

PopIII 星コアの重力崩壊によるブラックホール+ディスク系の形成

関口雄一郎 (国立天文台)

利用カテゴリ XT4B・SX9A

SX9A

ブラックホールの形成条件や形成過程を明らかにすることは、宇宙物理学における最重要課題の一つである。特に、高速回転するブラックホールとそれを取り巻く降着円盤が形成する際には、宇宙で最大規模の爆発現象であるガンマ線バーストが付随する可能性があることが近年の観測により明らかにされており、ブラックホールの形成機構の解明は、天体物理学的にも重要性を増している。

理論的側面からすると、大質量星の中心核がブラックホールへと崩壊する過程 (及びガンマ線バーストが形成される過程) では、有限温度下での高密度核物理、電子捕獲反応、ニュートリノ冷却といった微視的物理過程、及び中心核の回転、磁気流体现象といった巨視的物理過程、の全てが重要な役割を果たす可能性があり、これら全てを考慮に入れた計算が必要とされている。

本課題では、現実的、理論的なブラックホール形成過程の解明を目指すため、完全に一般相対論的な枠組のもとで、上記に挙げた微視的物理過程、及び磁気流体现象を考慮に入れたシミュレーションプログラムを作成した。また、これらのプログラムを用いて、重力崩壊の結果、中性子星が形成される場合について、数値シミュレーションを行なった。

完全に一般相対論的な枠組で、微視的物理過程を考慮に入れたシミュレーションプログラムの概要、及びそれを用いて行なわれた、大質量星の中心核の中性子星への重力崩壊のシミュレーション結果は、まもなく論文にまとめて投稿される予定である。以下にその概要を示す。有限温度の高密度核物理を考慮した状態方程式として、Shen らによって作成された相対論的平均場理論に基づく状態方程式 (Shen et al. (1998)) を採用した。この状態方程式はテーブルとして与えられており、本研究で安定にテーブルを引く手法を開発した。電子捕獲反応は、Fuller らの計算手法 (Fuller et al. (1980,1982,1984,1985)) に基づいて計算している。ニュートリノによる冷却過程は、「ニュートリノ洩れだし法」と呼ばれる近似技法を、一般相対論敵に無矛盾となるように拡張して計算している。Woosley らのグループによる恒星の進化計算によって得られた大質量星の中心核を初期条件として採用し、重力崩壊の結果中性子星が形成される場合についてシミュレーションを行なった結果を以下に述べる。

1. 初期条件の中心核は不安定であり、電子捕獲反応を組み入れないでシミュレーションを行なった場合でも光分解反応によって中性子星へと重力崩壊する。この場合には原始中性子星表面で発生した衝撃波は鉄コア表面へと到達する。この結果は Sumiyoshi らの過去の研究結果と無矛盾である。
2. 電子捕獲反応を組み入れた場合、中心核はより不安定化し、重力崩壊は加速される。その結果、形成される原始中性子星の質量は減少する。衝撃波は 100km に満たないところで減速され止まってしまう。

3. 衝撃波が原始中性子星を通過する際に、ニュートリノが多量に放射され、原始中性子星表面付近に負のエントロピー勾配及び負のレプトン数勾配を形成する。このような領域は対流不安定であり、原始中性子星内に激しい対流運動が励起される。
4. 対流運動にともなって重力波が放出される。10kpcの距離で発生した事象に対して、振動数がおよそ 100–1000 Hz の間に振幅が $< 10^{-20}$ 程度の重力波となる。もし我々の銀河系内で発生したとすれば、現在稼働中の重力波検出器で検出可能であり、その際に原始中性子星内部の情報をもたらすことが期待される。

本研究は2本の論文にまとめて2008年に投稿済みであるが、レフェリーの変更を経て（現在第3レフェリー）現在審査中である。

上記計算では、電子捕獲反応に関して Fuller らによる近似計算法を採用した。しかしながら、これらの計算では、質量数が65を越えるような重い原子核における電子捕獲反応の不定性が大きい。電子捕獲反応率は、コアバンス時のコアの電子フラクションを介してコアの質量、ひいては爆発のエネルギーを司る重要なパラメータであるため、これについてより洗練された手法を用いて計算する必要がある。そこで、ある与えられた密度、電子フラクション、温度に対して、nuclear statistical equilibrium を仮定して、原子核の分布を求め、求まった分布に対して、原子核の殻モデル計算によって詳細に決められた反応率を適用することで、より「現実的な」電子捕獲反応率を計算した。求められた電子捕獲反応率を用いて、重力崩壊の計算を行い、Fuller らによる近似計算法による結果との比較を行った。本研究は現在論文にまとめている最中である。

上記で作成した数値コードを用いて、第一世代星コアの重力崩壊によるブラックホール形成の数値相対論シミュレーションを行った。初期条件として、エントロピー及び電子フラクションが一定のコアを採用した。ブラックホールが形成する場合には時空に特異点が発生するため、特別の取扱いが必要となる。特に微視的物理過程を組み入れた差異には、反応率の温度、化学ポテンシャルへの高い依存性から、極めて慎重な取扱いが必要となる。ブラックホール形成後の時空を、微視的物理過程、ニュートリノを考慮して安定に計算する手法を開発し、ブラックホール形成のシミュレーションに世界で初めて計算した。本計算では超新星爆発の計算に比べて、ダイナミカルレンジ（超新星：鉄コア $\sim O(1000\text{km})$ 、中性子星 $\sim 10\text{km}$ ；第一世代星コア崩壊：コア $\sim O(10000\text{km})$ ；ブラックホール $\sim O(1\text{km})$ ）が非常に大きく、より多くの計算量を要する計算であることも問題点となったため、計算コードの高速化も行っている。本研究は現在高分解能計算を行っている最中であり、計算終了次第論文を執筆する予定である。

XT4B

連星中性子星の合体からの重力波によって、高密度核物質の状態方程式に制限を与えることができる可能性が近年さかんに議論されている。しかしながら、これらは（数値相対論計算が困難であるということもあり）合体の結果重たい中性子星が形成される場合に限られている。現在観測されている連星中性子星の個々の質量は、典型的には太陽質量の1.35倍程度であり、合体の結果形成されるコンパクト天体としては、ブラックホールを考えることも重要である。そこで本研究では、数値相対論に基づく、連星中性子星の合体の長時間シミュレーションを行い、ブラックホールが形成する場合における重力波波形・スペクトルの理論計算を行った。シミュレーションでは、理論計算に基づくゼロ温度の現実的状态方程式に、有限温度の補正として理想気体の状態方程式を加えたものを用いている。ブ

ラックホールが形成される場合には、高温となる中心領域は直ちにブラックホールへと飲み込まれてしまうため、有限温度の効果は、重たい中性子星が合体の結果形成される場合に比べて小さい。

本研究で明かになった重要な点は、まず第一に、合体の結果ブラックホールが形成される場合に放出される重力波のスペクトルは、連星の質量比、総質量、及び中性子星の（ゼロ温度）状態方程式に依らず、ユニバーサルな形を示すことである。さらに、スペクトルはいくつかのパラメータを含む関数系で近似することが可能であり、それぞれのパラメータが、合体のダイナミクスや中性子星のコンパクトネスなどの重要な情報を含むことである。コンパクトネスの情報は、状態方程式を制限するのに有用であり、ダイナミクスの情報は、形成されるディスクの質量を評価し、ショートガンマ線バーストなどの高エネルギー天体现象との関連を議論する上で重要である。

本研究は論文にまとめて 2009 年に投稿済みであり、現在審査中である。