

大型シミュレーション研究

中性子星およびブラックホール形成時のニュートリノ放出に関する数値シミュレーション 実施報告書

代表者： 鈴木 英之 (すずき ひでゆき) 東京理科大学理工学部 教授

メンバー： 住吉 光介 (すみよし こうすけ) 沼津工業高等専門学校教養科 准教授

山田 章一 (やまだ しょういち) 早稲田大学理工学部 教授

中里らとの共同研究として、大質量星のコアが重力崩壊して、超新星爆発を起こさずにブラックホールになるケースに関する一般相対論的ニュートリノ輻射流体計算の結果を用いて、放出されるニュートリノの観測から高密度物質の状態方程式の識別が可能か議論を行った。また、菊地と共同して長時間の球対称数値シミュレーションが行えるようフェルミディラック分布近似のニュートリノ輸送計算コードの開発を行った。久野との共同研究ではニュートリノ-ニュートリノ相互作用を考慮して、超新星コア近傍でのニュートリノ振動を詳しく調べた。

●一般相対論的重力崩壊シミュレーション

これまで、重力崩壊型超新星爆発に関する研究の多くは爆発機構に焦点が当てられてきたが、近年住吉らによって爆発せずブラックホールが形成される場合の超新星コアの進化やその際のニュートリノ放出に関する研究が行われている。今回、我々は中里を中心として複数の状態方程式を用いた一般相対論的ニュートリノ輻射流体計算の結果を統計的に解析することで、将来のニュートリノ観測によるハドロン物質の状態方程式の識別可能性について研究を行った。その結果、ニュートリノバーストの継続時間が状態方程式に強く依存することに加え、同じような継続時間になる柔かい Lattimer-Swesty の状態方程式とハイペロン入り Shen 状態方程式の場合でも、ニュートリノ光度の時間変化が異なるため、検出器内のニュートリノイベントの時間分布から状態方程式の識別が可能であることを明らかにした。このことは、ブラックホール形成イベントで放出されるニュートリノを観測することは、核密度を越えるような高密度状態の性質に関する貴重なプローブであることを示している。

また一方、超新星爆発を起こすケースについて、形成される原始中性子星近傍の r 過程元素合成、外層爆発時の爆発的元素合成、衝撃波伝播に影響されるニュートリノ振動の計算などを行うためには、重力崩壊開始から外層の衝撃波伝播に至る分から時間におよぶ長時間の数値シミュレーションが必要である。ニュートリノに関するボルツマン方程式を解く手法は高精度だが計算時間がかかり 1,2 秒の計算しかできないので、今回菊地と鈴木は、山田の流体計算コードを元にフェルミ・ディラック分布近似と流束制限拡散近似を用いた陰解法一般相対論的ニュートリノ輻射流体計算コードを開発した。数百秒にわたってコアや外層の進化を計算できることを確認したので、元素合成やニュートリノ振動の計算との連携を開始したところである。

●ニュートリノ-ニュートリノ相互作用を考慮したニュートリノ振動と超新星ニュートリノのスペクトル変化

星の重力崩壊に伴って大量のニュートリノが放出されるが、その理解にはコア内部のニュートリノ輸送に加えて、ニュートリノ振動の効果も考慮しなければならない。我々

は久野との共同研究として、超新星コア近傍でのニュートリノ同士の相互作用を含んだニュートリノ振動を数値計算して、エネルギースペクトルの変化を系統的に調べた。具体的には、ニュートリノ球から放出される二世代のニュートリノのエネルギースペクトルを与え、フレーバー偏光ベクトルの時間発展を追うことで、ニュートリノエネルギースペクトルの変化を求めた。その結果、エネルギースペクトルにはあるエネルギーを境に顕著な spectral split 現象が見られるという先行研究の結果を確認した。さらにこれまで調べられていなかったケースを系統的に調べて以下のような結果を得た。まず、自己相互作用の影響は非線形効果なので、ニュートリノルミノシティが小さくなると効かなくなるはずである。ルミノシティを変えた計算結果から 10^{48} erg/sec という小さいルミノシティでも影響が見られることがあることがわかった。一方、これまで順質量階層のケースでは、spectral split がおきないと考えられてきたが、混合角が 0.1 のように大きな値であれば、ニュートリノのスペクトルに 10MeV あたりで spectral split が現れることを見出した。混合角の大きさによってスペクトルの形が変わるので、観測による混合角の決定に役立つ可能性があり、非常に興味深い結果である。その他、ニュートリノ球におけるエネルギースペクトルの形状およびニュートリノの種類ごとのルミノシティ比の影響を調べた。multi split が起こるケースもあり、今後はこれらの解釈を進める必要がある。

論文

- Kenichiro Nakazato, Kohsuke Sumiyoshi, Hideyuki Suzuki and Shoichi Yamada, "Exploring hadron physics in black hole formations: A new promising target of neutrino astronomy", Phys. Rev. D81 (2010) 083009

口頭発表

- 久野昌哉、鈴木 英之, 超新星ニュートリノの集団振動とエネルギースペクトル物理学会, 2010年3月22日, 岡山大学