

論文内容の要旨

論文題目: Simulations of stellar core collapse in full general relativity
with a realistic equation of state
(現実的状態方程式による大質量星の重力崩壊の
一般相対論的数値流体シミュレーション)

氏名: 関口 雄一郎

大質量星の中性子星またはブラックホールへの重力崩壊、およびそれに付随する超新星爆発は、理論および観測、双方の観点において天体物理学における最も重要な現象の一つである。重力崩壊で解放される重力エネルギーは、電磁波、ニュートリノ、及び重力波の多様な形で放射される。ニュートリノ及び重力波は、電磁波では知り得ない崩壊コアの高密度中心領域の情報をもたらすため、それらの観測は現在の天体物理学において非常に重要な位置を占めている。一方、観測から物理的な情報を引き出すために、重力崩壊の理論的研究が同時に必要である。大質量星の重力崩壊は非常に非線形かつ動的な現象であるため、その解明のためには、数値シミュレーションを行うことが必要となる。

ニュートリノは解放される重力エネルギーのほとんどすべてを運び去る。崩壊コアの進化はニュートリノの放射によって駆動されるため、現実的解析のためにはニュートリノ考慮に入れることが必要である。また、重力波は非球対称な動的現象からのみ放射されるため、その波形の理論的予測のためには、空間多次元の解析が必要となる。中性子星およびブラックホールは一般相対論的天体であるため、精度の良い定量的予測のためには、一般相対論に基づく理論計算が必要となる。

さらに、大質量星の重力崩壊は、恒星質量程度のブラックホールの主要な形成メカニズムとしても重要である。特に、初期に恒星のコアが高速回転している場合には、崩壊の結果、ブラックホールのまわりに高温の降着円盤が形成されると考えられる。そのような系は、近年盛んに研究されている γ 線バーストと呼ばれる高エネルギー天体現象の中心動力源として有力視されており、その形成過程の研究は重要性を増している。

これらの現象の解明のためには、ニュートリノの放射といった微視的物理過程を考慮にいった、多次元の一般相対論的数値シミュレーションが必要である。これに対し、私は世界で初めてセルフコンシステントな方法でこれらを考慮にいった、多次元の一般相対論的数値流体コードを作成した。具体的には、相対論的平均場理論に基づく有限温度の現実的状態方程式を組み込み、ニュートリノの生成過程として電子捕獲反応を組み込み、ニュートリノの放射過程は neutrino leakage scheme と呼ばれる近似法を用いている。一般相対論的流体力学方程式は、高精度衝撃波捕獲法によって解いている。

本博士論文において、開発したコードの詳細な解説を行うとともに、幾つかのシミュレーションを行

い、その妥当性および精度を示す。シミュレーションの初期条件として、恒星の進化の理論計算に基づく現実的モデルを採用する。シミュレーションによって得られた結果は、近似的な半定量的評価と合致しており、また過去に行われた同様のシミュレーションの結果とも無矛盾である。

本博士論文において、コードの妥当性の評価とともに、さらに重力波の計算も行っている。コアのバウンス後、ニュートリノの放射によってコア内に負のエントロピー勾配および負のレプトンフラクション勾配が形成される。そのような領域は Ledoux 不安定であり、対流を起こす。本博士論文において、対流による重力波の放出を初めて一般相対論的に計算した。採用した neutrino leakage scheme では、対流に伴って放射される重力波の振幅は、コアのバウンス時に放射される重力波の振幅と同程度であり、太陽系から 10 kpc 内ので発生すれば、現在稼働中の重力波検出器によって観測することができる。

回転重力崩壊の場合には、コアのバウンス時に強い重力波が放出される。回転の効果により、ニュートリノの放射 (ニュートリノ球) は非球対称になるが、コアのダイナミクスはニュートリノの放射に強く影響をうけるため、結果として放出される重力波の波形もその影響をうける。本博士論文において、非球対称のニュートリノ放射が重力波放出に与える影響を初めて明らかにしている。

作成された計算コードは精度、妥当性ともに十分信頼のおけるものであることが示されており、本コードを用いて、ブラックホール形成過程の現実的解明をはじめとして様々な天体物理学における知見を得ることが可能である。