

論文内容の要旨

論文題目

The Central Engine of Gamma-Ray Bursts and Core-Collapse Supernovae Probed with Neutrino and Gravitational Wave Emissions

(ニュートリノと重力波を用いて探るガンマ線バースト及び重力崩壊型超新星の中心エンジン)

氏名 諏訪 雄大

ガンマ線バーストと超新星爆発は宇宙で最も激しい爆発現象の一つである。これらの天体現象が宇宙空間に及ぼす影響は非常に大きい。近年、この二つの爆発現象が同一の天体から起こっていることが観測によって明らかになった。これはすなわち、超新星爆発を起こすような大質量星の重力崩壊にガンマ線バーストを起こす超相対論的ジェットが付随する天体が存在していることを意味している。本論文では、ガンマ線バーストと超新星の中心エンジンをニュートリノ、重力波のシグナルを用いて探求する手法の確立を目指した。

ガンマ線バーストの中心エンジンの最も有力な候補はコラプサーモデルと呼ばれるものである。このモデルでは、 $\sim 40M_{\odot}$ 以上の質量を持つ星の鉄コアが重力崩壊の結果ブラックホールとなり、その周りに高い降着率をもつ降着円盤が形成される。このモデルにおける最大の問題は、ガンマ線バーストを起こすのに必要な超相対論的ジェットの生成機構である。その候補は大きく分けて二つある。一つは降着円盤から放射されるニュートリノの対消滅によって回転軸付近にエネルギーを注入するモデル、もう一つは磁場によってブラックホールの回転エネルギーもしくは降着円盤の重力エネルギーをポインティングフラックスとして放射するモデルである。どちらが現実のガンマ線バーストの中心で働いているのかは現在のところ全く明らかになっていない。また、その観測手法も確立されていない。

本論文の第一部ではこの問題に取り組んだ。ニュートリノ対消滅モデルでは、ガンマ線バーストを起こすのに十分なエネルギーをジェットへ供給するために膨大な量のニュートリノが円盤から放射されていなくてはならない。このニュートリノが重力波を生成することに着目し、その強度を見積もった。その結果、観測可能な強度が生成されうることを明らかにした。また、降着円盤からの

ニュートリノ光度がある時間の間一定であるという仮定のもと、重力波のスペクトルを計算した。このスペクトルを DECIGO や BBO といった将来計画されている重力波干渉計の感度と比較することで、100 Mpc 以内で起こるガンマ線バーストは観測可能であることを示した。一方、磁場によって生成されるジェットではこのような強度の重力波は放出されない。つまりこれは、近傍でガンマ線バーストが起こった際に重力波が観測されたか否かによって、中心のジェット生成機構に制限を加えることができることを意味している。しかし、重力波単体では生成源が同定できないため、それ以外のシグナルによってガンマ線バースト源を定めなくてはならない。そこで、同時に放出される熱的ニュートリノとガンマ線の強度を計算したところ、こちらも将来計画されている検出器で観測できることが分かった。これらのシグナルを利用することで、ガンマ線バーストの中心エンジンについての知見を得られる可能性を示した。

重力崩壊型超新星爆発は大質量星が最期の瞬間に起こす大爆発である。その瞬間的な明るさは母銀河に匹敵するため、古来から多くの観測がなされてきた。しかし、爆発メカニズムは未だ完全には明らかになっていない。標準的なシナリオとして、遅延爆発モデルがある。これは鉄の光分解などによってエネルギーを失ってしまった衝撃波に、中心部から放射されたニュートリノがエネルギーを注入することで爆発を起こすモデルである。しかし、詳細な微視的物理を組み込んだ計算でも球対称の仮定のもとでは爆発を再現することが出来ていなかった。

本論文の第二部では数値計算を用いてこの問題に取り組んだ。重力崩壊から爆発までをシミュレーションするために、ニュートリノ輻射輸送を流体力学とともに解く2次元軸対称計算コードを作成した。このコードを用いて計算したところ、球対称の計算ではやはり爆発は再現できなかったものの、2次元軸対称の計算では衝撃波がニュートリノ加熱によりエネルギーを受け取り、鉄コアの外へ伝搬するまでを計算することが出来た。これは流体要素の多次元の動きが可能になったことで起こった変化である。具体的には、対流によりニュートリノ加熱が強く働く領域に物質が長い時間滞在することができるようになり、ニュートリノ加熱の効率が著しく大きくなったことが重要な役割を果たしている。また、回転の有無によって衝撃波の時間発展にどのような影響があるのかを調べた。その結果、回転しているモデルは南北対称な爆発を起こすのに対し、無回転モデルでは片方の極方向のみ爆発する傾向が強いことを示した。この現象は、停在降着衝撃波不安定性の南北非対称なモードが回転によって抑制されることに起因していることが分かった。また、回転しているモデルでは爆発エネルギーが大きくなることを明らかにした。さらに、これらの多次元的な特徴がニュートリノにどのように現れるかを調べた。その結果、無回転軸対称モデルでは、球対称モデルにはない、ニュートリノ光度の大きな時間変動が現れることが分かった。これは原始中性子星近傍の対流運動によって駆動されているものである。さらに、回転は軸付近の対流運動を抑制する働きがあるので、回転モデルではこのような時間変動が抑えられることを示した。また、回転モデルでは遠心力によって降着率が下がるため、時間が経過していくとニュートリノ光度が下がる様子を示した。このようなニュートリノシグナルによって、重力崩壊型超新星の内部の流体の動きを探ることが出来る可能性を示した。