

論文内容の要旨

論文題目：

Effect of Rotation and Magnetic Field on the Explosion Mechanism and Gravitational Wave in Core-Collapse Supernovae

(重力崩壊型超新星における自転、磁場の爆発メカニズム及び重力波に及ぼす効果)

氏名 固武 慶

重力崩壊型超新星とは、大質量星がその進化の最終段階に迎える爆発現象のことである。大マゼラン星雲に起こった（重力崩壊型）超新星 1987A からはニュートリノが検出され、神岡のグループがこの業績でノーベル賞を受賞した。この出来事は、現在発達する著しいニュートリノ天体物理学の始まりを告げただけでなく、重力崩壊型超新星そのものの理解を大いに動機付けるものがあった。この他にも、超新星爆発は古くは元素合成、また昨今話題のガンマ線バースト、マグネター（強磁場中性子星）などに代表される高エネルギー天体物理現象との相関が観測的に示唆されており、宇宙・天体物理学上の大きな課題の解決を握る天体現象である。その様な位置づけにある重力崩壊型超新星であるが、その爆発メカニズムは完全に理解されているとは言いがたい状況にある。従来、超新星コアから放射されるニュートリノが超新星外層部を加熱することで爆発を説明できると考えられてきた。しかしごく近年になって、このニュートリノ加熱メカニズムだけでは爆発が再現できないことが確定的になっている。実際、この分野の研究者の多くが仮定している一次元球対称モデルでは、爆発を再現できないのである。つまり、ニュートリノ加熱 プラス α の現象が爆発メカニズムを説明するために不可欠であることが分かってきた。我々は、その要素として、超新星の自転、磁場などの多次元的な側面に注目する。その場合、それらの多次元側面がニュートリノ加熱メカニズムにどのような効果を及ぼすのか、つまり、爆発を起こしにくくなるのか、また逆に起こしやすくなるのか、について調べることが出発点となる。

本博士論文の第一部では、この問題に取り組んだ。

上記の第一目的を果たすためには、自転、磁場の効果で超新星コア内におけるニュートリノ放射が球対称の時からどのように変化するかを調べる必要がある。それを調べるために、自転、磁場を伴う超新星コアの重力崩壊過程を2次元磁気流体数値計算で追い、衝撃波が失速した後のニュートリノ球外部領域におけるニュートリノ加熱率を評価した。星の中心部の角運動量、磁場分布を预言する理論モデルには不定性が大きいので、コアの自転、磁場の強度、分布をパラメトリックに変えて初期条件をつくり、系統的に自転、磁場の効果を調べた。入力物理としては、相対論的平均場近似に基づく現実的な状態方程式を用い、電子捕獲とニュートリノ輸送は **Leakage scheme** によって近似的に扱った。数値計算の結果、ニュートリノ球の形状が主に自転の効果で扁平に変形し、ニュートリノ放射、加熱率共に非球対称になることが分かった。特にニュートリノ球の温度は自転軸付近で高くなるので、自転軸付近の物質ほどニュートリノによってよく温められることが分かった。更に、流体安定性の線形解析を行ったところ、極付近の物質は、対流不安定であることも分かった。これらの結果から、自転を伴う超新星は、自転軸に方向により爆発しやすくなり、非対称な爆発（ジェット状爆発）を起こすことが予想される。この傾向は、超新星1987A等の観測事実と整合性が良い。次のステップとして、自転に加え磁場についても考慮した。近年の星の進化モデルによれば、重力崩壊直前の星の磁場はトロイダル成分がポロイダル成分より卓越していることを示唆している。我々は、そのような状況のときに、上記の非対称ニュートリノ放射がどのように変更を受けるか調べた。その結果、マグネタークラスの強磁場下（超新星コアにおける磁場が10の15乗に達するほど強い場合）でも、自転がニュートリノ球の形状、ひいてはニュートリノ放射の支配的に非対称性を決めていることを示した。なぜならば、ニュートリノ球が形成される領域においては、物質の圧力が磁気圧に比べてまだ大きいからである。一方、超新星コア内では、角速度が中心から外側に向けて減少傾向にある。特に、その勾配がきついのが自転軸付近である。そのような領域では、方位角方向の磁気回転不安定性が成長することが知られている。実際、不安定性の線形成長率のタイムスケールを評価したところ即時爆発のタイムスケールで成長できることが分かった。この磁気回転不安定と自転軸付近を強く暖める非球対称ニュートリノ加熱とが相俟って、所謂、マグネター生成にもジェット状爆発が伴う可能性を指摘した。また上記のトロイダル磁場優勢モデルに加えて、ポロイダル磁場優勢磁場モデルも考慮した。トロイダル磁場優勢を预言した星の進化モデルには不定性があり、その結論が確定的でないことから、ポロイダル磁場についても考慮するのは依然として重要だからである。そのような強ポロイダル磁場下では、ニュートリノの反応断面積が磁場の影響を受けることが知られている。我々は自転によって大きな非球対称性を持つニュートリノ放射と磁場の相互作用で、超新星コア内の大域的なニュートリノ加熱の強度分布がどのようになるのかを調べた。結果、星の北極より、南極においてニュートリノ放射が強くなることが分かった。

これは、強磁場を伴う爆発の結果、マグネターは北極方向にキックをうけることを示唆している。

重力崩壊型超新星は、アインシュタインの予言した重力波の放出源としても注目されている。実際、超新星からの重力波をターゲットにした多くの長基線レーザー干渉型重力波検出器が運用、計画中である。精度よい観測のためには、より現実的な超新星爆発の数値計算に基づいた波形の予測が不可欠である。本博士論文の二番目のテーマは、自転、磁場の効果で重力波波形がどのように影響を受けるのかを系統的に調べることである。また、我々は更にもう一步踏み込んで、その超新星からの重力波が観測されたとして、その波形の特徴から超新星自体の物理に関してどのような情報を齎すのかについても特別の注意を払う。なぜならば、従来の電磁波の観測では星の表面の情報しか得られないのに対し、重力波は星の深部における構造（状態方程式、角運動量、磁場分布）に関する情報を我々に運んでくれる新たな潜在性を持っているからである。またそれらの情報は、爆発メカニズムを理解する上でも不可欠である。

本論文の第一目的を果たすための数値計算で行ったように崩壊直前の超新星コアにおける自転、磁場の強さ、分布をパラメトリックに変えて系統的に調べた結果、超新星が我々の銀河中心で起こったときに、その重力波の最大振幅は TAMA（日本）や LIGO（アメリカ）などの現在稼動中である重力波検出器の検出限界内に十分入ることを指摘した。従来の超新星からの重力波の研究は、状態方程式は単純なポリトロップ型を仮定しており、ニュートリノ輸送などは全く顧慮していないものが殆どだった。一方、我々の数値計算では、前述のように現実的な状態方程式、近似的だがニュートリノ輸送の効果も取り込んだものである。我々の現実的な計算によって、計算機のコストが比較的にかからない単純化した計算でもバウンス時の重力波に関する定性的な振る舞いは変わらない事を指摘した点に意味がある。更に、我々は重力波の2番目のピークに着目することで、従来の電磁波の観測からは知ることができない超新星コアの自転の様子に対して有力な情報が得られることを新たに指摘した。磁場の重力波波形に及ぼす波形は、我々が世界に先駆けて評価したものである。マグネタークラスの強磁場超新星でも、磁場無しの場合に比べて最大振幅は10%ほどしか変更を受けないことが分かった。これまで述べてきた重力波は、コアがバウンスする際に物質の大きな非対称運動が引き金となって放出されるものである。実は、その他にも超新星における重力波源として、(a) 停滞衝撃波と原始中性子星の間に生まれる流体不安定性が生む対流運動、(b) 非球対称なニュートリノ放射が起源となる重力波がある。(a)については、既にいくつか先行研究があり、有力な重力波源であることが示唆されてきた。本博士論文で着目するのは(b)であり、特に超新星コアの自転が生み出すニュートリノ非対称性とその重力波の関係を調べた。その結果、微分回転の強いモデルほど、重力波の振幅が時間とともにより大きくなることが分かった。また、その放出される重力波の周波

数は低周波側（100Hz 以下）でコアバウンス時の重力波を凌駕し、強度としては、次世代検出器 LIGO-II（アメリカ）、LCGT（日本）の検出限界内にあることを指摘した。

本博士論文の目的は二つあった。つまり、自転、磁場の爆発メカニズムと重力波に及ぼす影響を調べることである。しかし、ここにきてその2つは、独立でなく、お互いに深く結びついていることが分かる。そのキーワードは、非球対称なニュートリノ放射である。実際、我々が指摘した非球対称なニュートリノ放射を起源とする重力波が観測されたとすれば、我々が提唱する非球対称なニュートリノ加熱が爆発を誘起するモデルの一つの傍証となるはずである。これらの関連をより明確にするためには、実際に非球対称なニュートリノ放射で爆発が起きるかどうかについて調べることが急務になる。今までの我々の数値計算法では、ニュートリノ加熱を流体力学と合体させることができない。つまり、我々が今まで述べてきた示唆、予言を確実なものにするためには、新たな数値計算法の開拓が不可欠である。最近我々は、流速制限法を用いた多エネルギーニュートリノ輸送計算法を構築した。この数値コードが、上記の目標を果たす第一ステップとなる。本博士論文中で、本数値コードの信頼性を示すために、従来的一次元球対称ニュートリノ輸送コードと比較するテスト計算で得られた結果を報告する。このコードは、これからのより詳細な数値計算の試金石となるものである。