

# 論文審査の結果の要旨

固 武 慶

太陽の約 10 倍より重い星では、進化の末にコア(芯)の鉄が光分解して重力崩壊し、中性子星やブラックホールを形成するとともに、外層部は吹き飛び II 型超新星として観測されると考えられる。この過程を計算で再現することは、宇宙物理学の 40 年余の課題であった。1960 年代半ばに、コアに形成される原始中性子星が爆縮をはね返して外向き衝撃波を作り、星の外層を吹き飛ばすという描像が提示されたが、数値計算の精度が上がると、衝撃波は落下する物質に負け、途中で止まってしまうと判明した。1980 年代、高温コアで発生したニュートリノ対が周辺部を加熱し、衝撃波を復活させると提唱されたが、これも理論の精度を上げると、衝撃波の失速を止められないとわかった。すなわち計算機の中では依然として、重力崩壊型の超新星は「爆発しない」。申請者の学位論文は、この理論的な問題に活路を拓こうとする試みである。

第 1 章と第 2 章では、こうした背景が解説され、この問題に対処する 3 つの方策が提示される。第 1 は、従来の研究が球対称を仮定した 1 次元の計算だったのに対し、緯度座標も含め 2 次元の計算を行うもので、対流や非一様性が表現できるようになる。第 2 は、2 次元化を利用して星の微分回転を取り込み、その効果を見ること、同じく第 3 は、星のもつ磁場を考えその効果を検討することである。第 2 と第 3 の試みは、多くの大質量星が速く自転し、超新星残骸も軸対称な形をもつものが多く、また中性子星は超強磁場をもち高速で自転することから、観測的に正当化される。

第 3 章では、既存の磁気流体計算の数値コードを出発点に、申請者が独自の改良を行って得られた、数値計算の手法が説明される。ニュートリノは電子ニュートリノのみを扱い、その輸送は漏出近似だが、高密度になる星のコアの状態方程式には、数値コード化されたものの中では完成度の高い、相対論的平均場近似の結果を用いる。計算手法を検証するため予備計算が行われ、たとえば 1 次元で計算すると、衝撃波は確かに中心から 150 km 付近で失速してしまうことが確認された。

第 4 章は結果の前半部分であり、自転角速度、微分回転の強さ、磁場強度などを変えた一連の条件の下で、コアの重力崩壊が数値計算された。その結果、星を爆発させることには成功しなかったものの、自転が強いと、超新星は自転軸方向により爆発し

やすくなることが確かめられた。これは遠心力により星のコアが扁平になることで、自転軸方向ではニュートリノが抜けやすくなり、ニュートリノ加熱がより強く働く結果である。2次元にした結果、自転軸方向が対流不安定であることも確かめ、それが加熱を助けることも予想した。

磁場の効果は概して弱く、 $10^{15}\text{G}$  という超強磁場を考えても、トロイダル成分が卓越する場合、回転の影響の方がずっと大きいことが判明した。ただし磁場のポロイダル成分がきわめて強い場合、電子ニュートリノが片方のヘリシティしか持たないため、パリティ対称性の破れにより、北極方向より南極方向でニュートリノ放射が強くなり、中性子星は北極方向へ蹴り出されることが示された。これは、多くのパルサーが  $100\text{ km/s}$  を越す大きな固有速度をもつという観測事実を説明をできる可能性をもつ。

申請者は第5章では、重力崩壊に伴って放射されるはずの重力波の波形が、回転や磁場でどう影響されるか詳細に計算した。その結果、重力波の最初のピークは衝撃波のコアでの跳ね返りで決まるため影響をあまり受けないこと、第2ピーク以降には回転に伴うニュートリノ圧の非等方性の効果が現れること、よって重力崩壊型の超新星から重力波が検出されれば、その波形から回転の情報が引き出せることが示された。

第6章では、全体の結果がまとめられるとともに、数値計算に用いた手法、仮定、近似などが吟味され、第7章で結論が述べられている。

以上のように申請者は、世界で初めて回転と磁場の両方の効果を取り込んで重力崩壊型の超新星爆発を数値計算することにより、超新星爆発と高密度天体に関する物理学を大きく進展させることに成功した。よって本研究は博士（理学）の学位を授与するに値することを、審査員の全員一致により確認した。本研究の一部は共同研究であるが、その中で申請者は疑いなく中心的な役割を果たしており、共同研究者からの同意承諾書も完備している。