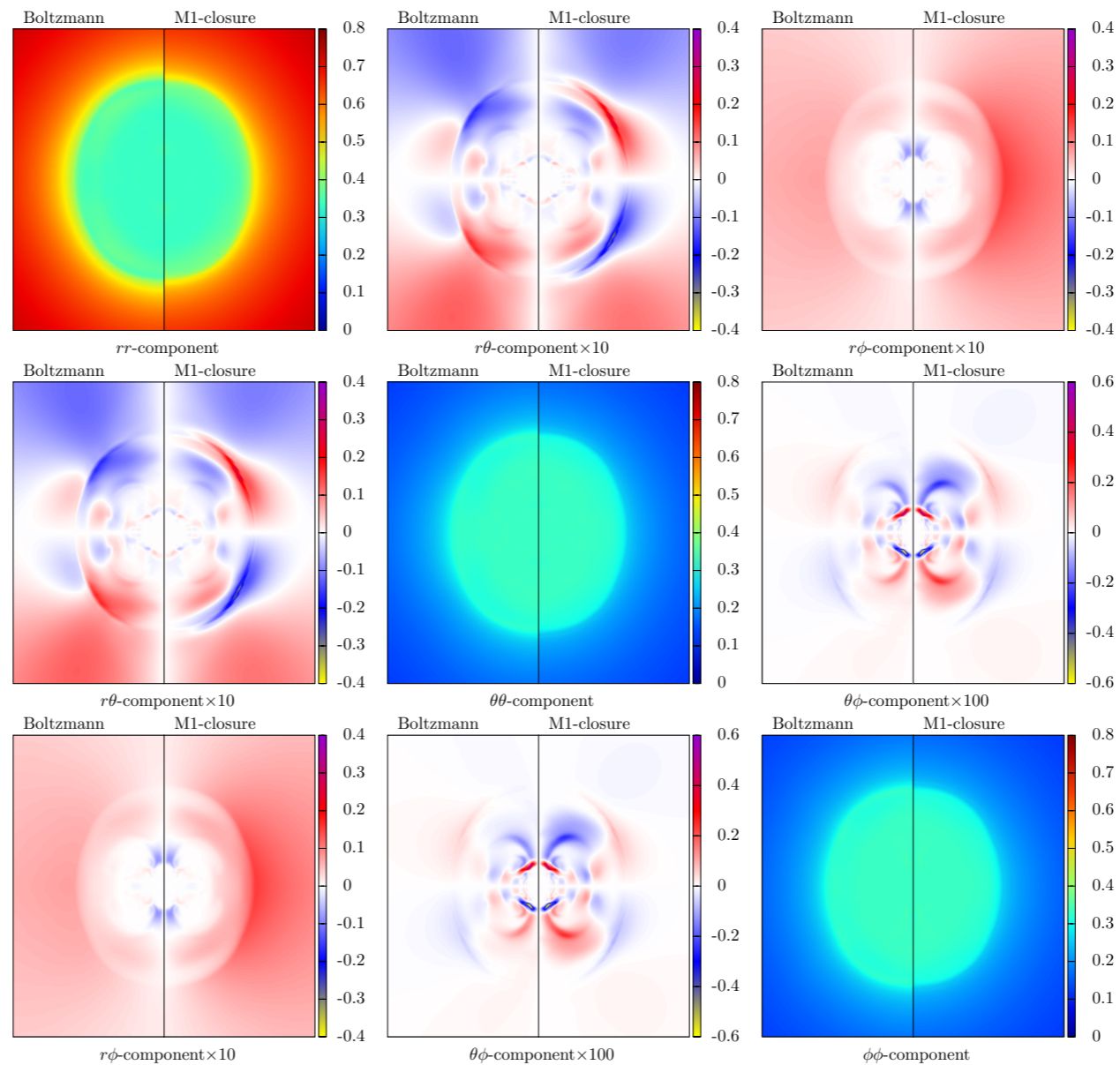
- ・M1-closure法の評価-エディントンテンソル

$$E^{ij} = \begin{cases} \frac{\int f n^i n^j d\Omega}{\int f d\Omega} \\ \frac{3\chi - 1}{2} \delta^{ij} + \frac{1 - \chi}{2} \frac{F^i F^j}{F^2} \end{cases}$$
$$w/\chi = \frac{3 + 4\tilde{F}^2}{5 + 2\sqrt{4 - 3\tilde{F}^2}}, \quad \tilde{F} = \frac{|\mathbf{F}|}{E}$$

エディントンテンソル

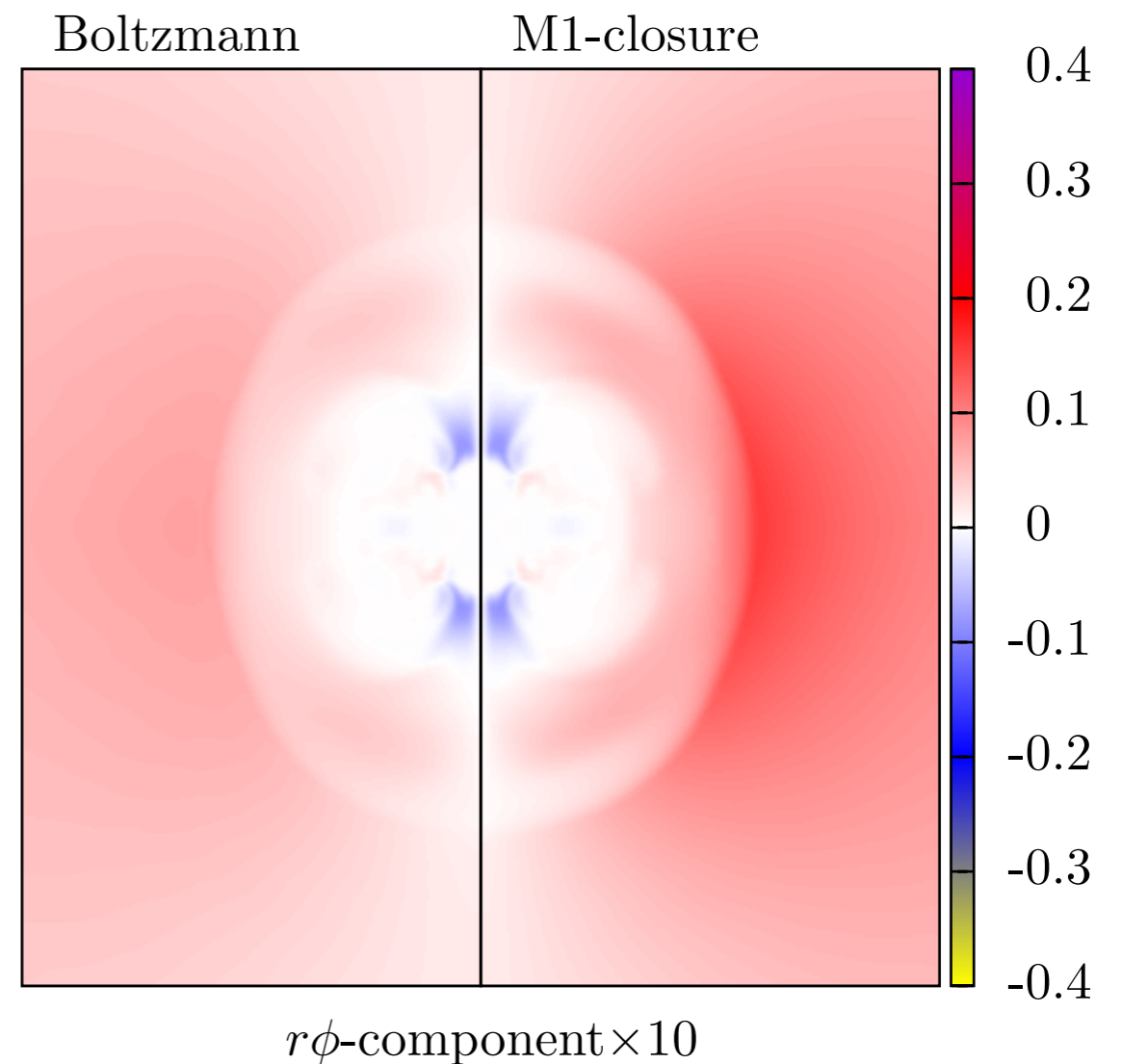
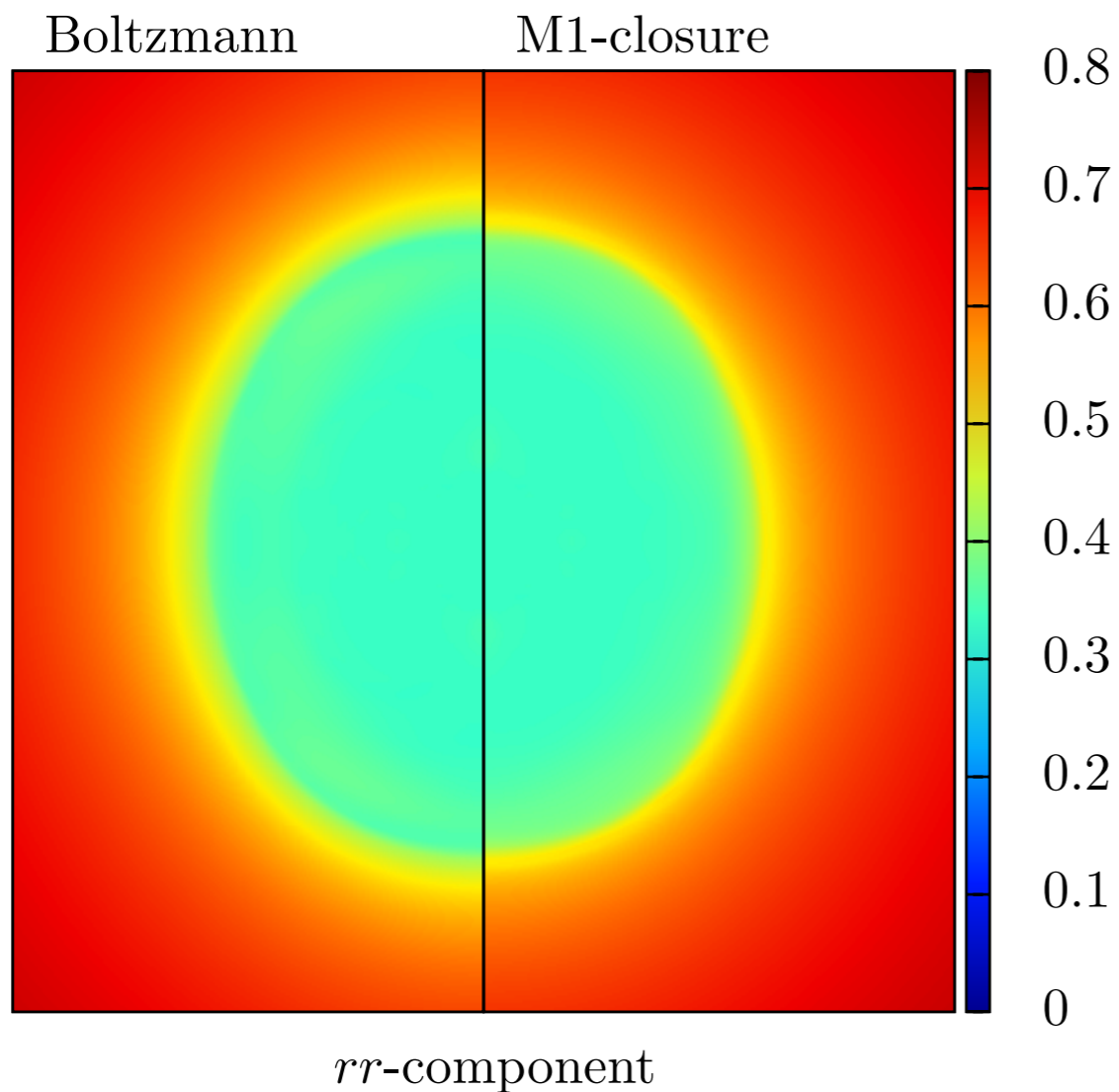
- バウンス後~10 msにおけるエディントンテンソル

$$E^{ij} =$$



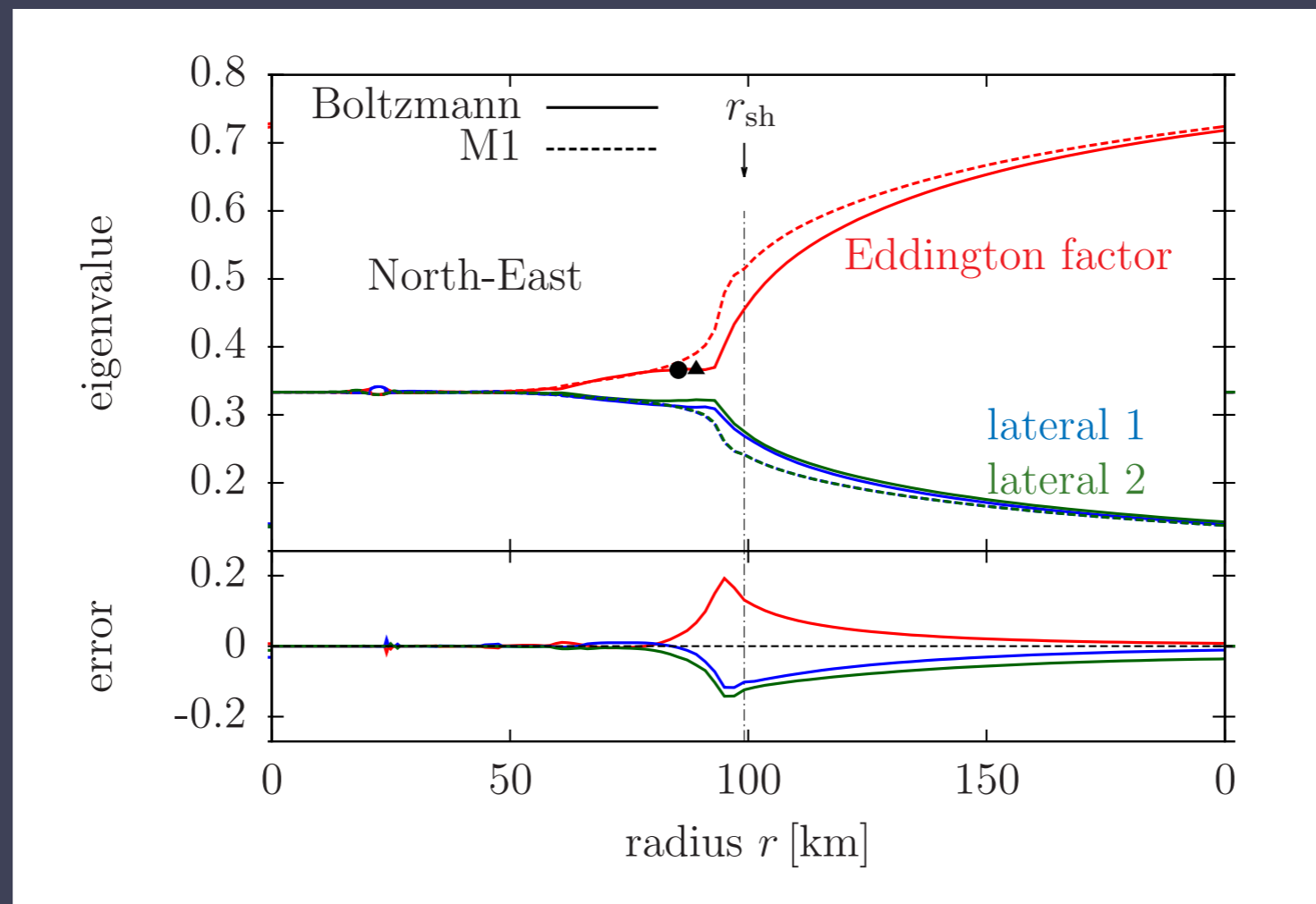
エディントンテンソル

- ・バウンス後~10 msにおけるエディントンテンソル
- ・分布関数から計算したものと、M1-closure法との比較



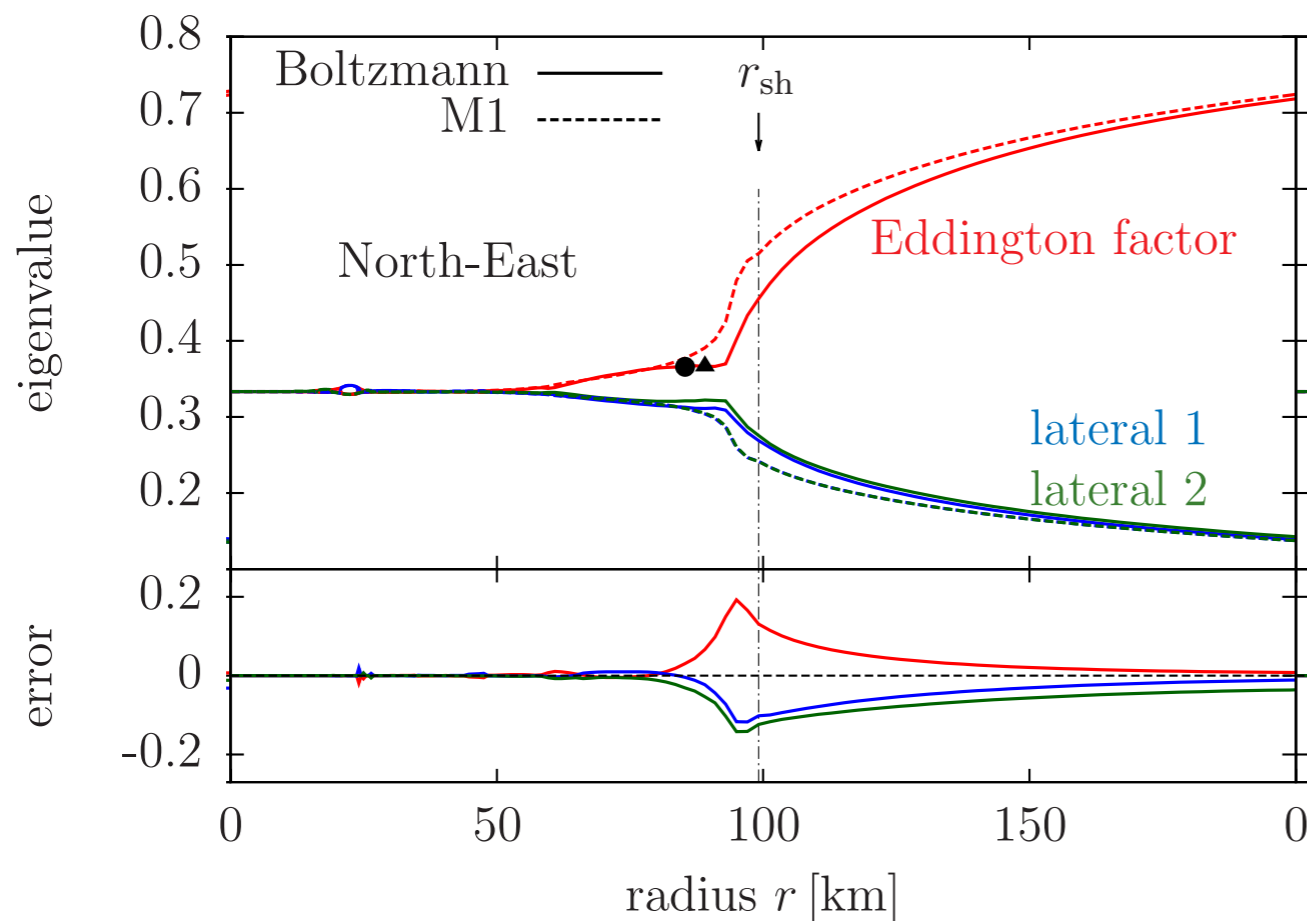
エディントンテンソル

- ・バウンス後~10 msにおけるエディントンテンソル
- ・固有値の空間分布
- ・M1-closure法に20%程度の誤差



エディントンテンソル

- ・フラックス因子が増大してもエディントン因子が増大しない領域がある

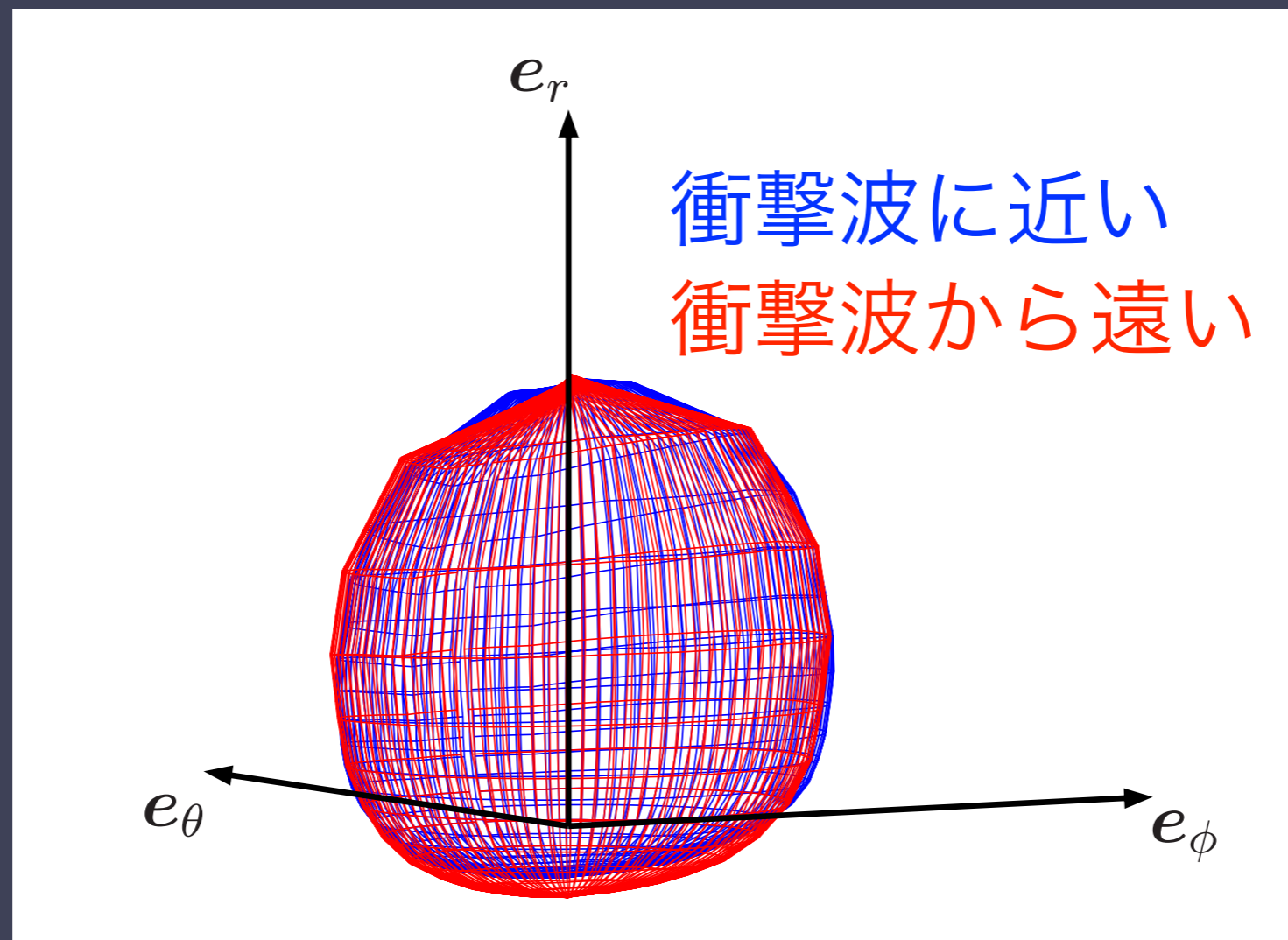


$$\chi = \frac{3 + 4\tilde{F}^2}{5 + 2\sqrt{4 - 3\tilde{F}^2}}, \quad \tilde{F} = \frac{|\mathbf{F}|}{E}$$

$$\tilde{F} \nearrow \Leftrightarrow \chi \nearrow \text{ for M1}$$

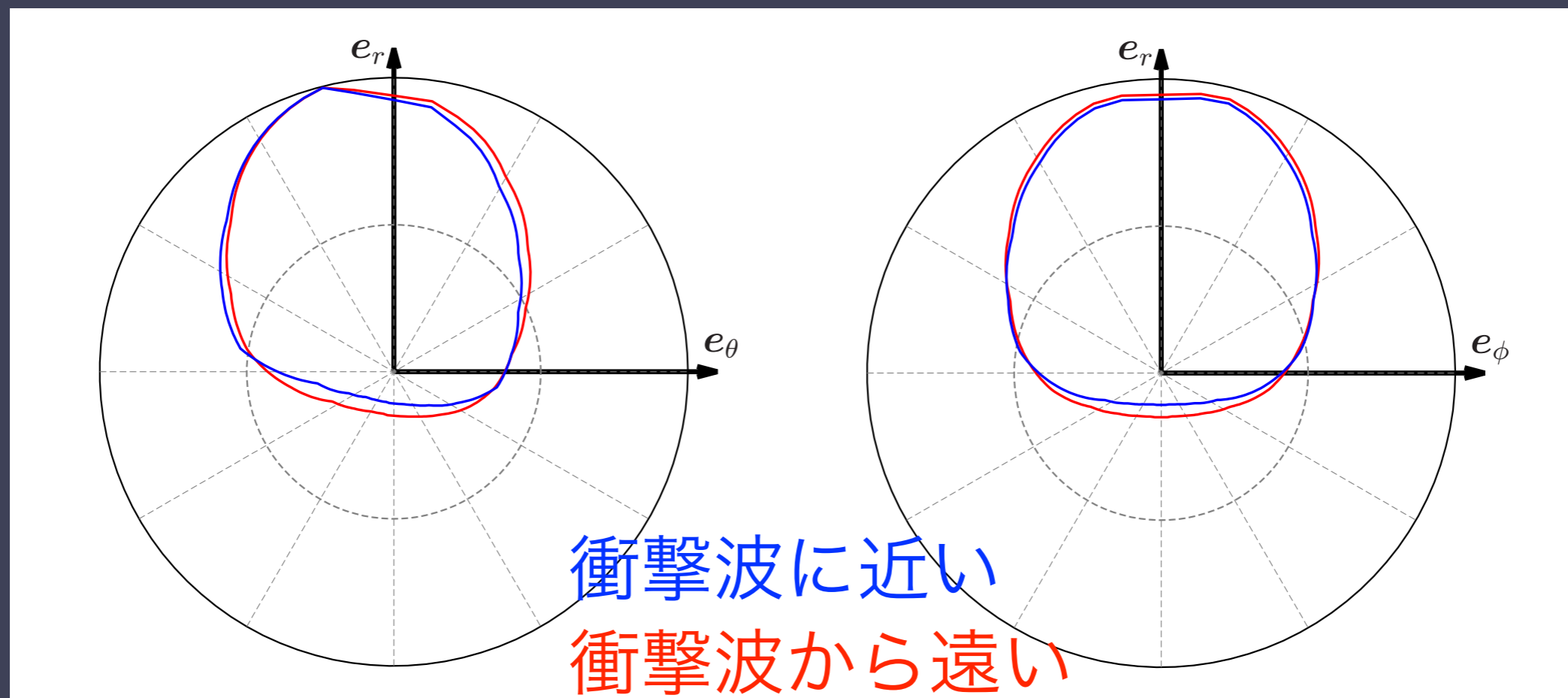
エディントンテンソル

- ・フラックス因子が増大してもエディントン因子が増大しない領域がある
- ・分布関数の比較



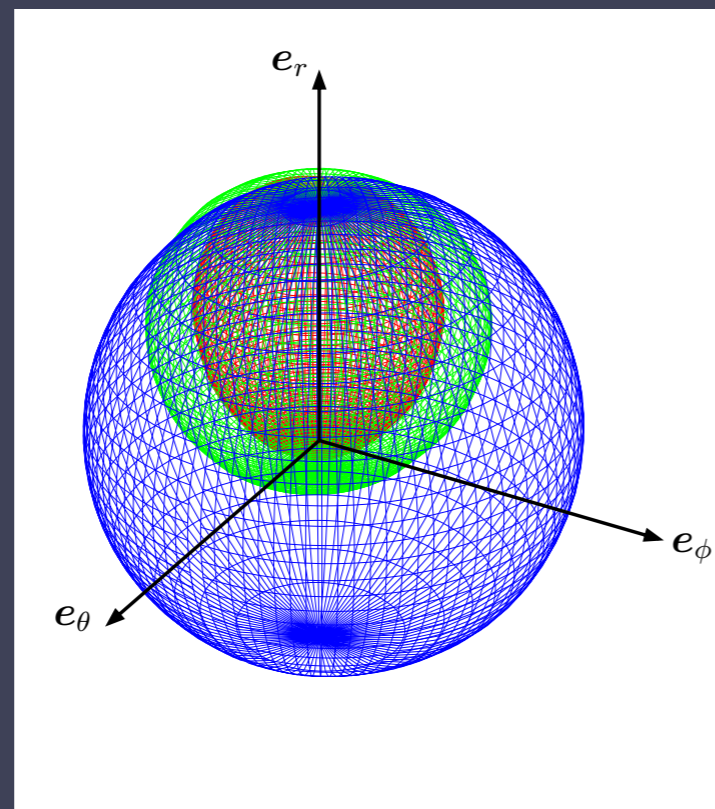
エディントンテンソル

- ・フラックス因子 $\propto \langle \cos \theta_\nu \rangle$
- ・エディントン因子 $\propto \langle \cos^2 \theta_\nu \rangle$
- ・衝撃波に近づくと $\cos \theta_\nu \sim -1$ の分布関数が減り、フラックス因子を増やしながらかエディントン因子を減らす。

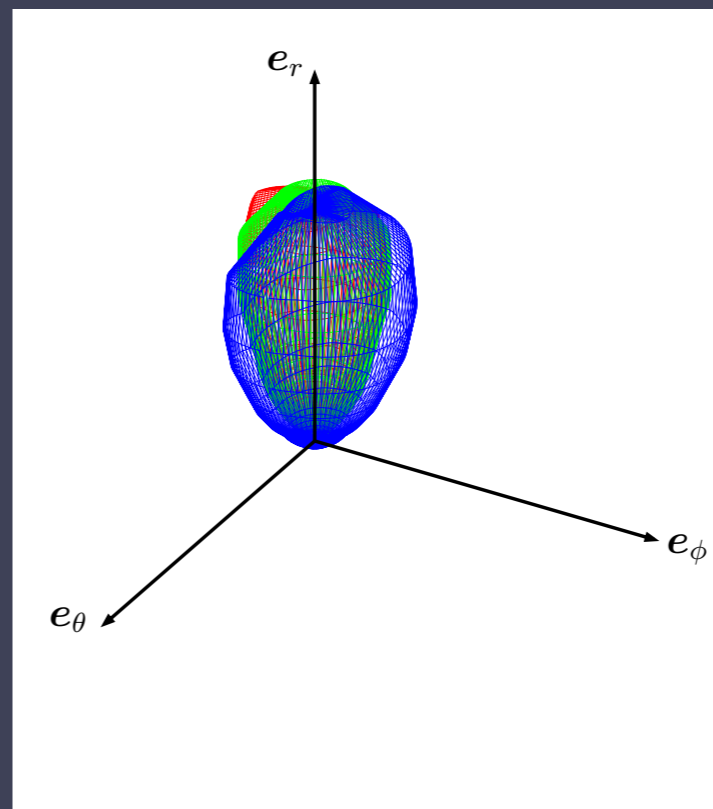


まとめ

- ボルツマン輻射流体コードで、回転星の重力崩壊を計算
- 近似的輻射輸送では表せない特徴を再現
- M1-closure法のキャリブレーションに使える可能性



~60 km



~170 km

Thank you for listening!