

研究成果報告書

プロジェクト ID : yys93a

回転星の重力崩壊とブラックホールの形成に関する
軸対称一般相対論的シミュレーション

研究代表者：関口 雄一郎

研究分担者：柴田 大

所属：東京大学大学院総合文化研究科

ブラックホールの唯一性定理より、アインシュタイン方程式の定常真空解は Kerr 解のみであることが知られている。従って、回転星の重力崩壊によってブラックホールが形成されたとすると、十分に時間が経過した定常状態は Kerr 解で記述されると考えられる。Kerr 解は系のスピンパラメータ $q \equiv Jc/GM^2$ (G : 重力定数, c : 光速, M, J : 系の質量及び角運動量。以下 $c = G = 1$ の単位系を採用する) の値が 1 を超えると裸の特異点を持つ時空を表す。そのため、初期に $q > 1$ なるスピンパラメータを持つ回転星の重力崩壊の最終状態が、どのようなものであるかを明らかにすることは、ブラックホールの形成条件を解明することと関連して、一般相対論が明らかにすべき問題として重要である。この問題に関する過去の研究結果は、 $q > 1$ の場合には崩壊の過程で遠心力が卓越して跳ね返り、ブラックホールは形成されないというものであった。しかし、この問題は状態方程式が軟らかい場合については調べられていない。

一般に、一般相対論的な球対称平衡形状では、その断熱指数 Γ が $4/3$ より小さい場合には不安定である。しかし、星が回転している場合には、 $\Gamma < 4/3$ の形状も回転の効果によって安定化され得る。このような場合、回転星ののスピンパラメータ $q \equiv Jc/GM^2$ (G : 重力定数, c : 光速) は 1 を超えることが最近示された [1]。このことは、ブラックホールへと崩壊すると考えられる現実的な初期天体が $q > 1$ なるスピンパラメータを持つことを意味する。さらに、回転星の重力崩壊に対する安定性の議論からの推察の 1 つとして、状態方程式が軟らかい場合には、 $q > 1$ であっても星の中心領域がブラックホールを形成する可能性が示唆された [1]。

したがって、本研究では、過去の研究では調べられていない、状態方程式が比較的軟らかい場合 ($\Gamma = 1.5$) で、且つ、 $q > 1$ なるスピンパラメータを持つ初期回転星の重力崩壊について、空間が軸対称であることを仮定して、完全に一般相対論的なシミュレーション及び解析を行なって調べた。

まず、星の中心領域での近似的なスピンパラメータの指標 q_c を準局所的に定義して、初期条件から次のような重力崩壊の最終状態に関する予測した。1. 初期回転星が $q > 1$ なるスピンパラメータを持つ場合にも、 $q_c \lesssim 1$ であれば中心領域が最初に重力崩壊して種ブラックホールを形成する。2. 重力崩壊の結果ブラックホールが形成されるかどうかは、 q_c によって決まっており、 q の値には依らない。3. 種ブラックホールの形成後、周囲の流体はブラックホールへと落ち込むが、これに伴うブラックホールの成長は、近似的には初期回転星の質量、角運動量分布に沿って進行する。4. 重力崩壊の最終結果はブラックホールとそれを取り巻く(重たい)ディスクである。5. q_c の値が 1 に近づくほど(回転が速いほど)形成されるディスクの質量は大きくなる。

これらの予想が正しいかどうかを、完全に一般相対論的な数値流体シミュレーションを行なって調べた。アインシュタイン方程式は BSSN による再定式化 [2] を用いて解いている。また、軸対称問題をデカルト座標で解く Cartoon 法と呼ばれる方法を採用した [3]。一方、流体の方程式については、 Γ -law 型の状態方程式を採用して、円筒座標の下で衝撃波高分解法 [4, 2] によって解いた。

数値シミュレーションの結果、上記の初期条件からの予想 1. ~ 3. が確かめられ、星全体で $q > 1$ である場合にも、中心領域で $q_c < 1$ であれば、種ブラックホールが形成されることが明らかになった。つまり、従来考えられていたブラックホール形成の閾値 $q \approx 1$ は状態方程式が軟らかい場合には適当ではない。そこで、本研究の結果から、新たなブラックホール形成の指標 $q_c \lesssim 1$ を提案した。一方、予想 4. 及び 5. については、これらを指示する結果が得られているものの、確実な結果は得られていない。これらを明らかにするためには、ブラックホール抜き取り法などの新たな計算手法が必要となる。また、過去の研究で $q \approx 1$ がブラックホール形成の閾値とされた理由についても考察を行なった。

参考文献

- [1] M. Shibata, *Astrophys. J.* **606**, to appear (astro-ph/0403172).
- [2] M. Shibata, *Phys. Rev. D* **67**, 024033 (2003).
- [3] M. Alcubierre, S. Brandt, B. Brügmann, D. Holz, E. Seidel, R. Takahashi, and J. Thornburg, *Int. J. Mod. Phys. D* **10**, 273 (2001).
- [4] J. A. Font, *Living Review Relativity* **6**, 4, 2003; F. Banyuls, J. A. Font, J.-Ma. Ibáñez, J. M. Martí, and J. A. Miralles, *Astrophys. J.* **476**, 221 (1997).