

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870823

研究課題名(和文)ポスト京時代に向けたニュートリノ輻射輸送法の開発

研究課題名(英文)Development of Neutrino Radiation Hydrodynamic Schemes toward the Era of  
exa-scale computing

研究代表者

滝脇 知也(Takiwaki, Tomoya)

国立天文台・理論研究部・助教

研究者番号：50507837

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではM1-Closure法という手法でニュートリノ輻射輸送を解くコードの開発に成功しました。重力崩壊型超新星に応用し、Kuroda et al. 2016として論文にまとまっています。このコードで用いられる逆行列を求める手法はよくチューニングされており、元のものの数倍の高速化にも成功しています。

もう一つの成果は超新星で用いられているコードのコード比較です。近年、あるグループで得られた結果が他のグループたちと異なるということが多く、これは緊急の課題となっていました。注意深く比較した結果、これらは数値計算の手法による違いではなく、入力物理の違いに起因していることが分かりました。

研究成果の概要(英文)：We successfully develop a new neutrino radiation hydrodynamic code for core-collapse supernovae using M1-Closure scheme. The features of the code and the obtained results are described in Kuroda et al. 2016. The matrix inversion scheme used in the code is well-tuned and we got a few times of speed up from the original one.

Another achievement in this study is the code comparison between the other groups. That was urgent issue for the community of supernova models since the results obtained in one group is different from other groups. After the careful check, we found the difference originate from the input physics they employed not the numerical schemes.

研究分野：天文・天体物理学

キーワード：輻射輸送 ニュートリノ 高精度計算

## 1. 研究開始当初の背景

太陽のおよそ10倍以上の質量を持つ星、大質量星は赤色巨星まで進化したのち、その輝きを終える。その最期の時、中心でできた鉄の核は核融合によってエネルギーを放出し、圧力を上げることができないため、自らの重力で爆縮し莫大な重力エネルギーを解放し、超新星爆発を引き起こす。具体的にはその解法されたエネルギーをニュートリノが中心から外側へ輸送し、圧力を上げることによって起こるとされている。

爆発のプロセスや正しい条件は、完全には解明されていない。というのもニュートリノ加熱のプロセスそのものが非自明である上、それに加えて爆発をさせない要因も多くあり、爆発機構の解明の難易度は非常に高いからだ。例えば重力崩壊で生じるほとんどのエネルギーはニュートリノが持ち去ってしまい、また中心の鉄は温度が高くなるとバラバラな原子核に分解され吸熱的に働くなど、爆発に不利な条件がそろっている。

これまでの研究で得た重要な示唆は、計算空間の次元の違いはシミュレーション結果に重大な影響を与えるということであった。これを信じれば、現在の4次元(空間3次元+エネルギー1次元)の方程式系で満足せず、6次元(空間3次元+運動量空間3次元)のボルツマン方程式を第一原理的に解くことが問題の最終解決には必要になる。このような計算はポスト京のエクサスケール級のスパコンをもってようやく実行できると考えられている。

近年スパコンは大規模化しており、演算性能は順調に伸びているが、メモ転送性能などが追いついておらず、スパコンの使い勝手は下がっている。メモリアクセスの効率が高く、演算の並列性などが良いような、将来のスパコンの特性に適した計算手法の開発が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的はポスト京コンピューターなどのエクサスケール時代の計算機資源におけるニュートリノ輻射輸送法を確立することである。背景にも述べたように、ニュートリノの輻射輸送スキームをアップデートすることが超新星爆発の機構の解明に本質的な役割を果たす可能性は高いものの、計算科学的な側面を考慮したコード開発が今後必要になる。

## 3. 研究の方法

M1-Closure法という手法とSn法という手法

でニュートリノ輻射輸送を解くコードの開発をする。コードの信頼性を上げるための工夫も行う。

まずSn法について説明する。物質の輸送を司るのはBoltzmann方程式と呼ばれる方程式で、空間3次元+運動量空間3次元の偏微分方程式となっている。超新星の研究の場合には、空間座標として球座標系がよくつかわれており、それと親和性を高くするため、運動量空間の3自由度を変数変換してエネルギーと2方向の角度に変換したものはSn法である。角度方向にn本の方程式と解くことからSn法と呼ばれる。Sumiyoshi et al. 2005では空間方向を1次元に制限すると超新星が爆発しなくなるという、現代の超新星研究の出発点となる研究がこの手法で行われた。現在、Sumiyoshi et al. 2012, Nagakura et al. 2016などでアップデートされ6次元のボルツマン方程式が解かれている。本研究もSumiyoshi et al. 2005で使われていたコードをアップデートしていく。

次にM1-Closure法について説明する。先のSn法からスタートし、角度方向2成分を積分してしまうとエネルギー依存性だけが残り空間3次元、エネルギー空間1次元の4次元の方程式となる。流体力学との対応でいうと、これはエネルギー密度や数密度の輸送の式にあたる。さらに元の方程式に角度成分を掛けてから角度平均すると運動量輸送の式が得られる。M1-Closureはこのようにモーメントの1次まで解くことからこの名前がついている。Shibata et al. 2011で手法がある程度確立され、近年非常に研究が盛んになっている。O'Connor et al. 2012 and 2014やJust et al. 2015そしてSkinner et al. 2016など多くの論文が書かれている。

どちらの手法についても計算のボトルネックとなるのは、ニュートリノの反応の計算である。ニュートリノの運動の典型的なタイムスケールに対して、ニュートリノの反応のタイムスケールのほうが圧倒的に短いため、運動のタイムスケールで計算を進めるためには、陰的な解法をとらなければならない。位相空間方向(エネルギー空間や角度空間)をベクトルと見たばあいの行列反転が必要である。反復法の場合、グリッド数の2乗、直接法の場合グリッド数の3乗に比例する演算が必要になる。

## 4. 研究成果

一番大きな研究成果はM1クロージャースキームのコード開発に成功し、論文にまとめたことである。Kuroda et al. 2016としてAstrophysical Journalから出版されている。この研究の大きな特徴はBSSN法という一般相対性理論のアインシュタイン方程式を近

似なくとくスキームで時空の曲がりの進化を解いていることである。この特徴から、現在、超新星のコミュニティでは最も現実に近い計算ができるコードになっている。O'Connor 2012 では無視されていた、速度  $v$  の一次の項もきちんと評価している。

出版後も本科研費の趣旨に沿ってコードを速く走らせるためのチューニングにも力を注いだ。逆行列の解き方等を工夫し、計算を数倍スピードアップさせた。反復法の結果と直接法の結果を比較したが、近年のアーチテクチャーでは直接法も非常に速く計算でき、反復法とそんなに時間で計算を終えることができると分かった。反復法のほうが一般にメモリ要求が高いため、エクサスケールの計算では現在のように直接法で解くことが良いだろうと思われる。スピードアップしたコードで計算を進め、特に相対的な効果が強く効くような重い親星の爆発やブラックホール生成にメスをいれていきたい。

他方で、こうして開発したスキームが他の方法とどれほどコンシステントなのかについて、考察を進めた。それというのも、近年、超新星爆発の計算結果がグループごとに異なっていることが問題になっているからである。計算結果に差が生まれる一つの大きな原因は輻射輸送の計算法であるため、各グループの結果の違いが何によっているのか、早急に確かめる必要がある。本研究計画の予定にはなかったが、現象論的な一般相対性理論の効果も取り入れて比較を行った。アメリカおよびドイツのグループとの比較の結果、計算結果の違いは入力物理であって、輻射輸送法そのものではないことが分かった。この結果はまもなく投稿する。

$S_n$  計算はこれまでラグランジュ的手法で解かれていたコードを我々のオイラー的手法で解くコードに移植し、テスト計算でおよその一致を得るところまで計算が進んでいる。今後、プロダクトランを行う。

本研究で行われているように、ニュートリノの輻射輸送の計算が精密かつ安定に計算できることになったことの副産物として、サイエンスの成果も創出している。それらに関して簡単にまとめておきたい。特に重要なのは超新星からくるニュートリノ、重力波、光を同時に観測することでできるマルチメッセンジャー天文学に関するものだろう。Nakamura et al. 2016 にその概要がまとまっており、特にニュートリノ観測による超新星爆発の位置決め、時間決めが重力波観測にとっても重要であると議論している。Kuroda et al. 2016 や Sotani & Takiwaki 2016 では超新星から来る特徴的な重力波について議論している。

## 5. 主な発表論文等 (研究代表者には下線)

(雑誌論文)(計 10 件)

1. Nishimura, N.; Sawai, H.; Takiwaki, T.; Yamada, S.; Thielemann, F.-K. The Astrophysical Journal Letters, Volume 836, Issue 2, article id. L21, 6 pp. (2017), refereed, <https://doi.org/10.3847/2041-8213/a55dee>
2. Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei; Suwa, Yudai, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 461, Issue 1, p.L112-L116 (2016), refereed, <https://doi.org/10.1093/mnrasl/slw105>
3. Nakamura, Ko; Horiuchi, Shunsaku; Tanaka, Masaomi; Hayama, Kazuhiro; Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 461, Issue 3, p.3296-3313 (2016), refereed, <https://doi.org/10.1093/mnras/stw1453>
4. Kuroda, Takami; Kotake, Kei; Takiwaki, Tomoya, The Astrophysical Journal Letters, Volume 829, Issue 1, article id. L14, 6 pp. (2016), refereed, <https://doi.org/10.3847/2041-8205/829/1/L14>
5. Sotani, Hajime; Takiwaki, Tomoya, Physical Review D, Volume 94, Issue 4, id.044043 (2016), refereed, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.94.044043>
6. Kuroda, Takami; Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei, The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 222, Issue 2, article id. 20, 27 pp. (2016), refereed, <https://doi.org/10.3847/0067-0049/222/2/20>
7. Suwa, Yudai; Yamada, Shoichi; Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei, The Astrophysical Journal, Volume 816, Issue 1, article id. 43, 16 pp. (2016), refereed, <https://doi.org/10.3847/0004-637X/816/1/43>
8. Nishimura, Nobuya; Takiwaki, Tomoya; Thielemann, Friedrich-Karl, The Astrophysical Journal, Volume 810, Issue 2, article id. 109, 23 pp. (2015), refereed, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/810/2/109>
9. Hayama, Kazuhiro; Kuroda, Takami; Kotake, Kei; Takiwaki, Tomoya, Physical Review D, Volume 92, Issue 12,

id.122001 (2015), refereed,  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.92.122001>

10. Nakamura, Ko; Takiwaki, Tomoya;  
Kuroda, Takami; Kotake, Kei,  
Publications of the Astronomical  
Society of Japan, Volume 67, Issue 6,  
id.10716 pp. (2015), refereed,  
<https://doi.org/10.1093/pasj/psv073>

〔学会発表〕(計 11 件)

1. Tomoya Takiwaki, "Explosion  
Mechanism of Core-collapse  
Supernovae", ect\* workshop, Trento,  
Italy, 2014/9/09
2. 滝脇知也, "京で解くニュートリノ輻射  
輸送問題と超新星爆発", PLASMA  
CONFERENCE 2014, 新潟県新潟市朱鷺メ  
ッセ, 2014/11/18
3. 滝脇知也, "超新星3次元モデルに基づ  
くニュートリノ信号", ハイパーカミ  
オカンデにおける宇宙ニュートリノ観  
測, 兵庫県神戸市神戸大学,  
2015/5/18-2015/5/19
4. Tomoya Takiwaki, "How equation of  
state affects explosions of  
core-collapse supernovae",  
International Symposium on "Physics  
and Astronomy of Neutron Stars and  
Supernovae", NAOJ Mitaka-shi Tokyo  
Japan, 2015/6/22
5. Tomoya Takiwaki, "Dependence of  
nuclear equation of state on supernova  
explosion", Numazu workshop, Mishima  
Chamber of Commerce and Industry  
Mishima-shi Shizuoka Japan,  
2015/9/1-2015/9/4
6. Tomoya Takiwaki, "How supernova  
simulations are affected by input  
physics", MICRA2015, Stockholm  
University Stockholm Sweden,  
2015/8/17-21
7. Tomoya Takiwaki, "Neutrino and  
gravitational wave from supernovae",  
Joint symposium by three innovative  
areas, Tohoku University Sendai  
Miyagi Japan, 2015/7/25
8. Tomoya Takiwaki, "A new class of  
rotational explosion in core-collapse  
supernovae", QUCS2015, Nara Kasugano  
International Forum IRAKA Nara-shi  
Nara Japan, 2015/1/4-8
9. Tomoya Takiwaki, "Gravitational wave  
signals from three dimensional  
simulations of Core-Collapse  
Supernovae", 4th annual meeting of  
innovative area on MM study of GW  
sources, IPMU, Kashiwa-shi Chiba  
Japan, 2016/2/18
10. Tomoya Takiwaki, "Gravitational

Signals from Core-collapse  
Supernovae: Cutting-edge samples",  
The 4th DTA Symposium on "Compact  
stars and gravitational wave  
astronomy", NAOJ Mitaka-shi Tokyo  
Japan, 2016/5/13

11. 滝脇知也, "超新星爆発から来る重力波  
信号", 第12回最新の天文学の普及を  
めざすワークショップ, 富山大学 富山  
市 富山県, 2016/10/2-4

〔その他〕

ホームページ等

滝脇知也助教が 2016 年度日本天文学会研究  
奨励賞を受賞

[http://th.nao.ac.jp/news/takiwaki\\_201703.html](http://th.nao.ac.jp/news/takiwaki_201703.html)

6. 研究組織

(1)研究代表者

滝脇 知也 (TAKIWAKI, Tomoya)

国立天文台・理論研究部・助教

研究者番号: 50507837