

重力崩壊型超新星爆発の6次元ボルツマン方程式によるニュートリノ輻射流体計算

岩上わかな (早稲田大学)

利用カテゴリ XC-B・汎用PC

重力崩壊型超新星は、大質量星が進化の最終段階で引き起こす大爆発であると考えられている。しかし、その爆発メカニズムは完全に解明されていない。太陽の10倍以上の質量を持つ大質量星は中心部に鉄のコアを形成するが、重力収縮により温度や密度が上昇すると中心部で鉄の光分解反応や中性子の電子捕獲反応が発生する。これらの吸熱反応が周囲の物質から熱を奪い、それまで星を支えていた中心部の圧力を急激に低下させる。その結果、物質が中心に向かって落下する重力崩壊が起こり、瞬間的に膨大な重力エネルギーが解放され、コアバウンスとともに球状衝撃波が発生する。この球状衝撃波がそのまま星の表面に到達すれば爆発は成功する。しかし、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。衝撃波下流側で起こる鉄の分解反応によるエネルギーの消費や電子捕獲反応により発生したニュートリノが、衝撃波が伝播するのに必要なエネルギーを持ち去ってしまうからである。それ故に、非球対称な効果が爆発に対し重要な役割を果たすのではないかと考えられてきた。非球対称な効果には、ニュートリノ加熱を促進させる働きがある。とりわけ、流体力学的不安定性の発達による対流や定在降着衝撃波不安定性 (SASI) は、衝撃波の上流側から降ってきた冷たい物質が衝撃波の下流側のニュートリノ加熱領域に滞在する時間を増大させる効果があるため、爆発メカニズムとして有力視されているニュートリノ加熱メカニズムに有利に働く。対流は中心部に形成される原始中性子星からのニュートリノ放射によって駆動される不安定性で、小さなスケールから大きなスケールまで対流運動が発生する。一方、SASIは衝撃波が非球対称に変形する不安定性で、比較的スケールの大きな対流運動を引き起こす。これら二つの不安定性は、質量降着率やニュートリノ光度などのパラメータに依存して、どちらか一方が支配的になる傾向がある。また、両者が共存するような複雑な現象が発生することもある [W. Iwakami, et al. ApJ, 786 (2014), 118]。したがって、もしSASIや対流の発生を、重力波やニュートリノで検出することができれば、爆発前の星の構造に関する情報を得られる可能性がある。

しかし、これを定量的に評価するためには、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解くと同時に、流体の方程式を高解像度で解く必要がある。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[K. Sumiyoshi & S. Yamada, ApJSS, 199(2012)17; H. Nagakura, ApJSS, 214 (2014), 16]。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を評価することができる。しかし、このコードはまだ十分とは言えない。なぜならば、計算コストがかかるため、現段階ではスパコン「京」を利用した2次元軸対称空間の計算をするにとどまっているからである。流体の現象は2次元と3次元では定性的に大きく異なる性質がある。SASIであれば、軸対称モードのスロッシングモードだけでなくスパイラルモードが発生する。乱流であれば、2次元の場合に小さな渦が融合して大きな渦が形成されていく傾向があるのに対し、3次元の場合は大きな渦から小さな渦へ分裂していく傾向がある。今後はより大規模な3次元空間の計算に向けてコードの開発を進めていく必要がある。また、スケールの大きな現象であるSASIについては比較的解像度が低い計算格子で定性的な議論ができるが、様々なスケールで対流運動が発生する対流不安定性についてはより高い解像度が要求される。さらに、非線形段階では衝撃波下流側で乱流状態となるため、流れ場の微細な構造を捉えるためには、さらに解像度の高い計算が必要となる。本研究は、正確なニュートリノ加熱率の評価に加え、これらの流体现象を高解像度で捉えることで、重力崩壊型超新星の重力波やニュートリノ観測に向けた定量的な議論ができるような成果を上げることが最終目標としている。

平成27-28年度は最初のステップとしてCfCAのスパコンで中心部をくりぬいた計算格子で2次元軸対称計算を行った。しかし、特殊相対論の効果を0次のオーダーでしか考慮しておらず、平成29年度の計算では特殊相対論の効果をフルオーダーで考慮した計算コードを用いて同様の計算を行った。その結果、特殊相対論の効果を適切に取り入れたことによる流体の対流に伴うニュートリノの引きずり効

果を確認することができ（図1左）、ニュートリノフラックスの非球対称性があることなどもわかった（図1右）。また、高解像度計算をするために、グローバルな計算結果を初期条件と境界条件に利用して、一部の重要な領域のみ計算する環境を構築してテスト計算を行い、計算に問題がないことを確認した（図2）。

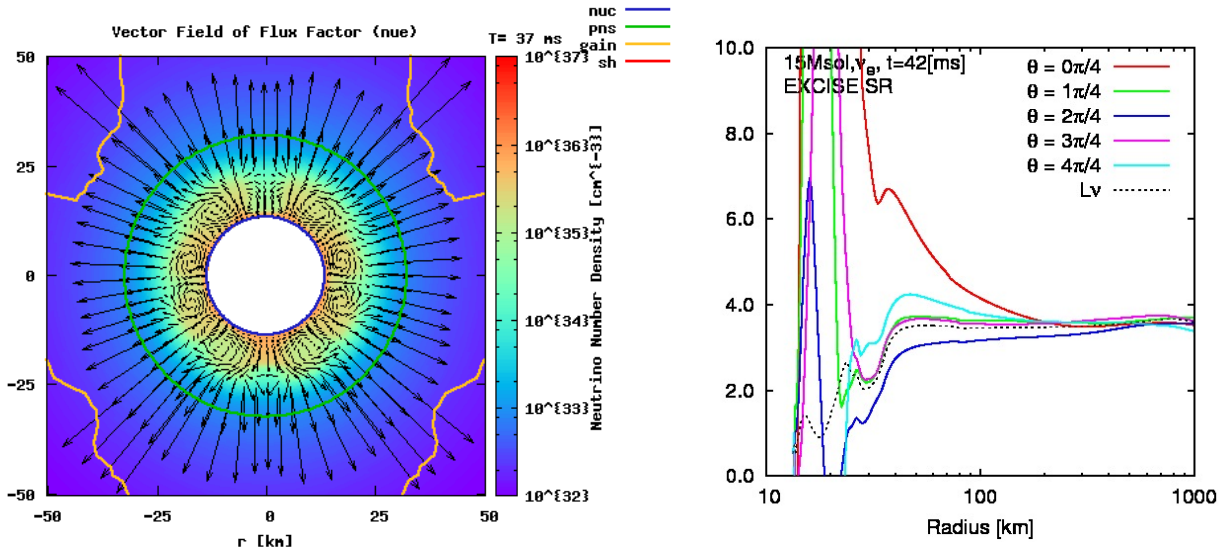


図1：ニュートリノの電子密度とフラックスファクターベクトルの重ね合わせ、 $4\pi r^2$ をかけたr方向の電子ニュートリノフラックスの分布図

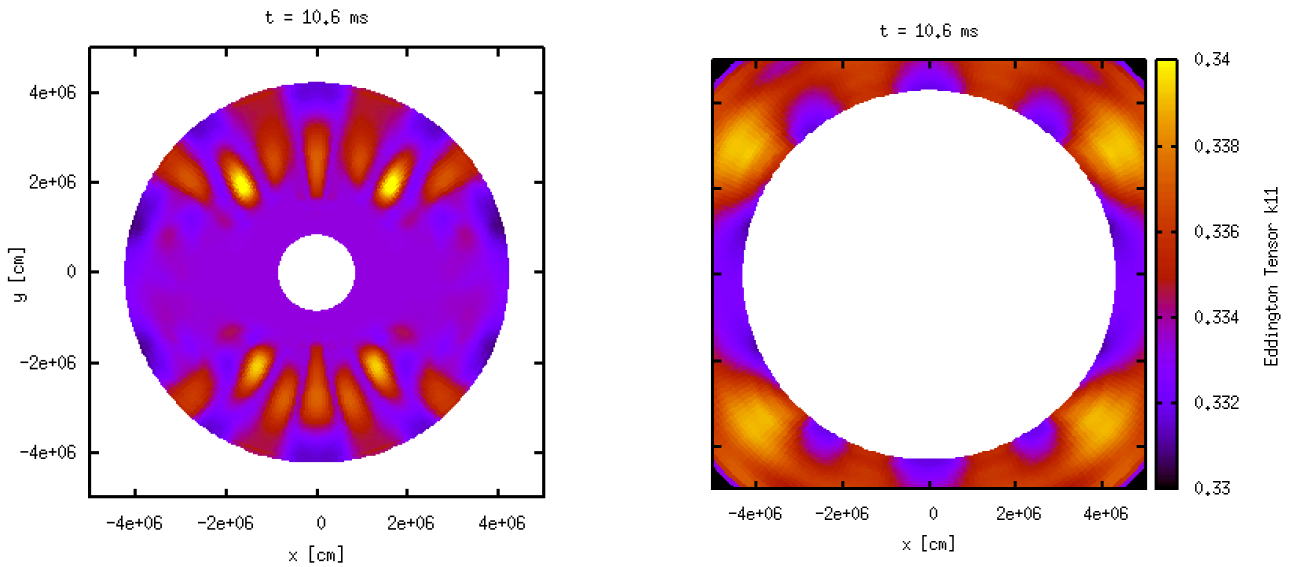


図2：エディントンテンソルの k_{11} 成分の図、左は8-40kmの領域を計算したもの、右は40kmから200kmの領域を計算したもの。