

大質量星重力崩壊と連星中性子星合体の数値相対論シミュレーション および一般相対論的輻射輸送コードの開発

利用者氏名(所属機関) 柴田 大(京都大学基礎物理学研究所)

利用カテゴリ SX9A

(1) 微視的物理学を考慮した大質量星の重力崩壊によるブラックホール形成シミュレーション

Sekiguchi & Shibata 2011, ApJ 737, 6;

Sekiguchi et al. 2012, Progress of Theoretical and Experimental Physics

継続時間の長いガンマ線バーストに関して現在提案されている動力源モデルでは、高速回転する親星が必要である。一方、ガンマ線バーストにはIc/b型の超新星爆発が付随するが、水素、ヘリウムの外層を星風で失ったとすると、質量と同時に角運動量も失ってしまうという問題が生じる。このジレンマを解消する理論モデルと最近の観測に照らすと、ガンマ線バーストを起こす親星が、通常の超新星爆発とは異なり、高いエントロピーを持つ、より高温でコンパクトな恒星である可能性があることに着眼した重力崩壊シミュレーションを行った。その結果、激しく時間変動する高光度のニュートリノが放射され(図1参照)、ガンマ線バーストの示す高いエネルギーと中心エンジンに要求される時間変動の両方を自然に説明できる可能性があることを明らかにした。具体的なメカニズムは以下のとおりである。

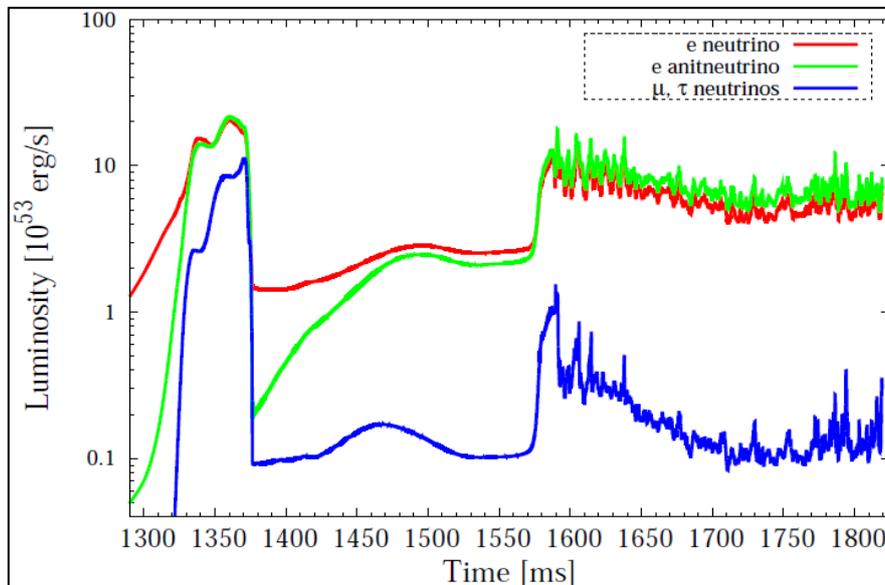


図1：ニュートリノ光度の時間進化。対流の発展に伴い、光度は激しい時間変動を示す。Sekiguchi & Shibata 2011, ApJ 737, 6

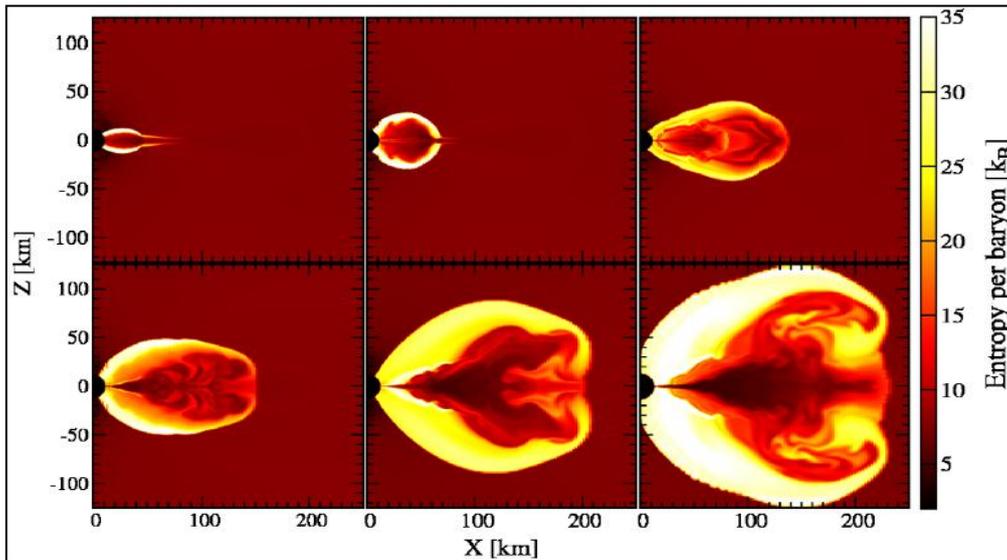


図 2 : エントロピー分布の時間スナップショット。
 ブラックホール周りの降着円盤で衝撃波が形成され、対流が励起されている。
 図は Sekiguchi & Shibata 2011, ApJ 737, 6 より引用

コンパクトな構造のために質量降着率が高く、重力エネルギー解放による加熱とのバランスをとるために、衝撃波を伴う降着円盤の膨張、対流(によるエネルギー輸送)などの流体不安定が起こる(図 1 参照)。衝撃波加熱によって、高いニュートリノ光度が達成され、流体不安定に伴って激しく時間変動する。高エントロピーのために重元素存在率が低いため、主要な衝撃波冷却源である重元素光分解が抑制されるため、ガンマ線バーストに付随するような、高エネルギーの爆発が期待される。これらは通常の超新星では起こらない。これら現象において、ブラックホールスピンによる一般相対論的重力効果が重要な役割を果たしている。

(2) 一般相対論的輻射輸送コードの開発

Sekiguchi et al. (2011) Physical Review Letters 107, 051102

Sekiguchi et al. (2011) Physical Review Letters 107, 211101

連星中性子星の合体における重力波およびニュートリノ放射過程を、数値相対論の枠組みで初めて明らかにした(表紙を飾る)。さらに、合体後に過渡的に形成される中性子星の振動に伴う重力波を用いて、中性子星内部の物質の物理状態、特に理論的に存在が示唆されるハイペロン相などの非通常核物質相の有無を調べることが可能であることを示した。その理由は以下のようなものである。

重力波放出による角運動量損失により、中性子星は収縮し中心密度が増加し、それに伴ってハイペロンの存在比も上昇する。ハイペロン相のような非通常核物質相が出現すると圧力は低くなる。そのため、収縮→ハイペロン存在比増大→圧力減少→収縮、とい

うフィードバックにより、中性子星は短い時間スケールで収縮するため、それが重力波振動数の時間変化として現れる。

(3)一般相対論的輻射輸送コードの開発

輻射場を一般に取り扱うためには、時間+空間+運動量空間の合計7次元の問題を解く必要があるが、これは現在の計算機資源では実質的に意味のある計算を行うことが不可能である。非相対論の枠組みでは様々な近似手法が開発されているが、一般相対論的な近似手法はなかった。そこで我々は一般相対論的な近似手法の開発から着手した。**Thorne** が定式化した相対論的なモーメント法に基づき、3次までのモーメントを考慮して、物理的に妥当な closure 関係式を導入することで、世界で初めて一般相対論的な輻射磁気流体コードを独自に開発した (Shibata, Kiuchi, Sekiguchi & Suwa 2011)。コードを大規模計算機への適用に向けて拡張中した後、一般相対論的ニュートリノ輻射輸送計算に基づく超新星爆発シミュレーションに適用している。この結果については現在論文準備中である。