

一般相対論的ボルツマンニュートリノ輸送コード

赤穂龍一郎(早大), 原田了(ICRR), 長倉洋樹(Princeton), 住吉光介(沼津工専), 岩上わかな(早大)、大川博督(早大高等研)、古澤峻(東京理科大)、松古 栄夫(KEK)、山田章一(早大)

Introduction

大質量星は進化の最後に重力崩壊を起こしてコンパクト天体を形成することが知られているが、メカニズムや観測シグナルにはまだ多くの不定性が残されているため、詳細な物理過程を考慮したシミュレーションを行って解明していく必要がある。特に重力崩壊現象ではニュートリノが極めて重要な役割を果たすことが知られており、ニュートリノ輻射輸送計算が不可欠である。熱平衡状態にないニュートリノの輸送は位相空間分布関数に関するボルツマン方程式で記述されるが、六次元の方程式となるため計算コストが高く、様々な近似法が広く用いられてきた。現時点で、空間多次元一般相対論的ボルツマンニュートリノ輸送を用いた重力崩壊計算はなされていない。

本研究では、多次元一般相対論的ボルツマン方程式を直接解くコードを開発した。

Method

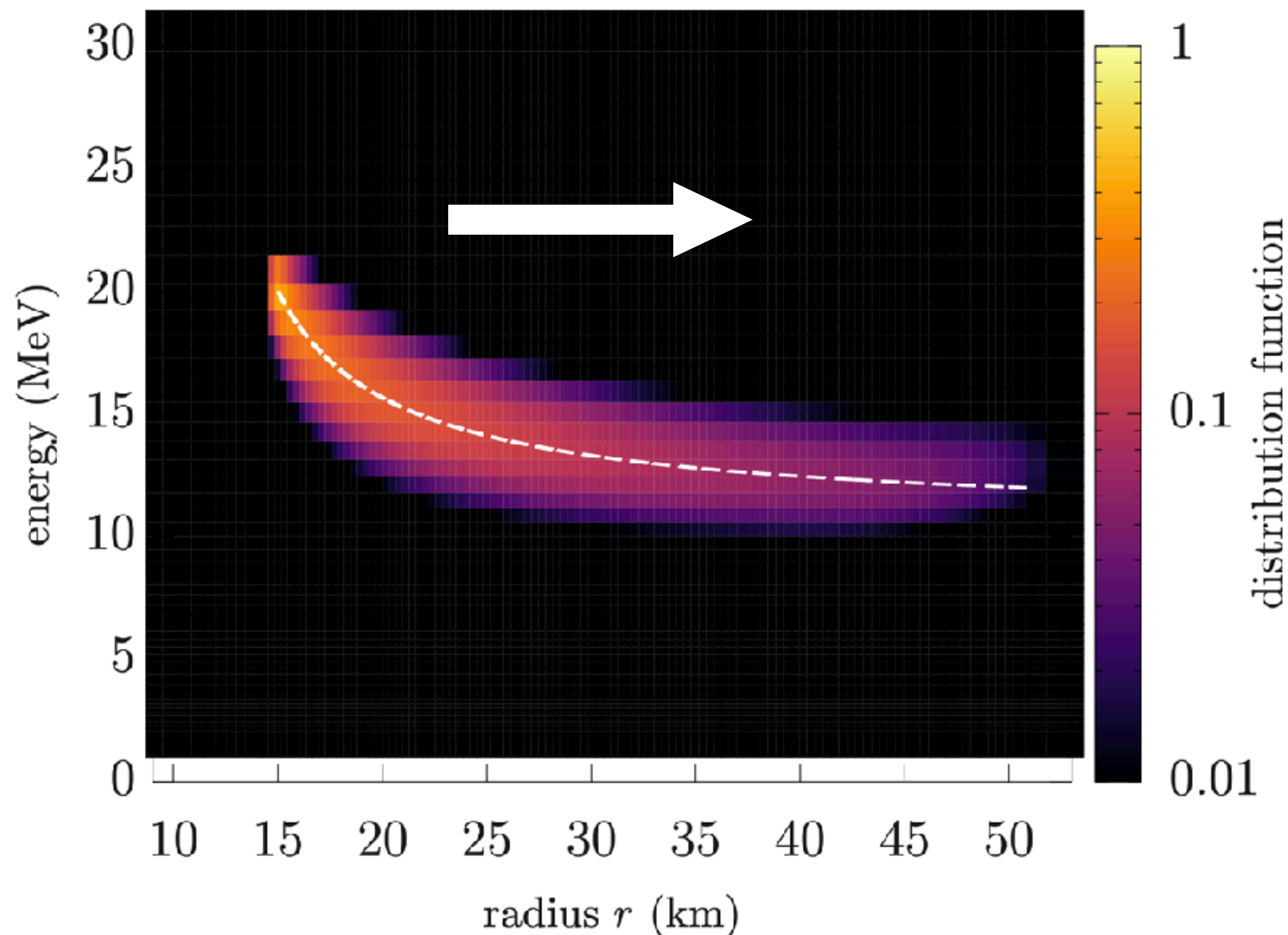
保存形式の一般相対論的ボルツマン方程式 (Shibata 2014)

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

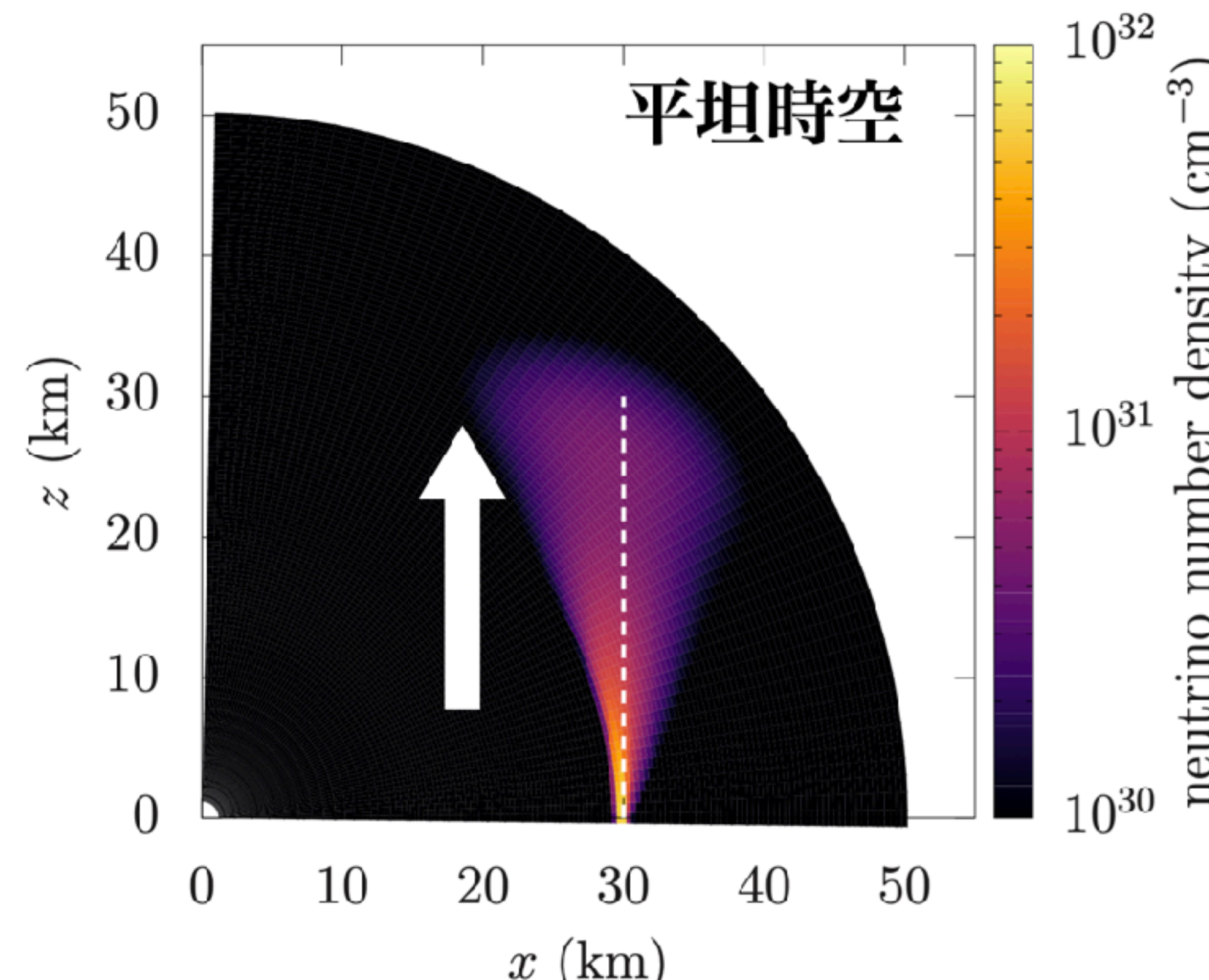
を差分法で直接解く。位相空間分布関数 $f(x^\mu, p^i)$ を直接取り扱うことで、運動量空間分布に関する完全な情報を得ることができる。その点で、運動量空間の情報が削減されてしまっている近似法とは異なる。

本研究では、様々なテスト計算を行ない、本コードの妥当性を確認した。(詳細: <https://arxiv.org/abs/2010.10780>)
以下に、一般相対論的効果が如実に現れる代表的なものを示す。

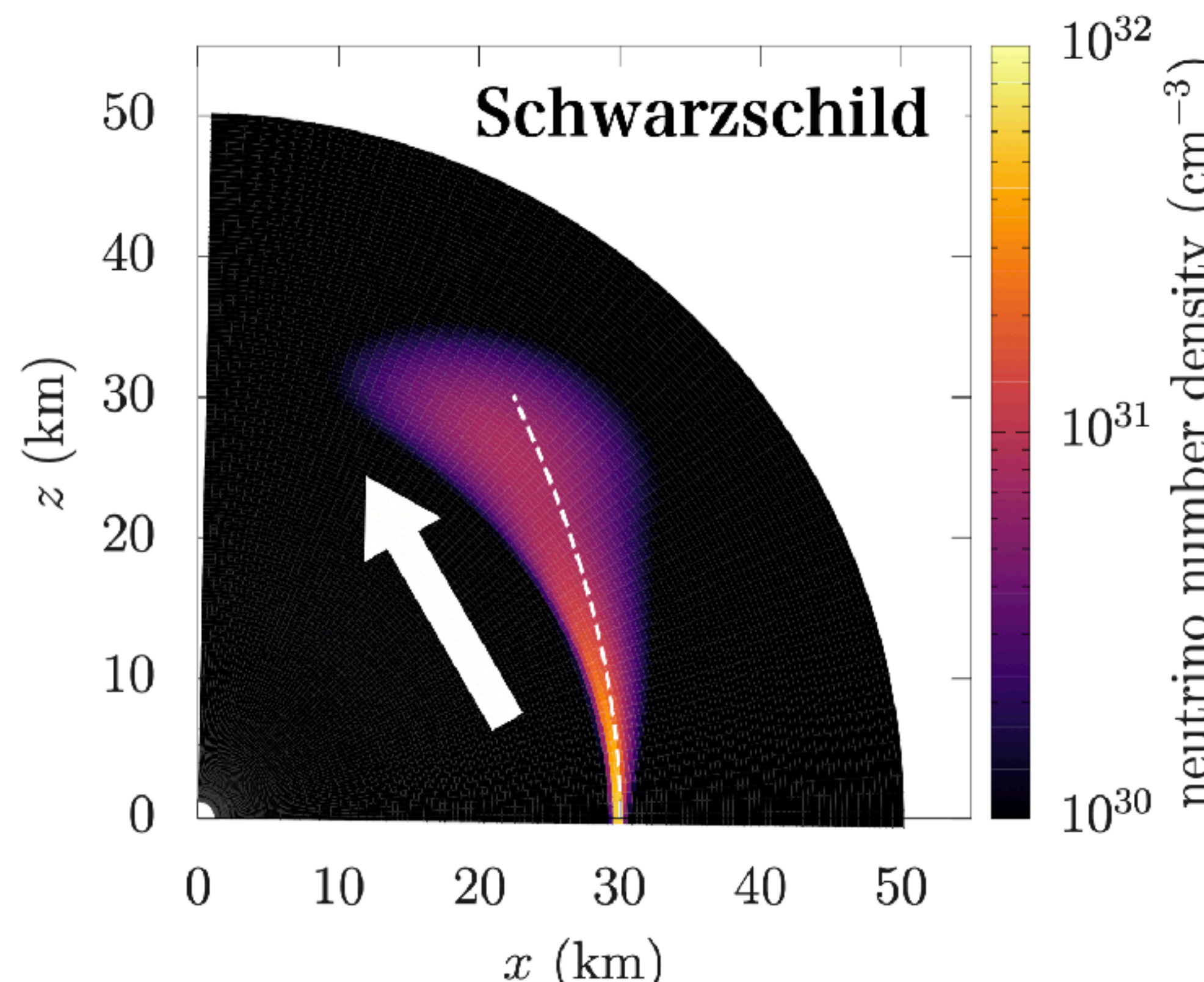
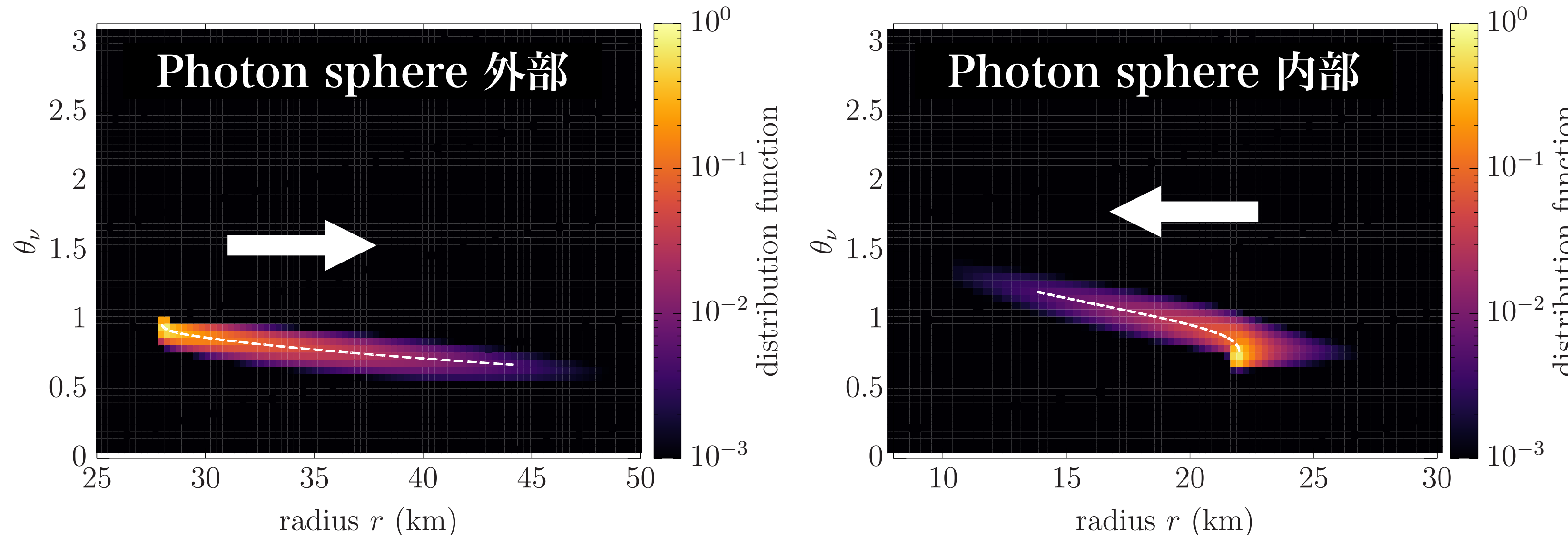
Schwarzschild時空での重力赤方偏移



測地線湾曲



Kerr 時空での角度移流



Future Perspective

本研究で開発したコードと一般相対論的流体コードおよび数値相対論コードと組み合わせることで、重力崩壊計算に適用することが可能である。それぞれのコードは既に開発済みであり、それらを接続して重力崩壊計算を行なっていく予定である。また、本コードは大質量星の重力崩壊の他にも連星中性子星合体等にも応用可能である。