

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 助教授
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 助教授
山田 章一 (やまだ しょういち) 早稲田大学理工学部 教授
吉原 一久 (よしはら かずひさ) 東京理科大学大学院理工学研究科 博士課程
内藤 優介 (ないとう ゆうすけ) 東京理科大学大学院理工学研究科 修士課程
細田 武史 (ほそだ たけし) 東京理科大学大学院理工学研究科 修士課程

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ってしまふケースについて、住吉らとの共同研究によってニュートリノバーストが高密度物質の状態方程式のプロブとなりうることを明らかにした。また、自己重力系の2次元軸対称流体計算コードを用いて、ブラックホールを覆う星の外層のダイナミクスと、HR図上での軌跡を求め、その進化を解析した。

● ブラックホール形成時のニュートリノバーストと状態方程式

住吉を中心として、早稲田大学の山田の Boltzmann solver によるニュートリノ輸送コードを用いた超新星コアの重力崩壊のシミュレーションを進めてきた。これは、球対称の仮定の下での一般相対論的ニュートリノ輸送の方程式を直接解くもので、拡散近似などの近似をしない精度の高い計算法である。 $40M_{\odot}$ の星のコアの重力崩壊からブラックホール形成に至る数値シミュレーションも行い、コアバウンス、衝撃波の停滞の後、原始中性子星が再び重力崩壊を起こすまでの時間が、高密度物質の状態方程式によって大きく異なり、ニュートリノによる観測で区別できることなどを明らかにした。

● 2次元自己重力系流体計算コードの開発とブラックホール降着流への適用

細田を中心に CIP 法に基づく2次元軸対称の流体計算コードを作成し、failed supernova における星の外層のダイナミクスの研究に応用した。その際、流体計算の単調性や保存性を確保する改良とともに、流体の自己重力を計算するために重力ポアソン方程式を解くコード (多重極展開による境界条件設定とコレスキー分解による連立方程式の求解) も作成した。

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、爆発せずブラックホールが形成されるケースについてはあまり着目されてこなかったもので、本研究では、中心にブラックホールが形成された大質量星の外層が収縮していく段階を数値シミュレーションを用いて詳しく調べた。その結果、 $4000R_{\odot}$ の半径を持つポリトロップ型の外層モデルでは、収縮開始まで2年以上かかることを示した。これは、音波の伝播時間に対応する。さらに、ガスのダイナミクスに加えて、電子散乱を考慮して光球面を求め、その半径と温度の時間発展から HR 図上での経路も求めた。収縮時は、温度がほぼ一定のまま光度が下がっていくことがわかったが、これは不透明度を決める電離度が温度に強く依存するので、光球面が電離面とほぼ一致するためであることも明らかにした。

今後は、星の進化計算に基づく外層モデル、自転と角運動量輸送の影響、核燃焼やエネルギー輸送なども考慮していかなければならないが、新しい天体現象に着目して概要を明らかにすることができた。

● 超新星背景ニュートリノとダークエネルギーモデル

近年の宇宙論的観測により、現在の宇宙のエネルギーの内訳は、既知の物質がわずかに数パーセントしかなく、残りの約3割がダークマターと呼ばれる未知の物質、約7割がダークエネルギーと呼ばれる未知のエネルギー形態であることがわかってきた。ダークエネルギーは、通常の万有引力とは逆に斥力的な重力を及ぼし宇宙を加速膨張させる効果を持つものである。一方、重い星の一生の最期に起こる重力崩壊型超新星爆発では大量のニュートリノが放出される。宇宙誕生以後、多くの星が形成され爆発してきたので、さまざまな時期に放出された超新星ニュートリノが蓄積され現在の宇宙を満たしているはずである。これを超新星背景ニュートリノと呼び、その観測が試みられている。現時点ではまだ上限値を決定することしかできていないが、観測機器の改良や観測時間の増加により遠くない将来に観測されると考えられている。小野との共同研究として、ダークエネルギーに関して提唱されているさまざまなモデルについて、超新星背景ニュートリノのフラックスやエネルギースペクトルを計算し、超新星背景ニュートリノがダークエネルギーのモデルからどのような影響を受けるのかを調べた。また、第一世代の天体として議論されている Population III の星から放出されるニュートリノについても同様の議論を行った。

現在の超新星背景ニュートリノのエネルギースペクトルは、宇宙の歴史における各時期に起こった重力崩壊型超新星爆発の頻度、一回の超新星爆発で放出されるニュートリノの総量とエネルギースペクトル、その後の宇宙膨張に伴うニュートリノエネルギーの赤方偏移とニュートリノ数密度の減少を組み合わせることで求められる。超新星発生率について、これまでの多くの研究では遠方の銀河の光度観測などから星生成率を求め、大質量星の短寿命近似で超新星発生率に換算してきた。この超新星発生率を用いた超新星背景ニュートリノの計算では観測された電磁波フラックスに比例するニュートリノフラックスが得られ、宇宙モデルの不定性は入ってこないが、逆にダークエネルギーモデルの依存性を見ることができない。そのため、本研究では超新星発生率に関する簡単なモデルを考え、ダークエネルギーモデルの依存性を詳しく調べた。また、Hallらによって提案された超新星の直接計数観測によって超新星発生率を評価する方法も採用した。この方法は、将来超新星背景ニュートリノの観測から宇宙モデルを議論する際に有用な手法である。ダークエネルギーのモデルとしては、代表的なものとして Λ CDM モデル、GCG モデル、Holographic DE モデルをとりあげ、それぞれのケースについて宇宙膨張則を求め、それを反映した超新星背景ニュートリノのエネルギースペクトルを計算した。

その結果、直接計数観測に基づく超新星発生率を用いた場合、GCG モデルにおけるニュートリノフラックスが、他のダークエネルギーモデルの場合よりも 20% 程度大きくなったが、これは各ダークエネルギーモデルに対する宇宙膨張則の違いを用いて説明できる。GCG モデルは、宇宙進化に伴いダークマターがダークエネルギーに変化していくモデルである。そのため、過去において引力が強く宇宙膨張の減速が激しかったことになり、同じ赤方偏移をもつ超新星までの光度距離が小さく地球に届くニュートリノフラックスが大きくなるのである。実際の観測に関しては、現行の観測機器でダークエネルギー

の判別は困難であるが、検討されている次世代大型観測施設を使えば、GCGモデルから期待される観測イベント数は、統計誤差を考慮しても他の Λ CDMモデルやHolographic DEモデルと区別が可能であることを示した。その他、複数の超新星発生率のモデルを用いて、ニュートリノスペクトルのダークエネルギーモデル依存性の細かな分析や、それぞれのダークエネルギーモデルに含まれるパラメータ依存性についても議論を行った。超新星背景ニュートリノのフラックスは、ダークエネルギーモデルだけでなく超新星発生率や個々の超新星から放出されるニュートリノフラックスにも依存しているので、超新星背景ニュートリノの観測のみでダークエネルギーモデルが決定できるわけではないが、他の宇宙論的観測データと相補的な役割を果たすものといえる。

口頭発表

- 鈴木 英之, 重力崩壊型超新星におけるニュートリノ放出, 研究会「超新星を舞台とする高エネルギー現象」, 2007年2月1日, 東京大学
- 鈴木英之, 超新星コアにおけるニュートリノ輸送とニュートリノ反応, RCNP研究会「超新星爆発とニュートリノ・原子核反応」, 2007年3月3日, 大阪大学
- 鈴木英之, 原始中性子星の冷却と状態方程式, Numazu Workshop on Supernova EOS, 2007年3月16日, 沼津工業高等専門学校
- 鈴木英之, 重力崩壊型超新星の物理, 物理学会, 2007年3月27日, 首都大学東京

発表論文

- K. Sumiyoshi, S. Yamada, H. Suzuki, and S. Chiba,
“Neutrino Signals from the Formation of a Black Hole: A Probe of the Equation of State of Dense Matter”,
Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 091101
- H. Ono and H. Suzuki,
“Dark energy Models and Supernova Relic Neutrinos”,
Mod. Phys. Lett. A 22 (2007) 867