

ボルツマンニュートリノ輻射流体コード による原始中性子星冷却計算及び今後の コード開発の展望

赤穂龍一郎 (早稲田大学)

共同研究者: 原田了(RIKEN)、長倉洋樹(NAOJ)、岩上わかな(早大)、大川博督(早大高等研)、古澤峻(関学大)、松古 栄夫(KEK)、住吉光介(沼津工専)、山田章一(早大)

超新星とニュートリノ

観測シグナル

- 電磁シグナル観測ではわからない内部の情報が得られる。(バウンス等)
- 深部の高密度物理のプローブとして使える。

ダイナミクス

- 解放される重力エネルギーの99%以上はニュートリノに変換される。(爆発エネルギーは1%)
- ミクロな反応が周囲の物質の巨視的ダイナミクスに大きな影響を与える。

重力崩壊コア内ニュートリノ

自由粒子

$$f \propto \frac{1}{r^2}$$

$$f = \frac{1}{1 + \exp((\epsilon - \mu)/kT)}$$

等方, 熱平衡

中間領域:
非自明な分布



ニュートリノ輸送

厳密手法

- ボルツマン輸送 (S_N or spectral)
- モンテカルロ法

近似手法

- M1 closure (two-moment transport)
- Flux-limited diffusion (FLD) approximation
- Isotropic Diffusion Source Approximation (IDSA)
- $\vdots$

近似法の例: モーメント法

$$f(r, \theta, \phi, \epsilon, \theta_\nu, \phi_\nu)$$

Boltzmann equation

$$\frac{\partial f}{\partial t} + p^i \frac{\partial f}{\partial x^i} + \dot{p}^i \frac{\partial f}{\partial p^i} = C$$



角度モーメント

$$E(r, \theta, \phi, \epsilon)$$

$$F^i(r, \theta, \phi, \epsilon)$$

$$P^{ij}(r, \theta, \phi, \epsilon)$$

Moment equation

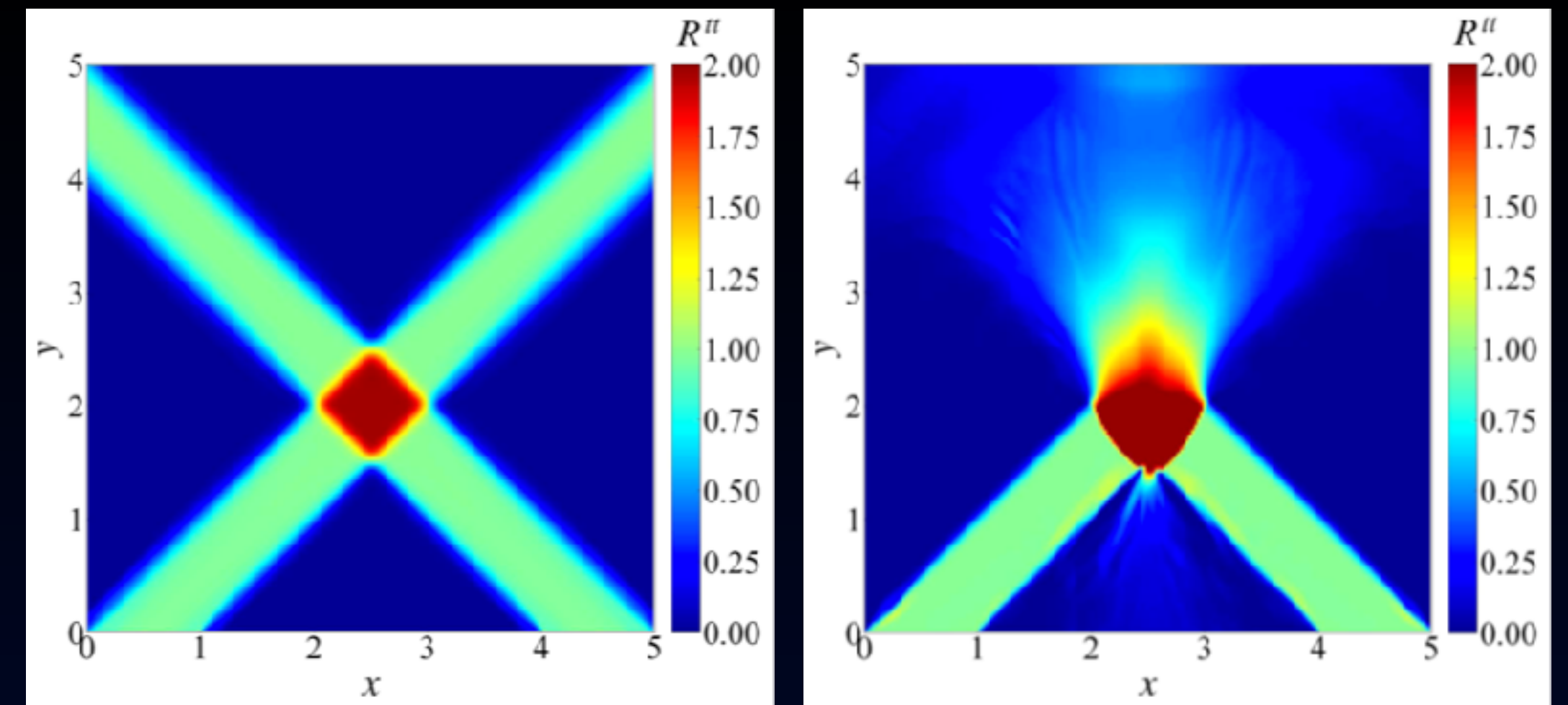
$$\frac{\partial E}{\partial t} = L_1(E, F^i, P^{ij})$$

$$\frac{\partial F^i}{\partial t} = L_2(E, F^i, P^{ij})$$

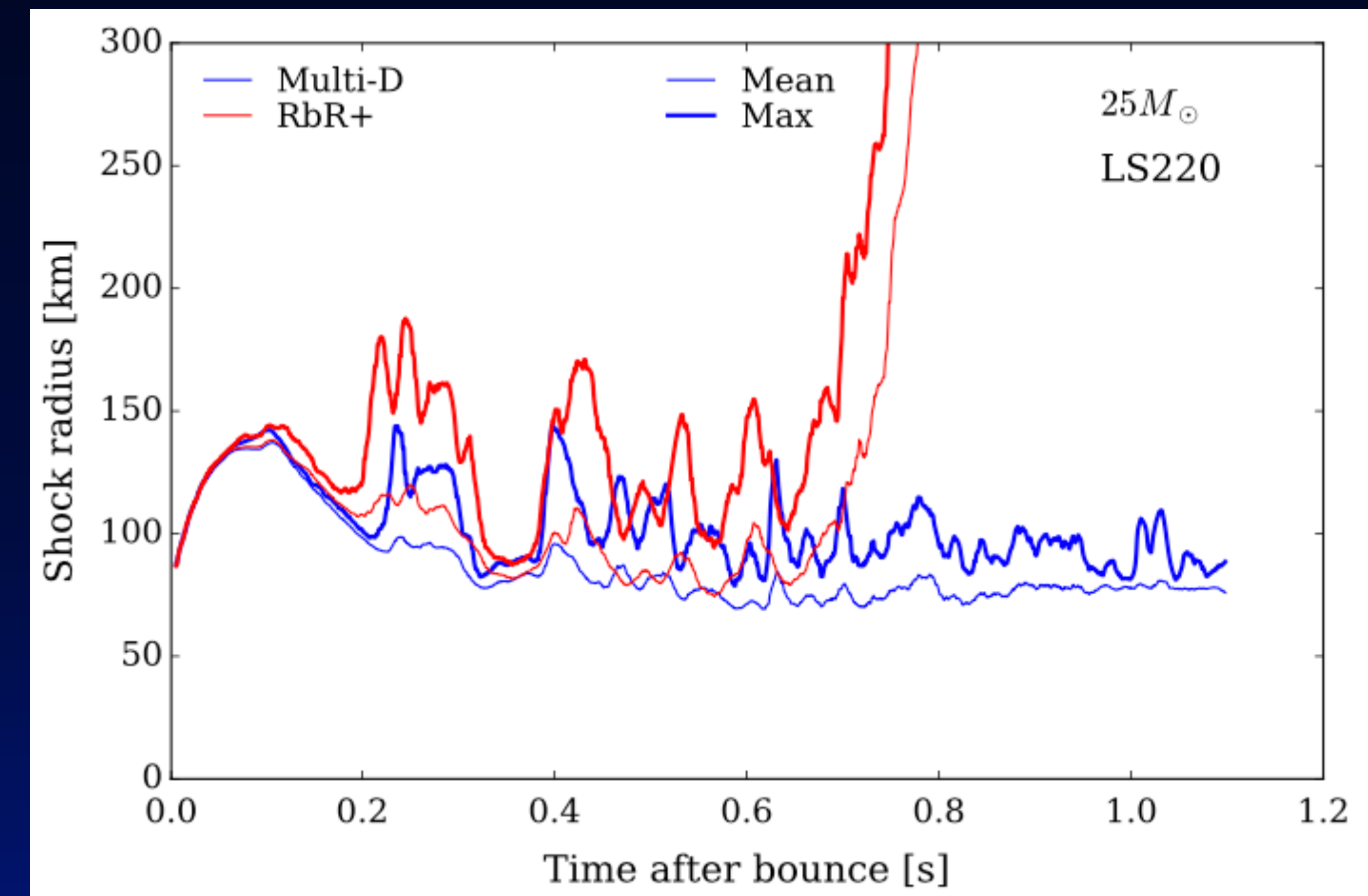
$$\text{Closure: } P_{M1}^{ij} = \frac{3\chi - 1}{2} P_{thin}^{ij} + \frac{3(1 - \chi)}{2} P_{thick}^{ij}$$

近似法の影響

- 些細な近似が爆発の有無さえ変えてしまうこともある。
- 厳密手法による計算例が少ないため、近似法の妥当性は不明。



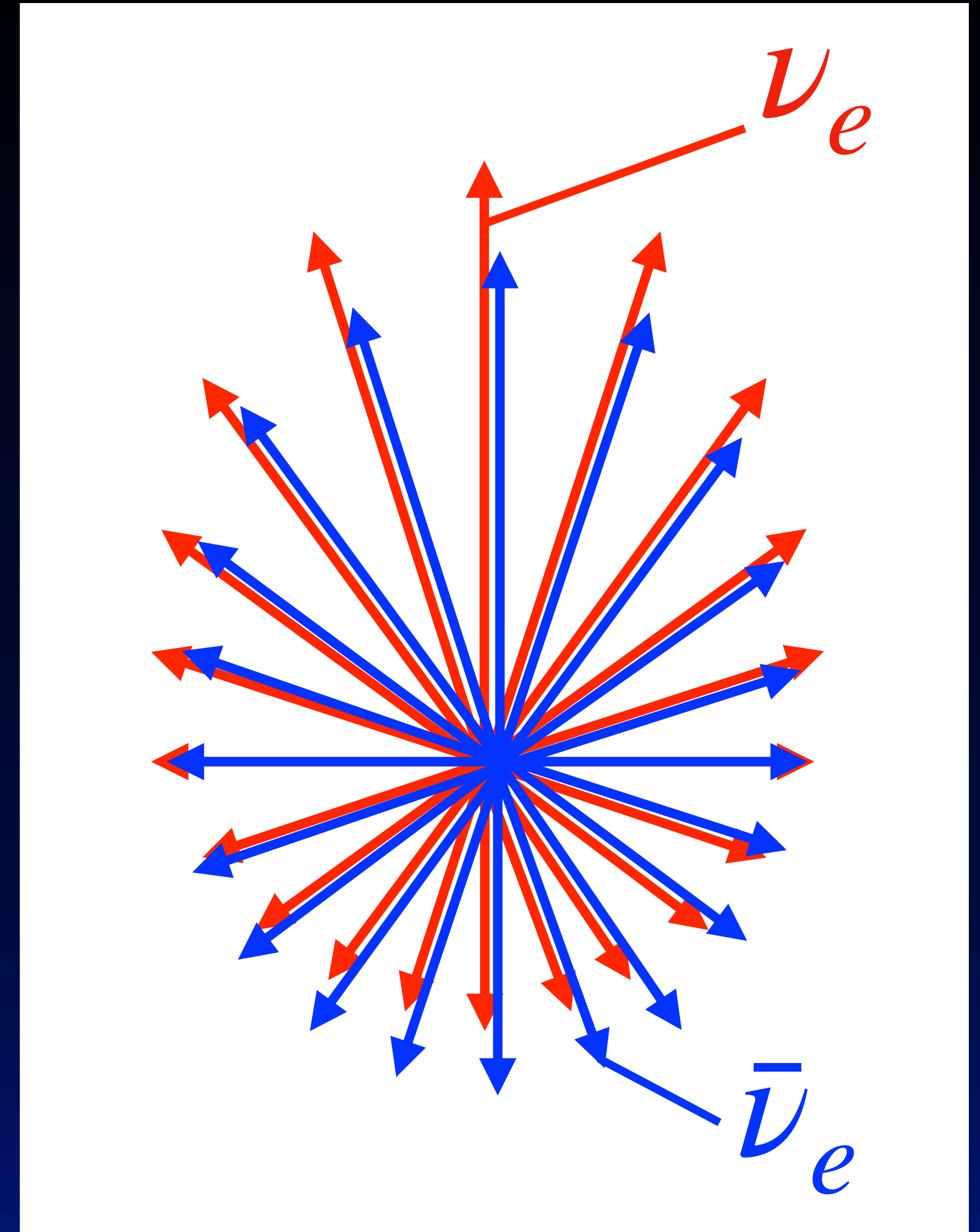
Asahina+ (2020)



Skinner+(2016)

ニュートリノ集団振動

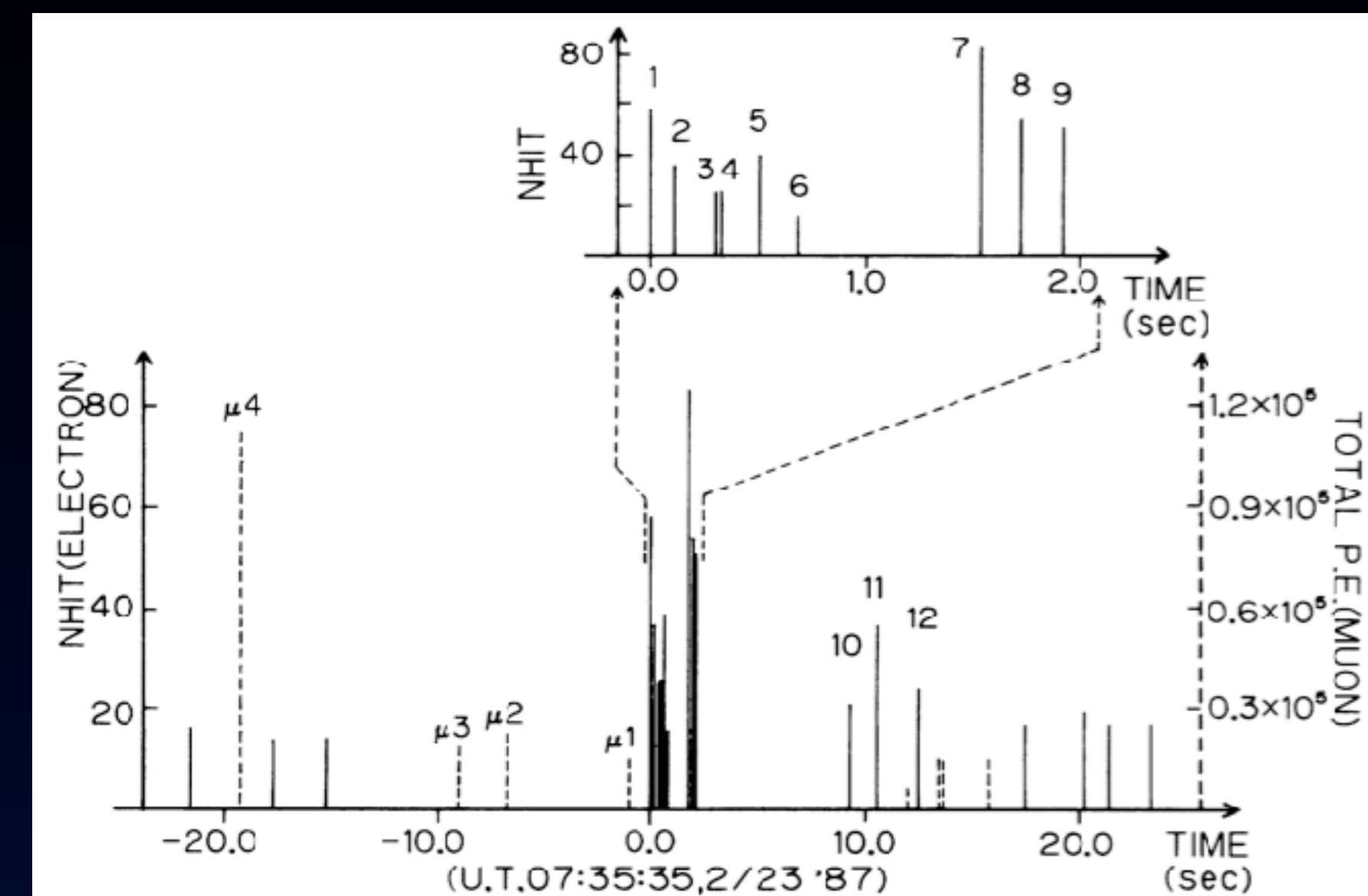
- ニュートリノ集団振動は超新星ダイナミクス・シグナルに影響を与えることが示唆されている
- 集団振動の発生の解析には運動量空間分布が必要であるため、ボルツマン輸送を用いることが望ましい (but also see Nagakura & Johns 2021)



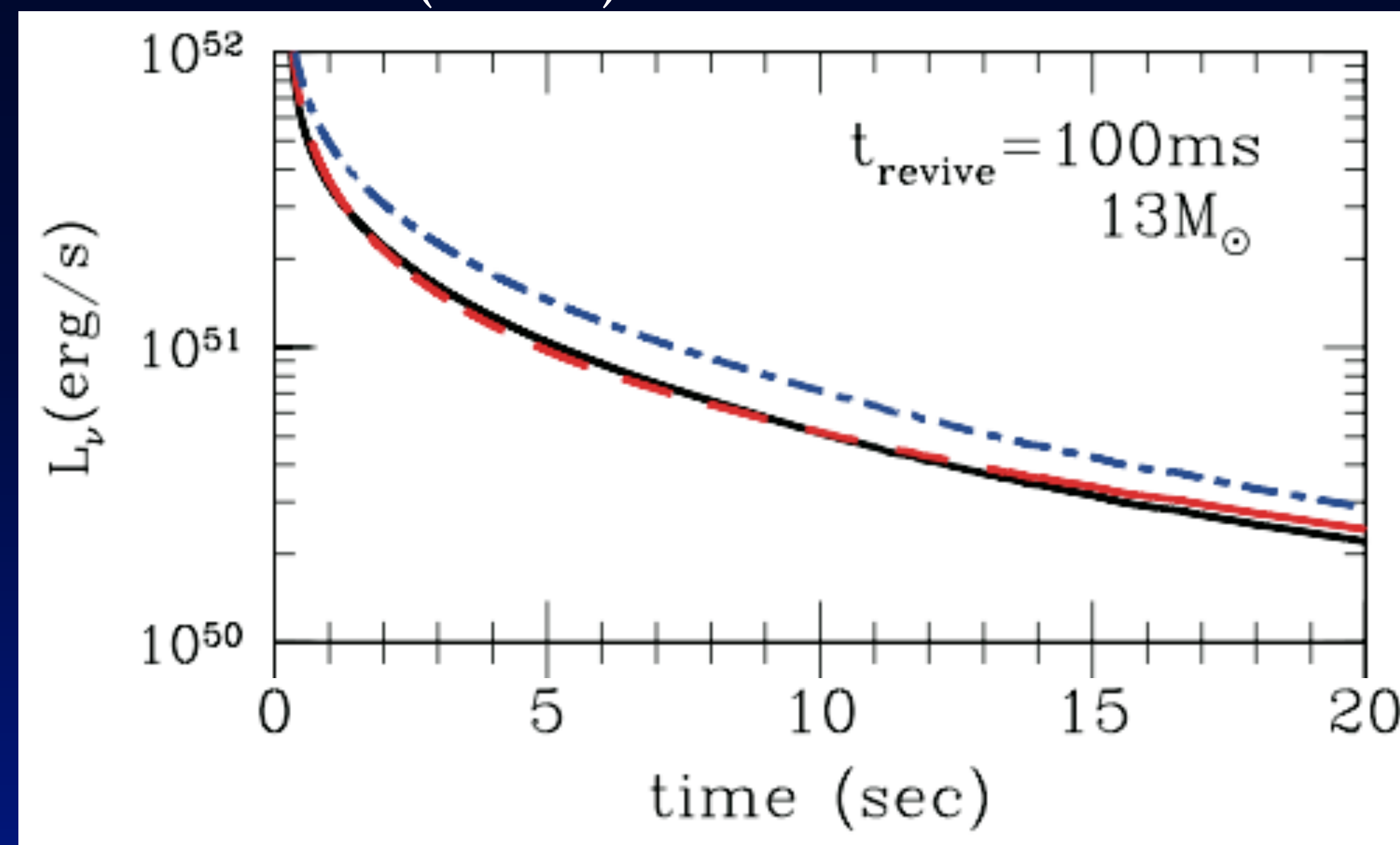
Hirata+ (1987)

原始中性子星の冷却

- 超新星爆発後に中心部に残される原始中性子星(PNS)がニュートリノを出してゆっくり冷える
- 爆発phaseに比べて不定性が少なく、EOSの制限等を行う格好のターゲット



Nakazato+ (2013)



原始中性子星冷却計算

- 10～100秒 × 多様な親星 × 多様なEOSに関して計算を行う必要があるため、1次元球対称、簡易ニュートリノ輸送法が用いられる

対流等の影響？

その妥当性？

多次元&厳密な手法による短時間計算

calibration



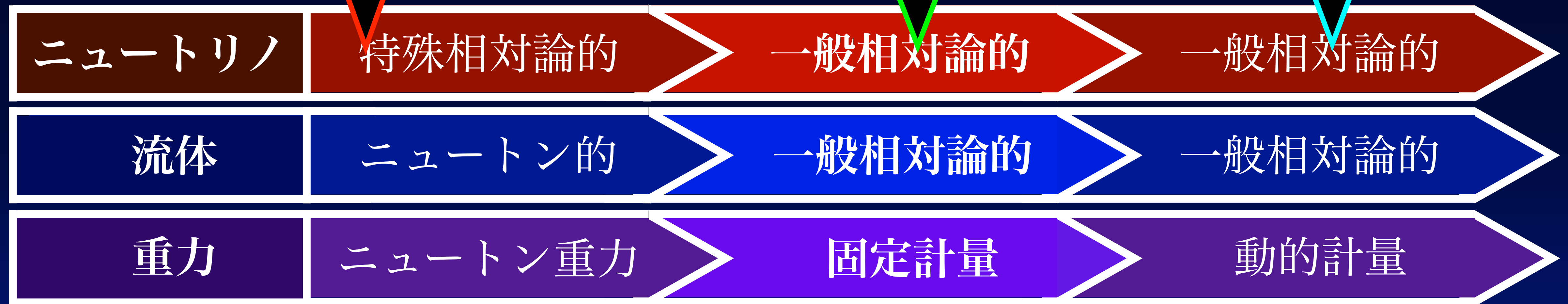
簡易的な手法によるparametricな計算

ボルツマンニュートリノ輻射流体コード

今まで:
京などで行われてきた超新星
シミュレーション

現在:
一般相対論的に拡張
原子中性子星冷却計算

将来的には:
数値相対論コードと組み
合わせて時空の時間発展



$$\frac{1}{\sqrt{-g}} \frac{\partial}{\partial x^\mu} \bigg|_{q_i} \left[\left(e_{(0)}^\mu + \sum_{i=1}^3 l_i e_{(i)}^\mu \right) \sqrt{-g} f \right] - \frac{1}{\epsilon^2} \frac{\partial}{\partial \epsilon} \left(\epsilon^3 f \omega_{(0)} \right) + \frac{1}{\sin \theta_\nu} \frac{\partial}{\partial \theta_\nu} \left(\sin \theta_\nu f \omega_{(\theta_\nu)} \right) - \frac{1}{\sin^2 \theta_\nu} \frac{\partial}{\partial \phi_\nu} \left(f \omega_{(\phi_\nu)} \right) = S_{\text{rad}}$$

$$l_{(1)} = \cos \theta_\nu$$

$$l_{(2)} = \sin \theta_\nu \cos \phi_\nu$$

$$l_{(3)} = \sin \theta_\nu \sin \phi_\nu$$

$$\omega_{(0)} \equiv \epsilon^{-2} p^\mu p_\nu \nabla_\mu e_{(0)}^\mu$$

$$\omega_i \equiv \epsilon^{-2} p^\mu p_\nu \nabla_\mu e_{(i)}^\nu$$

$$\omega_{(\theta_\nu)} \equiv \sum_{i=1}^3 \omega_{(i)} \frac{\partial l_{(i)}}{\partial \theta_\nu}$$

$$\omega_{(\phi_\nu)} \equiv \sum_{i=2}^3 \omega_{(i)} \frac{\partial l_{(i)}}{\partial \phi_\nu}$$

Boltzmann

Hydrodynamics

$$\partial_t \rho_* + \partial_j (\rho_* v^j) = 0$$

$$\partial_t S_i + \partial_j (S_i v^j + \alpha \sqrt{\gamma} P \delta_i^j) = -S_0 \partial_i \alpha + S_j \partial_i \beta^j - \frac{1}{2} \alpha \sqrt{\gamma} S_{jk} \partial_i \gamma^{jk} - \alpha \sqrt{\gamma} G_i$$

$$\partial_t (S_0 - \rho_*) + \partial_k ((S_0 - \rho_*) v^k + \sqrt{\gamma} P (v^k + \beta^k)) = \alpha \sqrt{\gamma} S^{ij} K_{ij} - S_i D^i \alpha + \alpha \sqrt{\gamma} n^\mu G_\mu$$

$$\rho_* = \alpha \sqrt{\gamma} \rho_0 u^t = \sqrt{\gamma} \rho_0 \omega$$

$$S_0 = \sqrt{\gamma} (\rho h w^2 - P)$$

$$S_j = \rho_* h u_j$$

$$S_{ij} = \rho h u_i u_j + P \gamma_{ij}$$

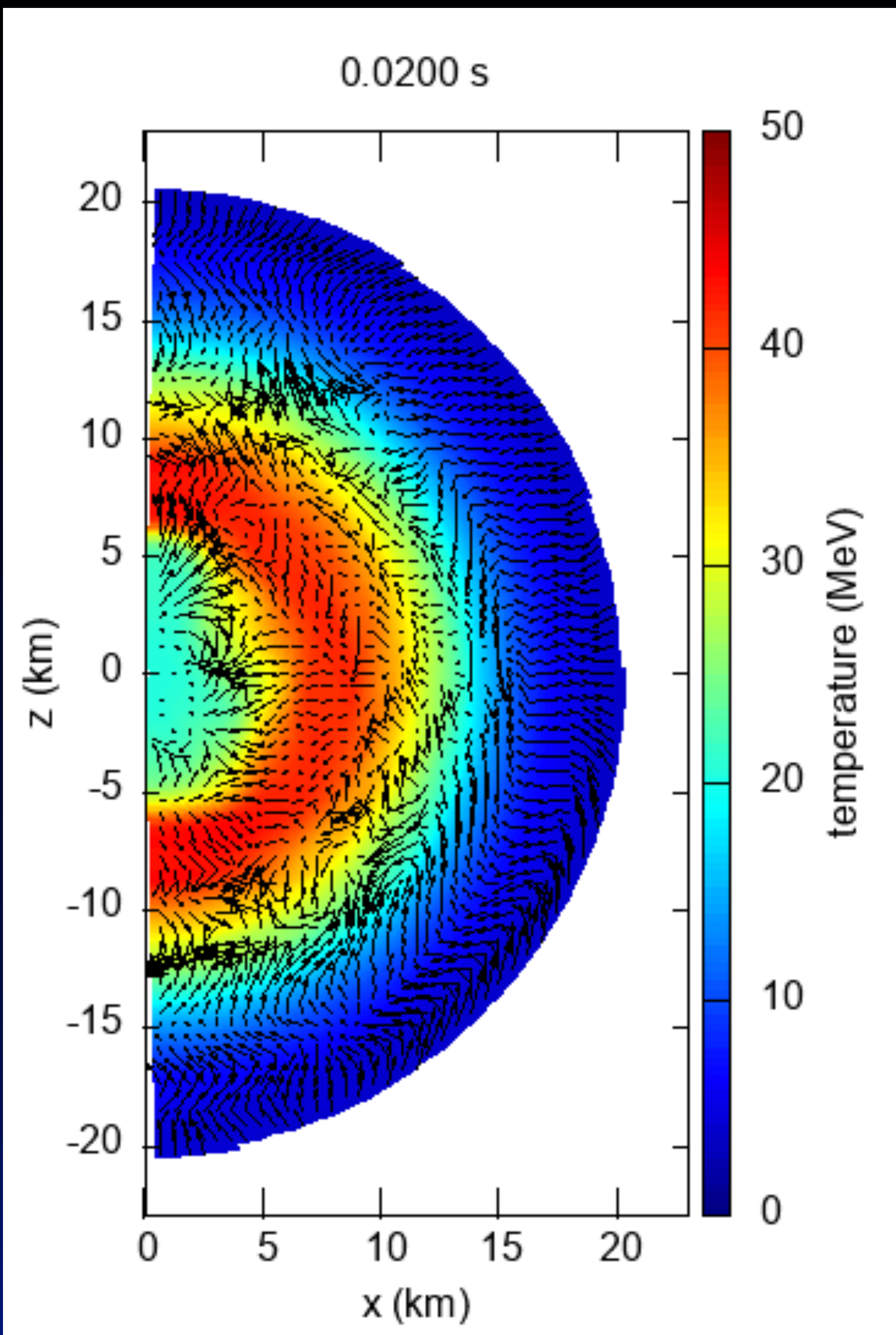
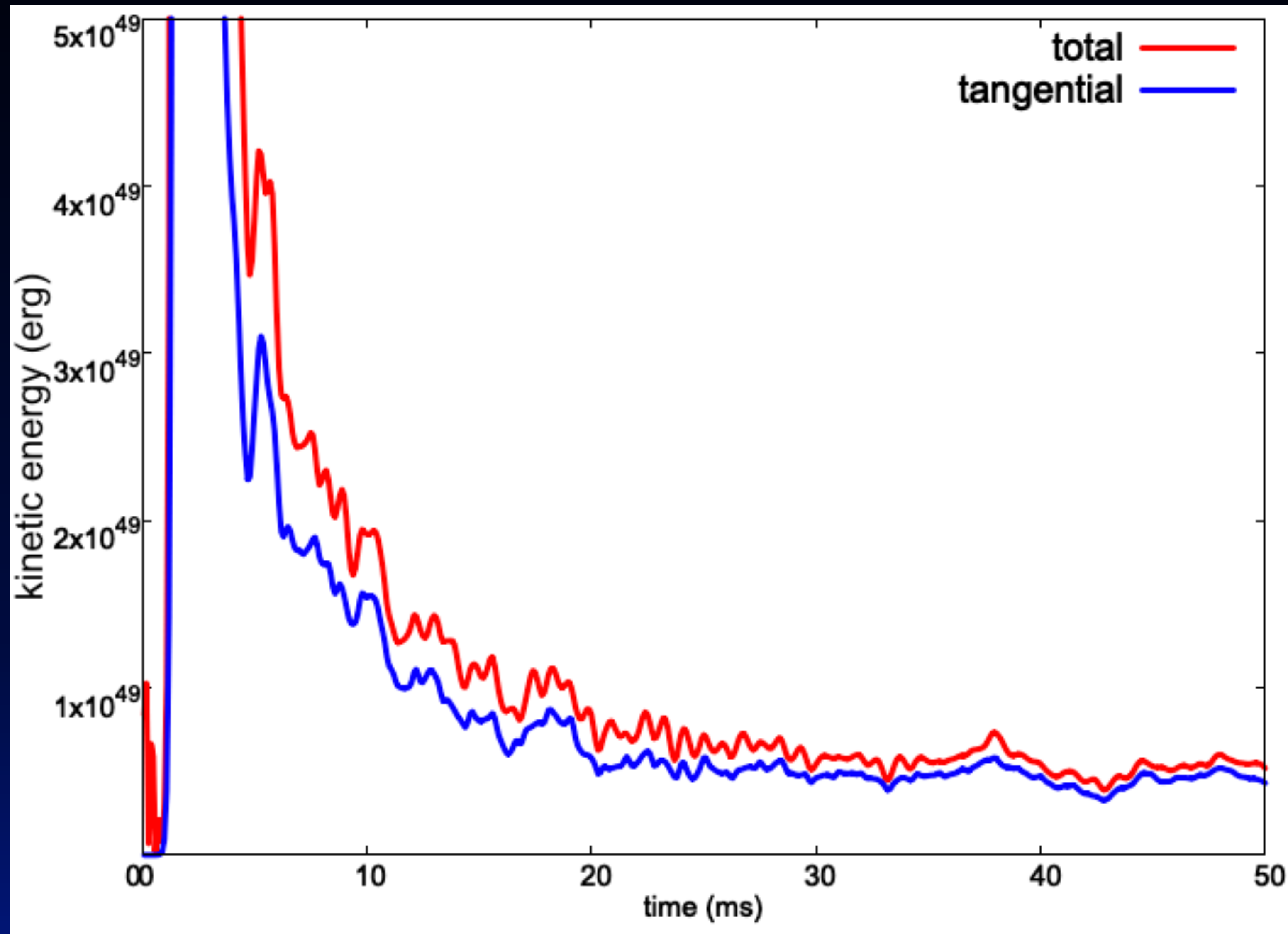
原始中性子星冷却計算 Setup

- 初期条件: PNS model 2s after bounce of $15M_{\odot}$ collapse (provided by 杉浦さん)
- Furusawa-Togashi EOS (Furusawa 2017)
- 2D軸対称: $N_r \times N_{\theta} \times N_{\phi} \times N_{\epsilon} \times N_{\theta_{\nu}} \times N_{\phi_{\nu}} = 384 \times 128 \times 1 \times 20 \times 10 \times 6$
- Metric: 球対称 & Cowling近似
- initial perturbation:

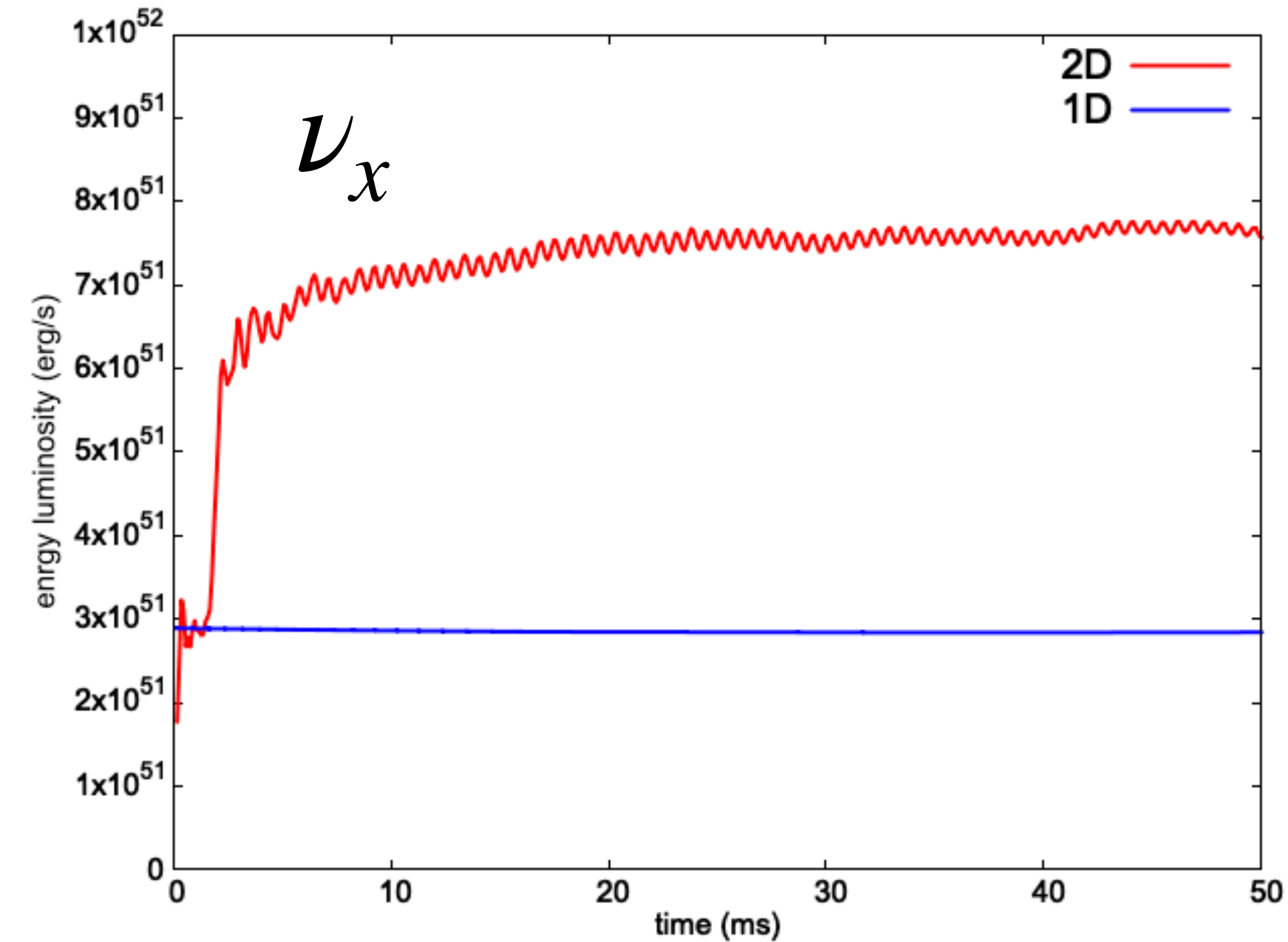
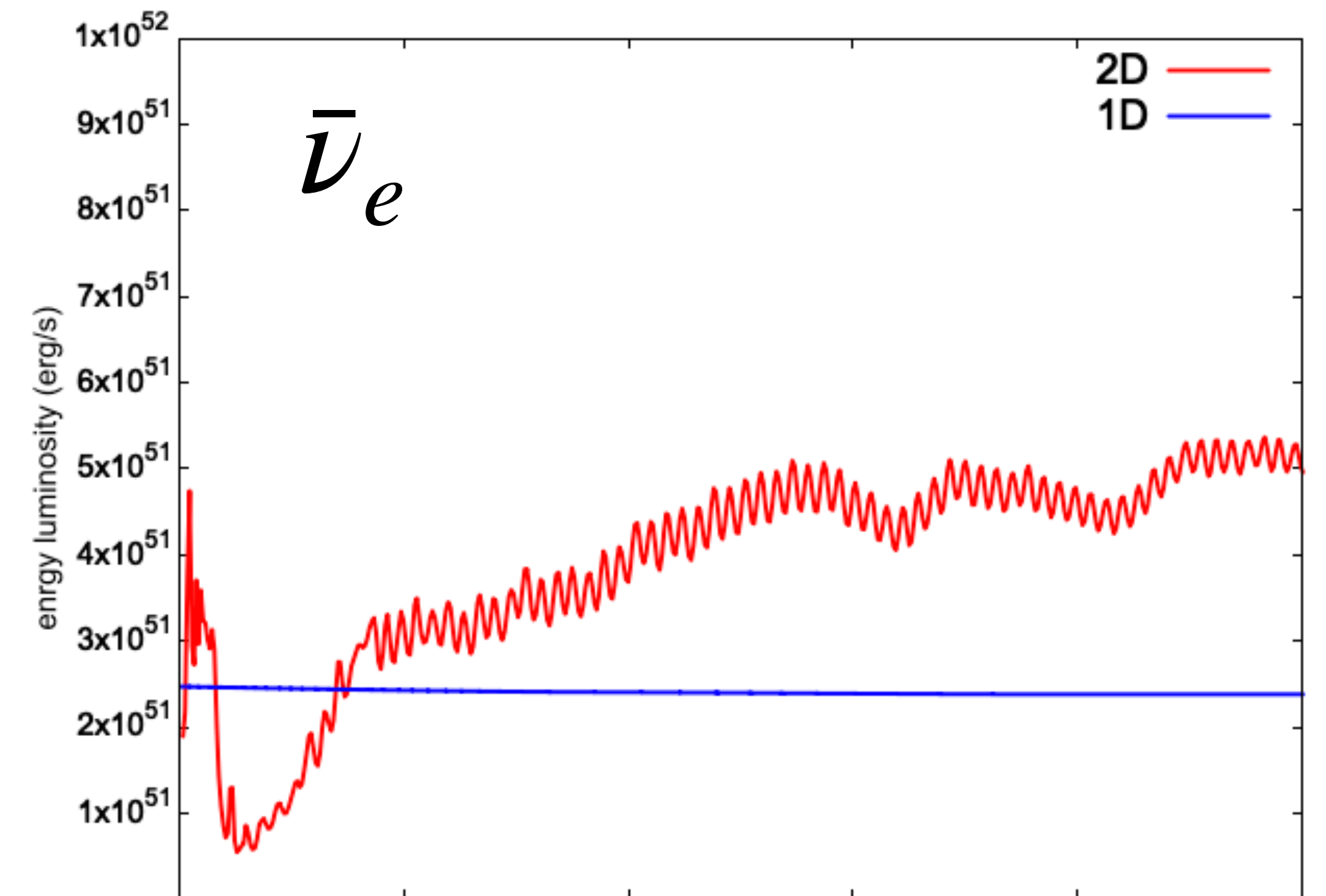
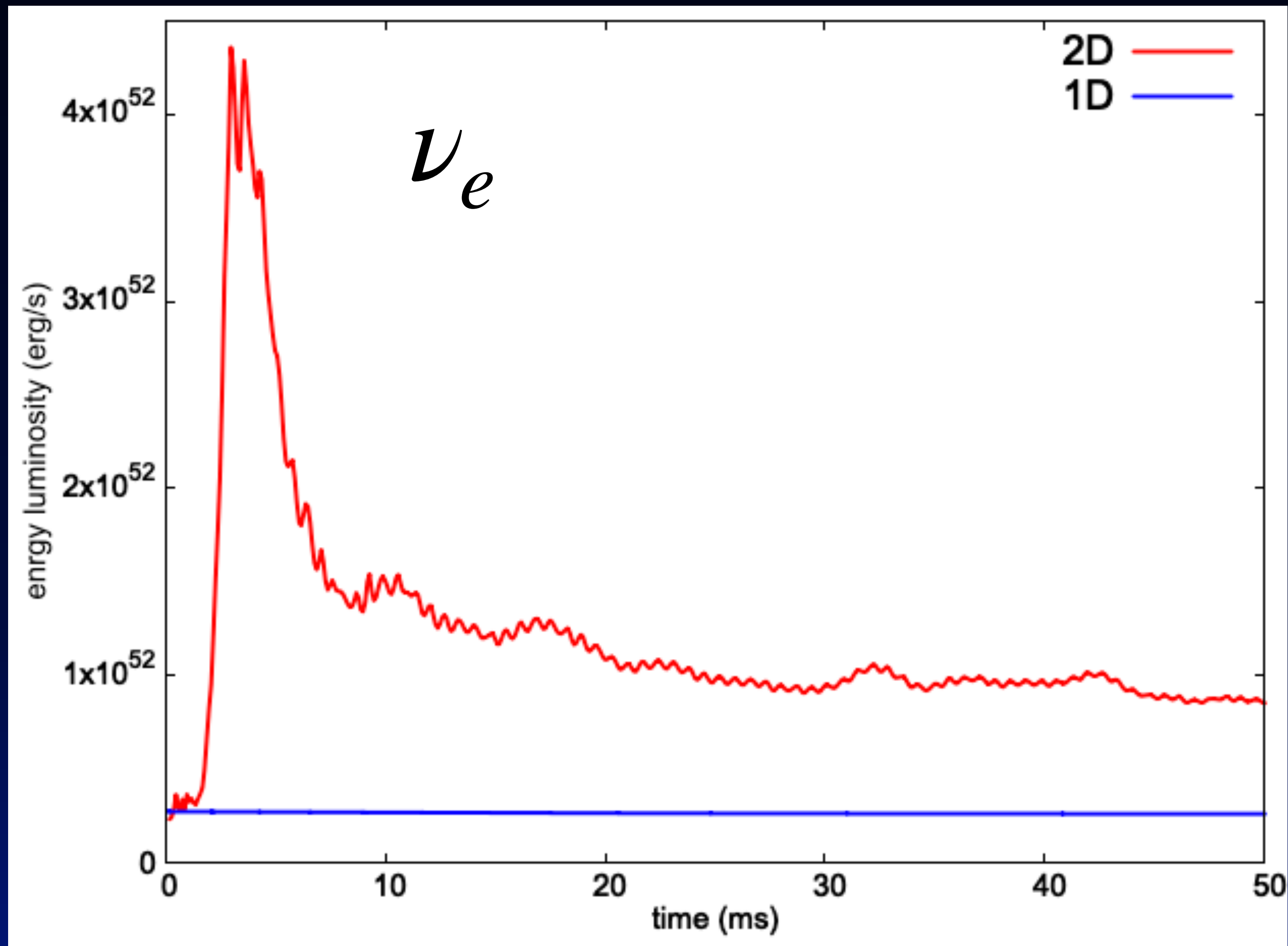
$$\delta u_r = V \cos \left(m\pi \frac{r - r_{min}}{r_{max} - r_{min}} \right) \cos(n\theta) \quad \delta u_{\theta} = V r \sin \left(m\pi \frac{r - r_{min}}{r_{max} - r_{min}} \right) \sin(n\theta)$$

$$V = 1 \times 10^{-4}, \quad r_{min} = 3\text{km}, \quad r_{max} = 13\text{km}, \quad m = 10, \quad n = 10$$

Result



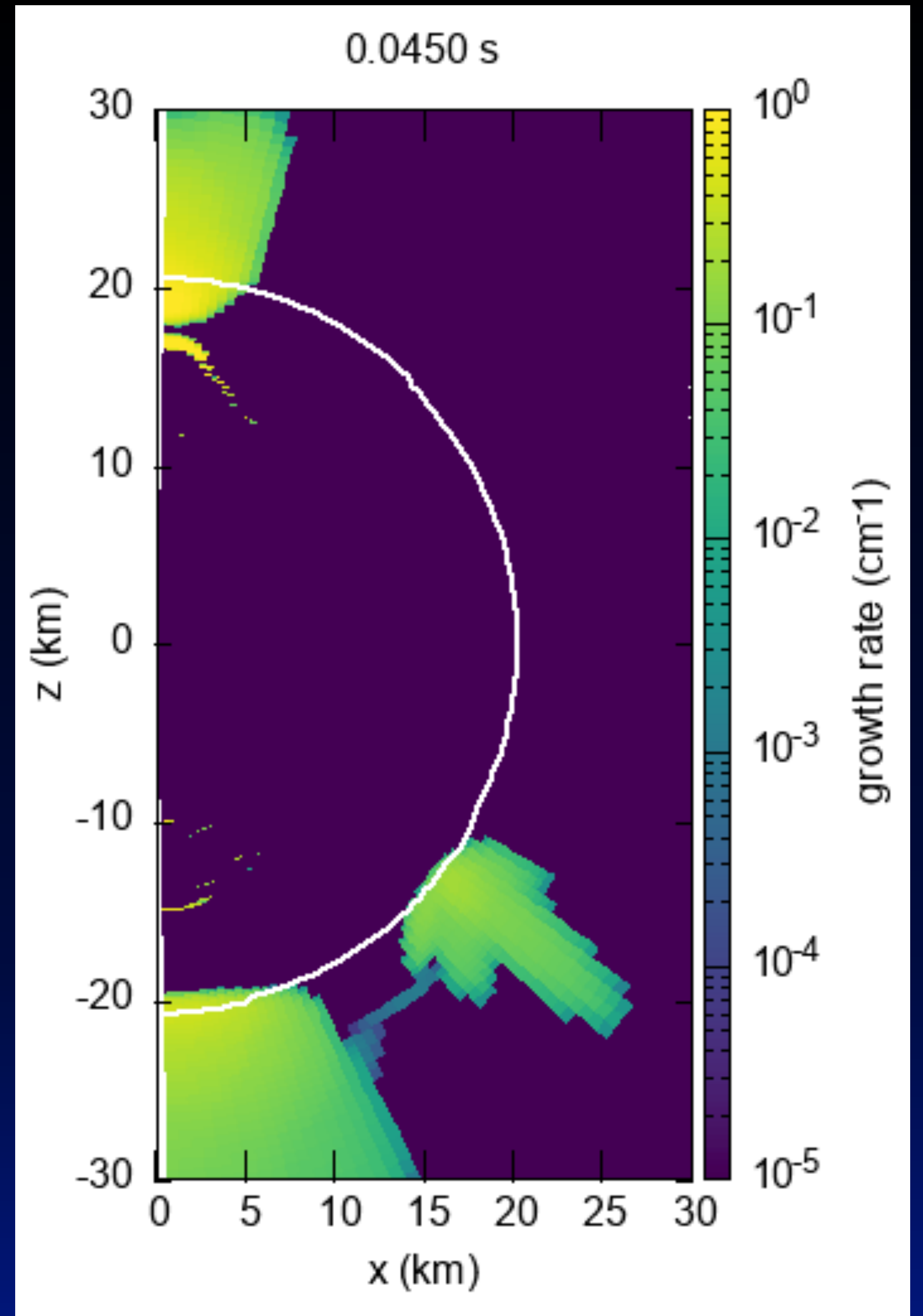
Luminosity



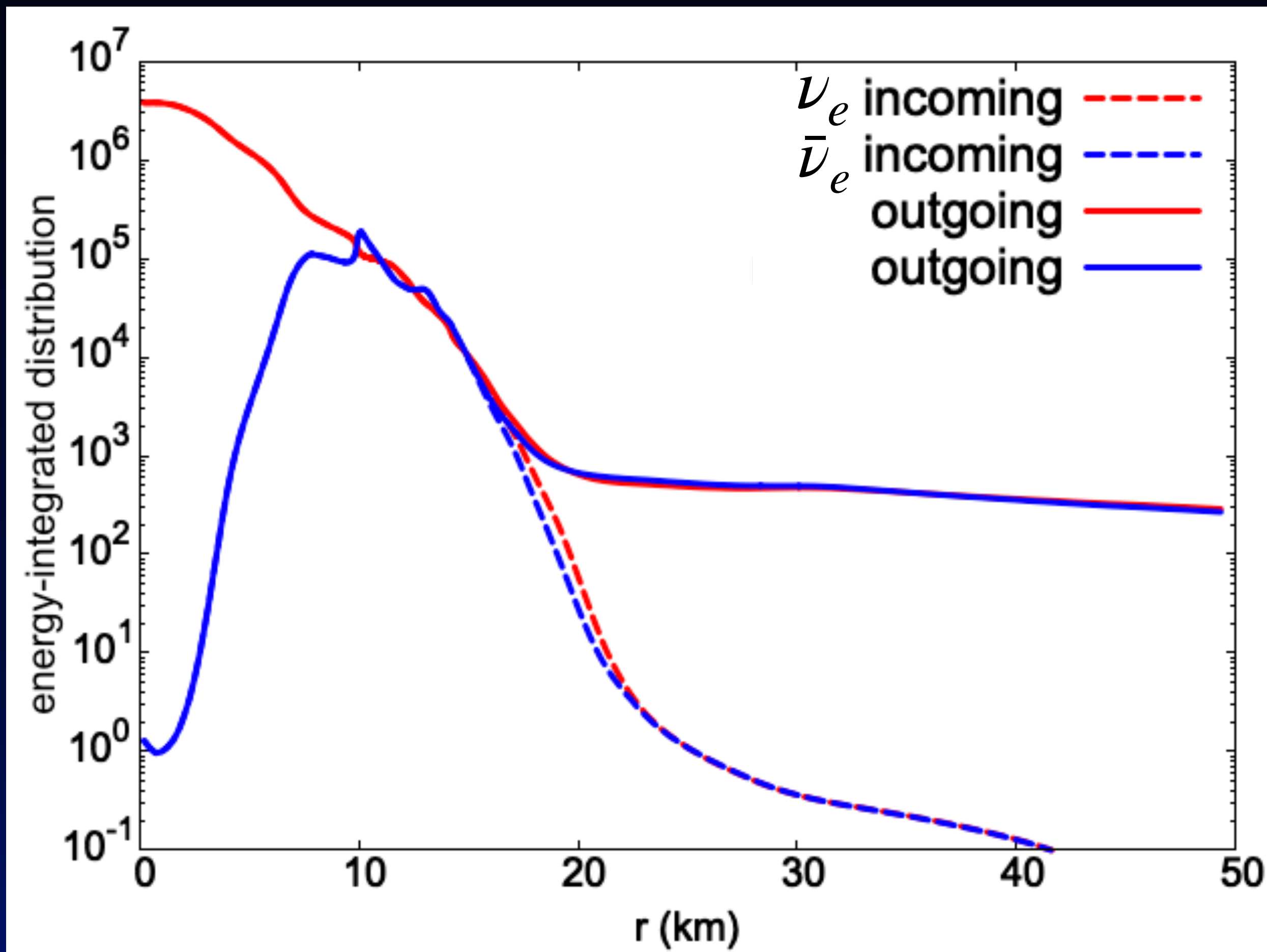
Fast Flavor Conversion

growth rate

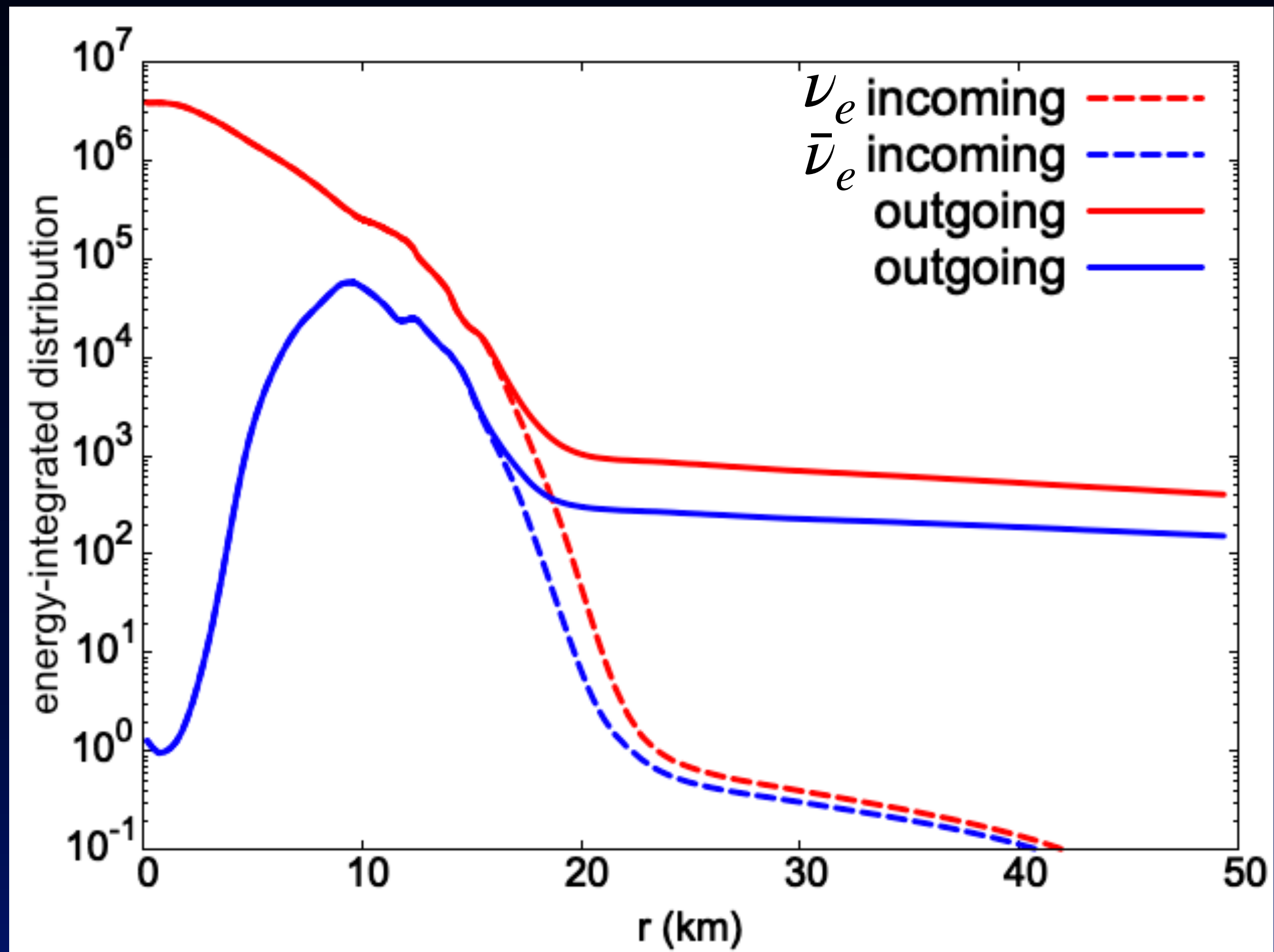
$$\sigma \sim \sqrt{-\left(\int_{\Delta G > 0} \frac{d\Omega}{4\pi} \Delta G\right) \left(\int_{\Delta G < 0} \frac{d\Omega}{4\pi} \Delta G\right)}$$
$$\Delta G = \frac{\sqrt{2}G_F}{2\pi^2} \int \left(f_{\nu_e} - f_{\bar{\nu}_e}\right) \nu^2 d\nu$$



south pole (crossing)



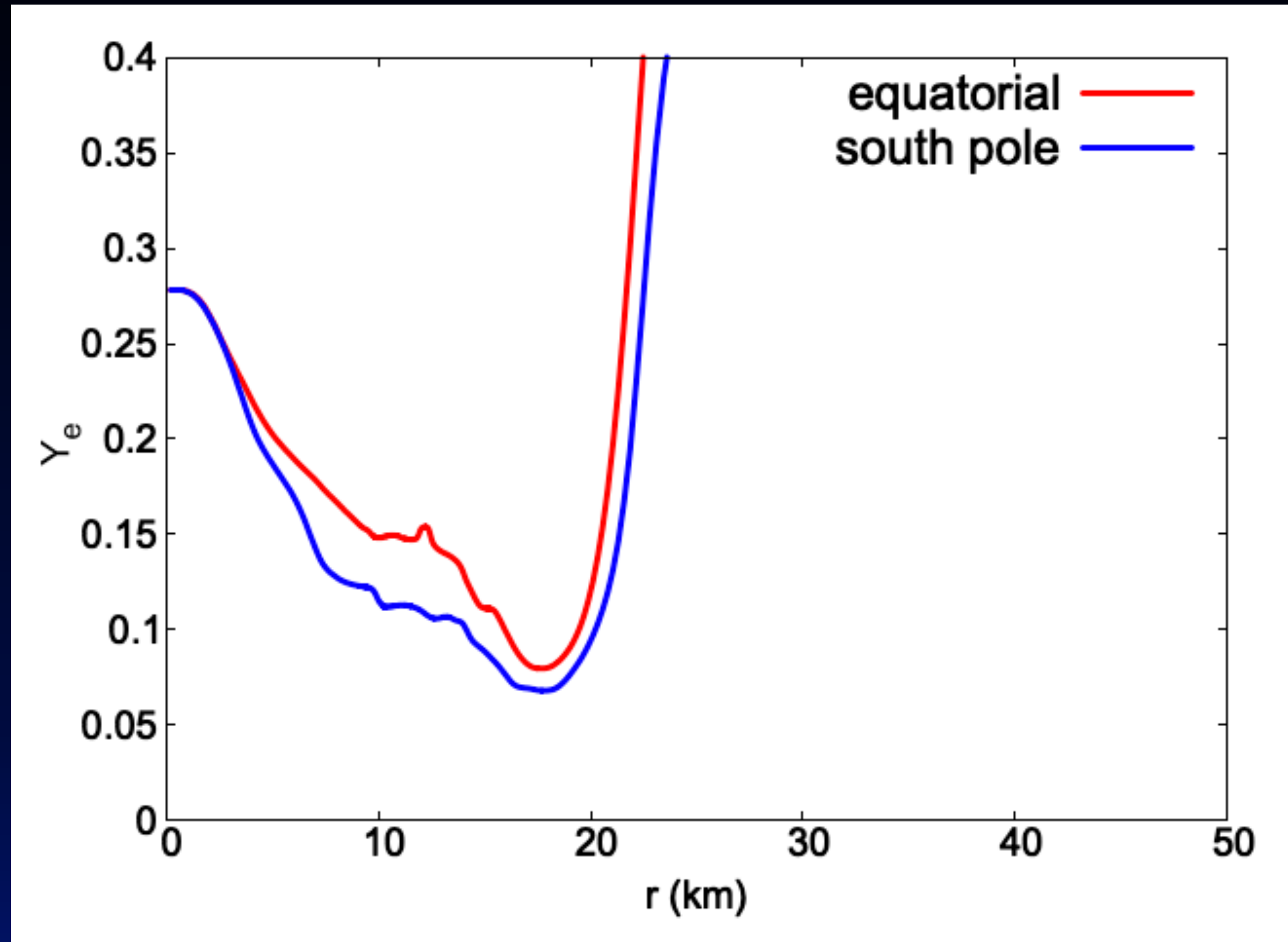
equator (NO crossing)



- crossing が発生した南極方向では、そうでない方向よりも Y_e が小さい



$\bar{\nu}_e$ の放出量が ν_e 放出量に迫る



Conclusion

- 多次元一般相対論的ボルツマンニュートリノ流体コードを開発し、短時間の原始中性子星冷却計算を行った。
- 対流の発生、ニュートリノ光度の上昇が見られた。
- 主に軸付近で fast flavor conversion が発生した。

Future Prospects

- Numerical relativityによる時空の発展
- Full GR CCSN + PNS cooling 計算