

ボルツマン輻射流体コードによる重力崩壊型超新星計算

岩上わかな（早稲田大学）

利用カテゴリ XC-B

現在、最も有力視されている爆発メカニズムはニュートリノ加熱メカニズムである。重力崩壊中に中心部に閉じ込められたニュートリノは、コアバウンス後に中心部から外側へ向かって拡散し、ニュートリノ球表面から放出される。その放出されたニュートリノが衝撃波下流側の物質と再び相互作用することで、衝撃波が復活するというシナリオである。一次元球対称計算では上記の爆発の過程を再現することができないが、多次元計算では爆発する計算結果が得られるようになった。一方で、爆発メカニズムを理解するためには、重力崩壊型超新星の数値計算を正しく行う必要があり、そのためには流体の方程式を解くと同時に様々なニュートリノ反応を考慮したニュートリノ輻射輸送方程式を厳密に解く必要がある。ニュートリノ輸送はボルツマン方程式によって支配されているが、ボルツマン方程式を直接解くと計算コストがかかるため、実際には何らかの近似的な手法を用いることが多い。そのような近似手法は光学的に厚い領域や薄い領域で成立する関係を利用して構築されているため、光学的に厚くもなく薄くもない中間領域において正しく計算できるとは限らない。ニュートリノ加熱領域はその中間の領域と一致するため、第一原理的な計算結果との比較による近似手法の検証や改良が必須である。

近年、ニュートリノの輻射輸送をボルツマン方程式で直接解くと同時に流体の発展方程式を解く空間3次元+運動量空間3次元のBoltzmann-Hydro コードが開発された。このコードは十分な解像度があれば、ニュートリノ輻射輸送計算コードの中で最も正確にニュートリノ加熱率等を評価することができる。これまでに空間2次元の計算が実行され、バウンス直後に発生するprompt convectionを対象とした空間3次元計算も行われた。この計算の可視化を天文台の解析サーバーのAVSを利用して行なった。

図1は、京でボルツマンハイドロコードを用いて空間3次元+運動量空間3次元計算を実行した結果をCfCAの解析サーバーにインストールされているAVSを利用して可視化したものである。解像度 $N_r \times N_\theta \times N_\phi \times N_\epsilon \times N_\nu \times N_\nu = 256 \times 48 \times 96 \times 16 \times 6 \times 6$ であり、並列数は $3072\text{MPI} \times 8\text{openMP} = 24,756$ である。11.2Msolの親星 [S. E. Woosley and A. Heger, Rev. Mod. Phys., 74, 1015 (2002)] について半径200kmまでの領域を計算対象とし、様々な観測結果の制限をクリアしている最新のFurusawa-Togashi EOS [S. Furusawa et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 44 094001 (2017)] を使って、重力崩壊・コアバウンス発生後20msまで計算を行った。その結果、ニュートリノバースト発生後に原始中性子内部で対流が急成長し飽和する段階におけるニュートリノ数密度やニュートリノフラックスの空間3次元的構造を捉えることができた。これらの結果を論文にまとめ、現在ApJに投稿中である(arXiv:2004.02091)。

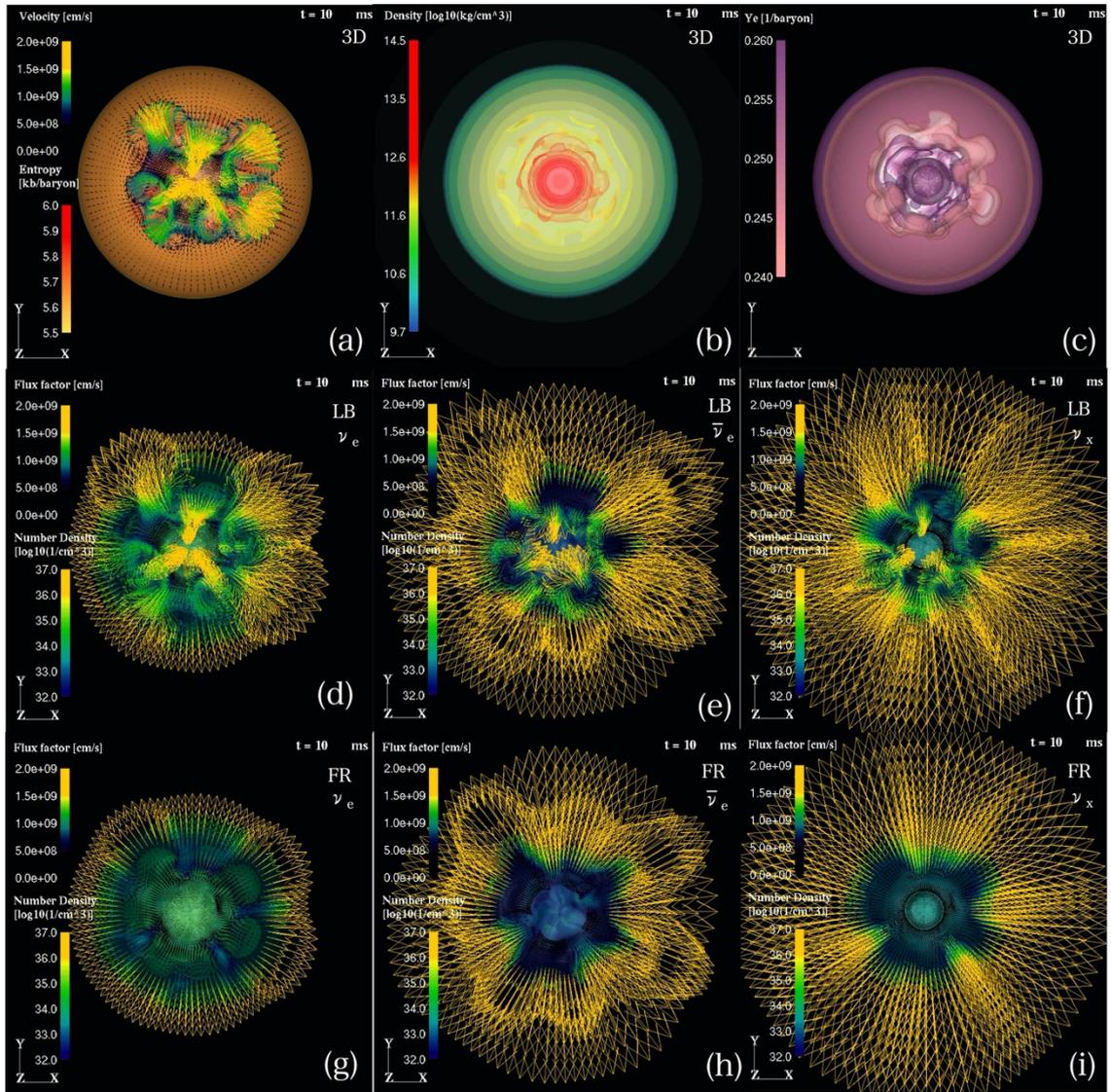


図1 赤道面で切断した、(a)エントロピー等値面・速度ベクトル、(b) Y_e 分布、(c)密度分布、(d-i)電子ニュートリノ数密度の等値面・ニュートリノの平均速度ベクトルの断面図。LB は Laboratory frame で、FR は Fluid-rest flame で計算した値であることを意味する。