

大型シミュレーション研究「重力崩壊型超新星爆発と超新星ニュートリノ、重元素合成」 実施報告書

●研究組織

代表者： 鈴木 英之 東京理科大学工学部 助教授
メンバー： 住吉 光介 沼津工業高等専門学校教養科 助教授
山田 章一 早稲田大学工学部 教授

●研究成果の総説

我々は、2002年度までは研究課題「数値天体物理学」として、2003年度からは「重力崩壊型超新星爆発と超新星ニュートリノ、重元素合成」という課題名で、原始中性子星からのニュートリノ風における重元素合成、新しい状態方程式を使ったコアの断熱崩壊と prompt explosion、prompt explosion における r 過程元素合成、prompt explosion モデルにおける状態方程式の影響、原始中性子星からのニュートリノ、超新星ニュートリノとニュートリノ振動、衝撃波の伝播とニュートリノ振動、Boltzmann solver を使ったコアの重力崩壊からのシミュレーション、超新星背景ニュートリノなどに関する研究を行なった。

(1) 原始中性子星からのニュートリノ風における重元素合成

重力崩壊型超新星爆発の中心で形成される原始中性子星からは強いニュートリノフラックスが放出され、表面のごく一部がニュートリノ加熱によりニュートリノ風として吹きとんでしまう。我々はこのニュートリノ風を、一般相対論的なハイドロダイナミクスコードで数値計算し、得られた密度・温度の時間発展をもとに、ニュートリノ風中で起こる元素合成も計算した。ニュートリノ風における r 過程元素合成は、外側の境界条件に敏感であることがわかっていたが、寺沢らとの共同研究により、境界条件を変更することで、通常の質量 ($1.4M_{\odot}$) の中性子星でもニュートリノ風における r 過程元素合成が可能であることを示した。

(2) 新しい状態方程式 (Shen et al.) を使ったコアの断熱崩壊と prompt explosion

我々は、重い星のコアが重力崩壊を開始してから、内部コアの跳ね返り・超新星爆発・中性子星の誕生までの過程を一貫してシミュレーションするための計算コードを開発してきた。一方、このような計算において必要不可欠の高温高密度物質の状態方程式を、微視的な理論により様々な極限状況下の密度・温度・組成をカバーする形で与えることが長い間懸案であった。我々は Shen らと議論して、中性子過剰な不安定原子核を含む実験データと相対論的核子多体理論を使った状態方程式データテーブルを作成してもらった。これは、温度 $T = 0, 0.1 \sim 100\text{MeV}$ (きざみ $\Delta \log T = 0.1$)、電子割合 $Y_e = 0, 0.01 \sim 0.56$ ($\Delta \log Y_e = 0.025$)、密度 $\rho_B = 10^{5.1} \sim 10^{15.4}\text{g/cm}^3$ ($\Delta \log \rho_B = 0.1$) の範囲をカバーし、各点における $\rho_B, n_B, Y_e, F, U, P, S, A, Z, M^*, X_n, X_p, X_{\alpha}, X_A, \mu_n, \mu_p$ を数値テーブルにしたものである。

この新しい状態方程式を使った超新星爆発のシミュレーションを行なう第一ステップとして、我々はまず、野本グループと Woosley グループ双方の星の進化モデルによる星のコアを初期条件として、一般相対論的球対称断熱重力崩壊のシミュレーションを実行した。その結果新しい状態方程式では、コアの初期元素分布に関して、従来の Lattimer

& Swesty の状態方程式に比べ中性子数 > 40 の原子核は増え、自由陽子は減少することがわかった。これは電子捕獲率の減少につながり、prompt explosion が起こりやすくなることを意味する。実際に、電子割合を固定しニュートリノの放出を無視した断熱崩壊の計算を、様々な質量のコアについて行なった結果、軽いコア (太陽質量の約 1.4 倍以下) では (断熱的) prompt explosion が起こり得るが、重いコアでは難しいことが確認できた。例えば、Woosley & Weaver'95 の $15M_{\odot}$ の親星のコア ($1.32M_{\odot}$) の場合、(断熱的) prompt explosion が起こったが、 $20M_{\odot}$ の親星のコア ($1.74M_{\odot}$) の場合、prompt explosion はおきなかった。

(3) prompt explosion における r 過程元素合成

我々は、(1) で調べたニュートリノ風中における r 過程元素合成の他に (2) の prompt explosion でも r 過程元素合成が可能かどうか、調べてみた。この問題は以前 Hillebrandt らによって調べられたが、その際は電子割合分布を人工的に仮定し、その結果 r 過程元素が大量に作られ過ぎ、観測に合わないと言われていた。我々は、断熱的 prompt explosion で吹き飛ばされる各層について、密度変化と温度変化の数値計算に加え、衝撃波通過後の自由陽子による電子捕獲反応を別途計算することで、各層の電子割合を数値的に求めた。寺沢らとの共同研究として、これらのデータを入力して、各層における元素合成反応を追い、prompt explosion でどのような元素がどれだけの量放出されるのかを求めた。その結果、質量数 200 程度までの r 過程元素が観測に合う相対比で放出されることがわかった。さらに、一回の爆発で放出される総量も計算できたので、超新星爆発の頻度やそのうち prompt explosion を起こす親星の割合などを考慮して、r 過程元素の総量を評価してみたところ、観測されているデータと矛盾がないことがわかった。つまり、もしも prompt explosion が起こるのであれば、r 過程元素の源であり得るのである。比較的軽い r 過程元素は、delayed explosion の際のニュートリノ風で合成され、重い r 過程元素が prompt explosion で合成されると言う新しい考え方を提唱することができた。

(4) prompt explosion モデルにおける状態方程式の影響

有限温度高密度物質に関する異なる状態方程式を使い、重力崩壊型超新星爆発をおこす重い星のコアの一般相対論的球対称断熱重力崩壊のシミュレーションを行なった。従来の Lattimer and Swesty の状態方程式を使用した場合と、Shen らによる新しい状態方程式の場合の比較を行なった。Shen らの状態方程式は大きめの対称エネルギーを反映して、初期段階における自由陽子の存在量が少なく、重力崩壊段階で中性子過剰な質量数の大きい原子核が存在する事がわかった。これらの組成の違いは、電子捕獲率にも影響し、爆発の成否に影響するかも知れない。またともに軽いコアでしか (断熱的) prompt explosion は起こり得ないことなどが確認できた。

今回はコア内部での対流の発生を無視したが、delayed explosion モデルでは、対流によってニュートリノ光度が高くなる事が必要との議論がある。今回我々は、対流の発生条件に関係する状態量 $\frac{\partial \rho}{\partial Y_L}$ の符号が、Shen らの状態方程式では広い範囲で正となることを見出した。状態方程式のこの性質は、delayed explosion モデルの多次元シミュレーションにおける対流領域に影響を及ぼすので、注意が必要である。

(5) 原始中性子星からのニュートリノ

重力崩壊型超新星爆発の際、形成された熱い原始中性子星がニュートリノを放出して

冷えた中性子星に準静的に進化していく段階の数値シミュレーションを、Multigroup Flux Limited Diffusion scheme のニュートリノ輸送コードを用いて行ない、放出される超新星ニュートリノのエネルギースペクトルを求めた。その際、従来からの核子制動輻射過程の近似の整合性を高め、以前から使ってきた Wolff の状態方程式に加え、新しく開発された Shen らによる相対論的平均場近似による状態方程式と、標準的に使われてきた Lattimer-Swesty の状態方程式も使用した。特に、Lattimer-Swesty (LS) の状態方程式は、対応している温度や電子割合 (Y_e) の範囲が狭く、原始中性子星から中性子星への進化を計算するには、不都合があることが判明したので、 $Y_e = 0$ に拡張して使用し、状態方程式の依存性を詳しく調べた。その際、状態方程式のカバーする温度、電子割合の範囲が充分広がったことから、50 秒間という長い進化を計算することが可能となった。そして結果として、以下のようなことがわかった。まず、原始中性子星の初期モデルのエントロピー分布と電子割合分布を固定し、状態方程式の固さの目安となる核物質の非圧縮率 K の値が 180MeV(LS)、220MeV(LS)、281MeV(Shen) の 3 つの状態方程式を使った結果の比較では、柔らかい (K が小さい) ほど原始中性子星内部の密度や温度が高くなった。逆に、50 秒後の電子割合 (Y_e) の分布をみると、密度の低い Shen のモデルではほぼ脱レプトン化が終了しているのに対し、密度の高い LS モデルでは、まだ脱レプトン化が進行中であった。LS180 と LS220 の比較では、密度の低い LS220 の方がニュートリノが流れ出易く脱レプトン化が速く進んでいる。同様に $t = 50\text{sec}$ における温度分布をみても、LS モデルは冷却時間が長く、中心温度が充分小さくなっていないことがわかる。中心密度の低い Shen モデルはニュートリノの拡散時間が短く、光度の減衰時間も短い。つまり、ニュートリノ光度の減衰時間が状態方程式の固さの指標になり得る。平均エネルギーについては、初め存在した $\bar{\nu}_e$ と ν_μ の平均エネルギーの違いが、時間とともに小さくなっている。これは、冷却と中性子化により陽電子や陽子の量が減り、 $\bar{\nu}_e$ と ν_μ の反応率の差が小さくなるためである。

(6) 超新星ニュートリノとニュートリノ振動

一方、フレーバーによる平均エネルギーの違いはニュートリノ振動の観測に大きな影響を与える。我々は、Shen モデルのニュートリノスペクトルと Woosley & Weaver $15M_\odot$ の親星の密度分布、ニュートリノ振動パラメーター ($\Delta m_{21}^2 = 4.5 \cdot 10^{-5}\text{eV}^2$, $\Delta m_{31}^2 = \pm 3.2 \cdot 10^{-3}\text{eV}^2$, $\sin^2 2\theta_{12} = 0.82$, $\sin^2 2\theta_{23} = 1.0$, $\sin^2 2\theta_{13} = 8.0 \cdot 10^{-4}$) を用いて、ニュートリノ振動の影響を調べた。観測的に重要となる最初の 10 秒間の積分スペクトルの平均エネルギーに関して、振動無しの場合 8.9MeV(ν_e), 10.8MeV($\bar{\nu}_e$), 11.7MeV(ν_μ) に対して、振動 (normal mass hierarchy) ありの場合、11.7MeV(ν_e), 11.1MeV($\bar{\nu}_e$), 10.9MeV(ν_μ)、振動 (inverted mass hierarchy) ありの場合、10.8MeV(ν_e), 11.7MeV($\bar{\nu}_e$), 10.9MeV(ν_μ) となった。元々フレーバー毎の平均エネルギーの違いが大きくないので、ニュートリノ振動の影響も限定的である。この計算の対象は超新星ニュートリノの後半だけではあるが、これは超新星 1987A の観測データの解析から得られた $\langle \omega_{\bar{\nu}_e} \rangle \sim 12.6 \pm 1.6\text{MeV}$ と矛盾しない。

また、吉原との共同研究によって、超新星ニュートリノの地球における観測に対するニュートリノ振動の影響を調べた。Super-KAMIOKANDE と SNO での様々なニュートリノ検出チャンネルについて、イベントのエネルギー分布、角度分布を地球効果とともに計算した。検出器のエネルギーや角度分解能を考慮すると、地球効果によるエネルギース

ペクトルの振動パターンはかなりならされてしまう事がわかった。

(7) 衝撃波の伝播とニュートリノ振動

また、衝撃波が外層を通過する際の密度分布の変化がニュートリノ振動に与える影響について調べるため、川越との共同研究により、超新星コアの(仮想的な)断熱崩壊による爆発モデルでの外層の密度分布の時間変化を計算した。その際、山田の一般相対論的陰解法 Hydrodynamics の計算コードと、高密度領域の状態方程式 (Shen, Lattimer-Swesty) と低密度領域の状態方程式 (Timmes) を接続し、コアの爆発から外層の爆発までを一貫して計算する事ができた。この密度分布の時間変化の情報を用いて、衝撃波の伝播がニュートリノ振動に与える影響を数値的に調べ、共鳴領域の断熱性の変化から、ニュートリノのエネルギースペクトルに、低エネルギー側から順に、衝撃波の影響が現れる事を確認した。

(8) Boltzmann solver を使ったコアの重力崩壊からのシミュレーション

また住吉を中心として、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。バウンス後1秒近くまで計算できるようになったが、Shen、LS 状態方程式双方のモデルでも衝撃波は停滞してしまい、爆発には至っていない。現在はまだ考慮していない対流の効果を取り入れる必要があるかも知れない。一方、この段階における状態方程式依存性も調べ、状態方程式の硬さの影響が後期になると顕著になる事を示す事ができた。

(9) 超新星背景ニュートリノとダークエネルギーモデル

過去の重力崩壊型超新星爆発で放出されたニュートリノが、宇宙膨張による赤方偏移を受けながら蓄積したものは、超新星背景ニュートリノと呼ばれている。また、近年の宇宙論的観測により現在の宇宙はダークエネルギーが支配的であることがわかってきたが、その正体はわかっていない。小野との共同研究により、ダークエネルギーのモデルによって過去の宇宙膨張の様子が異なることが、超新星背景ニュートリノのエネルギースペクトルにどのような影響を与えるのかを調べた。 Λ CDM モデルと GCG モデルについて調べた結果、 Λ CDM モデルに比べ、GCG モデルは超新星背景ニュートリノのエネルギースペクトルに対するパラメータ依存性が大きいことがわかったが、現在の観測施設では観測によるモデルの区別は難しい。

● 平成 17 年度の実施報告

住吉を中心として非常に重い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を行った。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示した。

吉原との共同研究によって、超新星ニュートリノの地球における観測に対するニュートリノ振動の影響を調べた。Super-KAMIOKANDE と SNO での様々なニュートリノ検出チャンネルについて、イベントのエネルギー分布、角度分布を地球効果とともに計算した。その結果、Super-KAMIOKANDE における高エネルギーニュートリノイベントの角度分布によって、ニュートリノ振動パラメータを識別できる可能性を示した。

また小野との共同研究により、ダークエネルギーのモデルによって過去の宇宙膨張の様子が異なることが、超新星背景ニュートリノのエネルギースペクトルにどのような影響を与えるのかを調べた。XCDM モデルと GCG モデルについて調べた結果、XCDM モデルに比べ、GCG モデルは超新星背景ニュートリノのエネルギースペクトルに対するパラメーター依存性が大きいことがわかったが、現在の観測施設では観測によるモデルの区別は難しい。

口頭発表

- 鈴木 英之, 原始中性子星ニュートリノの数値シミュレーション, HOLCS 流体計算科学グループ研究会, 2005 年 7 月 16 日、東京理科大学

発表論文

- K. Sumiyoshi, S. Yamada, H. Suzuki, H. Shen, S. Chiba, and H. Toki, “Postbounce evolution of core-collapse supernovae: long-term effects of the equation of state”, *Astrophys. J.* 629 (2005) 922.

国際会議 proceedings

- H. Suzuki, “Neutrinos from Protoneutron Stars with various Equation of States”, in Proc. of the 59th Yamada Conference “Inflating Horizons of Particle Astrophysics and Cosmology”, ed. H. Suzuki, J. Yokoyama, Y. Suto and K. Sato, Universal Academy Press, 2006, in press.
- K. Yoshihara and H. Suzuki, “Neutrino Oscillation and Supernova Neutrino Observation”, in Proc. of the 59th Yamada Conference “Inflating Horizons of Particle Astrophysics and Cosmology”, ed. H. Suzuki, J. Yokoyama, Y. Suto and K. Sato, Universal Academy Press, 2006, in press.
- H. Ono and H. Suzuki, “Supernova Relic Neutrinos and Dark Energy Models”, in Proc. of the 59th Yamada Conference “Inflating Horizons of Particle Astrophysics and Cosmology”, ed. H. Suzuki, J. Yokoyama, Y. Suto and K. Sato, Universal Academy Press, 2006, in press.

投稿中論文

- K. Sumiyoshi, S. Yamada, H. Suzuki, and S. Chiba, “Neutrino signals from the formation of black hole: A probe of equation of state of dense matter”, submitted to *Phys. Rev. Lett.*