

論文審査の結果の要旨

氏名 原田 了

本論文は5章からなり、1章では重力崩壊型超新星の発生過程において、爆発機構の理解がまだ不十分であることと、本論文の目的である、物理過程をできる限り忠実に再現する数値計算による爆発機構の解明の重要性が述べられる。2章では、これまでの超新星爆発機構の理解のための様々な物理過程の定式化と、それを数値計算するための仮定や方法論が比較・検討される。3章では3次元の数値シミュレーションとして、ニュートリノ輻射輸送過程をボルツマン方程式に基づき導入し、ニュートリノ加熱過程を評価する試みが行われる。4章では、近年提唱された音波加熱機構について、1次元、2次元の数値シミュレーションにより、爆発を発生させるための必要条件を調べ、5章では結論が述べられる。

重力崩壊型超新星とは、およそ8太陽質量以上の大質量星の終末期に核融合で生じた核が Chandrasekhar 限界である 1.4 太陽質量を越えた際に、電子の縮退圧が重力より小さくなることで崩壊し、中心部では中性子星が生成され、重力エネルギーが開放されることで爆発が生じたものと単純には考えられている。しかし、その物理過程は、未だ定量的には明らかになつたとは言えない。爆発過程は非平衡状態で進行するため、数値計算が必須となっているが、極限的な密度をもつ核における状態方程式、核反応により生じたニュートリノと物質の相互作用によるエネルギー輸送など、未だ仮定も計算精度も不十分である。そのため、現状で合理的と考えられる仮定を用いた計算によっても、観測されている爆発現象を数値計算で再現できていない。

本論文では、この爆発機構を明らかにすることを目的として、様々な検討を行なっている。まず過去の数値研究の仮定や方法論の比較を行なっている。中心部での重力崩壊開始後、電子捕獲反応により大量のニュートリノが生成される。原始中性子星の密度が原子核程度になると、核力により反跳し外向きの衝撃波を生じるが、数 10ms 秒で停滞する。その衝撃波がなんらかのエネルギー源により復活し、最終的に観測されているような 10^{51} erg 程度エネルギーをもつ爆発に達すると期待されているが、そのエネルギー源が明らかではない。ニュートリノによる加熱機構などが候補と考えられているが、1次元シミュレーションでは爆発が生じず、非対称性による乱流不安定性などを取り込むことが必須であるとされている。

まず、最新の核物質の状態方程式、ニュートリノの輻射輸送コードを適用した大規模な数値計算を行なっている。ニュートリノは反応チャンネルも多く、計算資源が必要であるため、近似計算が必須であったが、申請者の共同研究者らによって6次元ボルツマン方程式をとりいれたコードが開発された。しかし、その計算でも爆発現象の再現はできなかった。本論文ではこのコードを利用し、さらに原始中性子星に回転を与え、京コンピュータによる数ヶ月間の計算を行なった。結果としては、主系列星の回転から想定される最大程

度の回転を与えたにも関わらず、200ms までの計算では回転のない状態と衝撃波の速度の違いは小さく、爆発は再現されなかった。また、本計算を用いて、ニュートリノの運動量空間での分布を調べ、近似計算でよく使われる M1-closure 法での角度モーメントの推定には 20%程度の誤差が生じうることを明らかにした。

次に、近年提唱された、原始中性子星の振動によって励起された音波による加熱機構について検討をおこなった。音波を生じる機構は未だ明らかではないため、ここでは 1 次元および 2 次元球対称計算において、定常降着状態に擾乱としての音波を与えた。ニュートリノ光度、質量降着率、擾乱振幅をパラメータとして爆発を起こすための条件を調べ、ある閾値となる音響エネルギー以上では超新星爆発へと導かれるような Critical surface があることを明らかにした。

本論文により、重力崩壊型超新星爆発を再現することには未だ成功しているわけではない。しかし、ニュートリノ輸送過程について現状でもっとも定量的かつ詳細な取り扱いを行い、ニュートリノ加熱過程の限界を示したこと、また音波加熱過程で爆発を起こすために必要な初期音波ゆらぎのエネルギーを制限したことの意義は大きい。

なお、本論文は共同研究であるが、論文提出者が主体となって計算・解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。