

成果に関連して出版、もしくは印刷、投稿中の論文リスト

このプロジェクト（同様の過去のプロジェクトも含む）での成果

※今年度中に出版された論文、国際会議集録、国際会議、学会、研究会発表、その他出版物（印刷中、投稿中の場合はその旨を記載すること）。評価資料として利用いたしますので、様式・順序は任意ですが、学術論文については題名、著者、発行年月、雑誌名、巻、ページが記載されていること。

項目の説明の文章などは消去して報告内容を記述しても構いません。

1. Sekiguchi, Y. and Shibata, M. "A Formation Mechanism of Collapsar Black Hole — Early Evolution Phase —"
Prog. Theor. Phys. 117, 1029.
査読付き欧文論文
2. Shibata, M., Sekiguchi, Y., and Takahashi, R. (2007)
"Magnetohydrodynamics of Neutrino-Cooled Accretion Tori around a Rotating Black Hole in General Relativity"
Prog. Theor. Phys. 118, 257.
査読付き欧文論文
3. Sekiguchi, Y. (2007)
"Simulations of stellar core collapse in full general relativity with a realistic equation of state"
博士学位論文
4. Sekiguchi, Y. (2007)
"A fully general relativistic numerical code with microphysics"
国際研究会発表 @ The 14th Workshop on General Relativity and Gravitation
5. Sekiguchi, Y. (2007)
"Simulation of stellar core collapse in full general relativity with microphysics"
国際研究会発表 @ VIII Asia-Pacific International Conference on Gravitation and Astrophysics
6. Sekiguchi, Y. (2008)
"Collapse of rapidly rotating massive stellar core to a black hole in full GR"
国際研究会発表 @ Accelerators in the Universe - Interplay between High Energy Physics and Cosmophysics -
7. 学会発表 @ 日本天文学会秋季年会（2007）
8. 学会発表 @ 日本天文学会春季年会（2008）

成果の概要

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、まずはじめに、高速回転する大質量星の中心核が、回転ブラックホールとそれを取り巻く降着円盤へと重力崩壊する過程を完全に一般相対論的な問題設定のもとで明らかにした。さらに、より現実的、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。

高速回転する大質量星の中心核が、回転ブラックホールとそれを取り巻く降着円盤へと重力崩壊する過程研究は、軸対称性の仮定のもとで、一般相対論的数値流体シミュレーションを行なって進めた。初期条件としては、太陽質量の 3.5–4.5 倍程度で、主として最大剛体回転している中心核を用意した。さらに、角運動量分布による違いを調べるための初期条件も数例用意した。重力崩壊中の中心核を記述する状態方程式としては、ガンマ法則型の状態方程式をつなぎ合わせた、簡略化した状態方程式を採用した。但し、最近の球対称の中性子星の最大質量を考慮し、採用した状態方程式での最大質量がおおよそ太陽質量の 2 倍となるようにしている。尚、シミュレーションは国立天文台の富士通 V P P 5 0 0 を用いて実行した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

1. 重力崩壊する中心核の質量が十分に重いため、ブラックホールが重力崩壊直後に形成される。
2. ブラックホール形成後、中心核が高い角運動量を持っていたため、遠心力によって支えられた円盤がブラックホールの周りに形成される。
3. 形成された円盤に中心核外部の物質が降着する過程で、衝撃波が発生する。
4. 衝撃波の伝播に伴い円盤は加熱され、また、ブラックホールの回転軸近傍に低密度領域が形成される。このような天体は、ガンマ線バーストの中心動力源として有望な性質を持つ。
5. 本研究で採用した状態方程式、初期条件では、形成されるブラックホールと円盤との質量比はおおよそ 20:1 である。

ここでのべた成果は以下の論文に掲載されている。

- Y. Sekiguchi and M. Shibata, “A Formation Mechanism of Collapsar Black Hole – early evolution phase –” Prog. Theor. Phys. **117** (2007), 1029-1039.

形成された円盤の進化を調べた結果は以下の論文に掲載されている。

- M. Shibata, Y. Sekiguchi, and R. Takahashi, “Magnetohydrodynamics of Neutrino-Cooled Accretion Tori around a Rotating Black Hole in General Relativity” Prog. Theor. Phys. **118** (2007), 257-302.

次に、より現実的なブラックホール形成過程の解明を目指すために行なった研究についてまとめる。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湧起される。
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。

以上の結果はまもなく論文にまとめて投稿される予定である。