

Nuclear Matter Properties during Supernova Explosion

(超新星爆発中における核物質の性質)

学位論文内容の要旨

本研究は超新星爆発に対して核物質の性質が果たす役割を最新の核物理の進展を取り入れて分析したものである。爆発には様々なタイプがあるが、本研究の興味はII型超新星に集中している。この型は太陽の10数倍以上の質量を持つ星が自己重力に潰されて爆発を起す、重力崩壊型の爆発である。II型超新星の記述は長い間議論されてきた問題であり、爆発の記述は一進一退を繰り返してきた。1980年代から1990年代にかけては1次元流体計算が主流であり、その基本的な物理入力である状態方程式についても爆発に有利な形などが議論されていた。しかし核物理の観点から取り組まれた状態方程式の中で現在まで利用されているものは数が少なく、Lattimer&SwestyやShenらのものに限られる。一方で1990年代後半からは ν 輸送の取り入れ方が爆発の鍵となるとして ν による再加熱の影響が熱心に議論された。ところが可能な限り正しく ν 輸送を記述すると、爆発しにくくなるというジレンマに陥ってしまった。そこで現在も「失われた鍵」探しが続いており、回転や対流、非球対称爆発、磁気流体によるジェットという多次元的な流体の dynamics が精力的に調べられている。このようにII型超新星についての分野の意識は単純化された描像から離れて爆発の記述に成功するために考えられうる種々の効果を取り入れる方向へと向っている。しかしながら1日あたりほぼ1回起こっている超新星爆発という普遍的な現象の記述には基本的な物理入力に「失われた鍵」がある可能性は十分にある。

超新星爆発における鉄の殻の密度が低いと原子核と核子ガスの共存状態が期待される。そこで現れる原子核の種類は電子捕獲に関係し、超新星爆発の機動力となる neutrino の発生量や星の Fermi 縮退圧を与える。また密度が上ると核子他に hyperon や π 、 μ などの粒子が出現する。これらの粒子は零温度では数倍の標準核物質密度で現れる。hyperon の出現は状態方程式の硬さを変え、爆発の起り易さを本質的に左右すると期待される。ところが超低温かつ高密度の中性子星での核物質に比べ、有限温度の動的な系である超新星爆発での核物質の研究は例が少ない。本研究の他に例を挙げると、G 行列を用いた微視的な計算で状態方程式を研究するグループ(西崎、山本、高塚)や20年以上前から核物質の状態方程式を爆発計算に応用しているグループ(Lattimerら)がある。ただ前者は爆発計算への応用がなされていない。また後者の状態方程式は数値計算で広く使われているが、超新星爆発という相対論的な系を記述しているにも拘らず非相対論的な枠組であり、また状態方程式が滑らかでない、strangeness 核物理の情報が欠けているなど問題も多い。つまり超新星爆発の数値計算に利用可能な、相対論的かつ hyperon などを考慮した状態方程式が存在しないのである。本研究の目的は近年の重イオン衝突実験で存在が確定しつつある低密度核物質の相転移の役割を明かにした上で最新の核物理の実験データを反映した超新星爆発計算のための状態方程式テーブルを構築し、その超新星爆発に対する効果について議論することである。

このために我々はまず超新星爆発での低密度核物質の相転移の可能性とその役割について研究した。ここでは相対論的平均場理論と統計模型を用いたが、これら二つの模型で核物質の沸点は異なるものの、Shen らの状態方程式を使って流体計算の結果と比較すると、超新星爆発中の核物質が液相と気相の共存状態を経験することがわかった。さらに統計模型において共存状態の原子核の組成を調べたところ、核物質の沸点近傍では様々な質量数をもつ原子核が同じような出現確率をもって存在すること、核物質の密度や陽子/中性子比に関係なく、この傾向は温度だけに依存していることもわかった。以上の沸点近傍の核物質の質量数分布の効果は状態方程式のような

積分量には大きく影響しないが、電子捕獲率のような原子核の種類毎に値が違ふ物理量を見積る際には無視できないほど大きな変化をもたらす。したがって低密度核物質の相転移に伴う性質は超新星爆発の数値計算では取り入れられるべきであろう。

次に我々は低密度から高密度までの核物理情報を網羅した超新星爆発向けの汎用性の高い状態方程式テーブルの構築に取り組んだ。テーブルの構築において、我々は Shen らの状態方程式テーブルを基盤とした。彼等は相対論的平均場理論と Thomas-Fermi 近似を組み合わせる原子核が現れる低密度から一様物質となる高密度までの状態方程式を構築した。この状態方程式は超新星爆発から中性子星までを記述できる幅広い陽子／中性子比、温度、密度をカバーしたテーブルとして公開されてきた実績がある。我々は Shen らの使った有効相互作用を $SU(3)$ に拡張したものを用いて、最新の実験データによる hyperon-nucleon 相互作用の強さの不定性の範囲内で変化させ、Shen らのテーブルに hyperon の寄与を取り入れた。低温・低密度領域で現れる原子核分布効果は Shen らのテーブルと滑らかに組み合わせることにより取り入れている。また状態方程式に π 粒子や μ 粒子も取入れ、爆発エネルギーへの寄与を定量的に調査した。その結果、有限温度の効果で零温度よりも低密度で hyperon が出現し、hyperon や π は高密度で状態方程式を柔らかくする方向へ、 μ は低密度で圧力を下げる方向へと変化させることがわかった。さらに我々の状態方程式を 1 次元の球対称爆発の断熱計算に応用し、状態方程式の爆発エネルギーへの寄与を見積った。その結果、これまで超新星爆発の物理で無視されてきた高密度核物質の寄与が太陽の 1.8 倍の質量を持つ星の場合には 1 % 程度にもものぼることが明かになった。最もシンプルな流体計算のモデルで 1 % の寄与が得られたことは、数 % のエネルギーの加減が爆発の成否を決める数値計算の現状において期待を大きく上回る成果がある。したがって我々の結果は超新星爆発の数値計算では hyperon などの寄与を取り入れる必要性を強く示唆するものである。

以上のように我々は核物理の持つ様々な側面を超新星爆発という動的な過程において初めて定量的かつ系統的に調査した。本研究の結論は以下の二つである。第一に超新星爆発中の低密度核物質は沸点以下で統計的な性質が強く現れるため、従来の平均場的な描像だけでは状態方程式や電子捕獲を十分に記述することはできないと帰結される。第二に統計性の問題を除いて、低密度から高密度までの超新星核物質の性質を網羅した相対論的な状態方程式テーブルが構築できたことにより、超新星爆発の核物理はひと通り抑えられるようになったと結論される。この成果は hyperon や μ を考慮した ν 輸送など従来の議論で考慮されてこなかった新たな爆発の機動力源の探究や hyperon 等の寄与が不可欠な大きな質量を持つ星の爆発を議論する上で大きな進展といえる。しかしながら超新星爆発での核物理をより詳細に記述するためには、相対論的平均場と統計模型の両方の性質を併せ持つ新しい枠組の構築が望まれており、今後の課題としたい。

学位論文審査の要旨

主 査 助 教 授 大 西 明
副 査 教 授 加 藤 幾 芳
副 査 教 授 藤 本 正 行
副 査 教 授 石 川 健 三
副 査 教 授 岡 部 成 玄 (情報基盤センター)

学 位 論 文 題 名

Nuclear Matter Properties during Supernova Explosion

(超新星爆発中における核物質の性質)

重力崩壊型 (II 型) の超新星爆発は多くの元素を宇宙空間に放出し、宇宙の物質循環に重要な役割を果たす現象である。また長い間その記述が出来ていない challenging な理論研究対象でもある。これまでに ν 輸送等の物理入力を正しく取り入れると爆発の記述が困難になることが知られており、現在は多次元効果等の複雑な流体動力学的の影響が検討されている。一方で、頻繁に起こり続けている超新星爆発には初期条件によらない必然的な爆発機構が存在すると期待され、これまで十分正しいと考えられてきた基本的な物理入力が不十分である可能性が否定できない。

著者は本論文において、ハイペロンやパイオン等の粒子自由度を基本的な物理入力の一つである状態方程式 (EOS) に取り入れ、断熱的な超新星爆発エネルギーへの影響を定量的に調べた。ハイペロンは標準核密度 (ρ_0) の 5–7 倍もの超高密度に達する中性子星では現れるが、到達密度が $1.6\rho_0$ 程度の超新星爆発では影響が無視できると思われていた。ところが、近年のハイパー核物理の成果を相対論的な EOS に取り入れた結果、有限温度のため比較的低密度でもハイペロン効果が現れ、爆発エネルギーを (0.2–1)% 程度増加させることが本論文で示された。この増加率は数 % の変化で爆発の記述の成否が変わると考えられている超新星爆発において有意な増加である。さらに ν 粒子圧力の部分的寄与やフラグメント生成等による低密度領域での EOS の変化が爆発エネルギーを大幅に増加させ得ることも示唆している。

これを要するに、著者は EOS の再検討により超新星爆発の理論的記述を改善できることを示したものであり、分野の研究に対して貢献するところ大なるものである。

よって著者は、北海道大学博士 (理学) の学位を授与される資格があるものと認める。