

数値相対論で探る大質量星の重力崩壊

関口 雄一郎

〈国立天文台理論研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: sekig@th.nao.ac.jp



近年の盛んな研究により、アインシュタイン方程式を数値的に解く数値相対論の分野は大きな進展を遂げました。大質量星が重力崩壊してブラックホールが誕生する瞬間を明らかにする、あるいは連星中性子星が合体する際に放出される重力波波形の計算するといった問題を数値シミュレーションによって解決することが可能になってきています。本稿では、まず、このように魅力的な分野である数値相対論への導入として、ニュートン理論と一般相対性理論において、シミュレーションを行う際にどのような違いがあるのかについて端的にまとめます。その後、大質量星の重力崩壊によってブラックホールが形成する条件およびブラックホールとディスクからなる系が形成される過程を数値相対論によって計算した私たちの近年の研究について紹介します。最後に、有限温度での核物質の状態方程式や、電子捕獲反応・ニュートリノ冷却といった弱い相互作用などの微視的物理過程を組み入れた最新の研究について触れ、数値相対論の最前線の一つの雰囲気を紹介したいと思います。

1. はじめに

数値相対論という研究分野をご存知でしょうか？ ブラックホールや中性子星のような、非常に強い重力をもつ「コンパクトな」天体の精確な記述には、ニュートン重力理論を適用することができず、一般相対性理論が必要となります。しかしながら、一般相対性理論の基礎方程式であるアインシュタイン方程式

$$G_{ab} = \kappa T_{ab}, \quad (1)$$

($\kappa \equiv 8\pi Gc^{-4}$, G は重力定数, c は光速) は、非常に複雑な方程式なので、その解を見つけることはたいへん難しい問題です。私たちが興味をもっているのは、大質量星が重力崩壊してブラックホールあるいは中性子星が誕生する瞬間や、中性子星やブラックホールからなる連星が合体する瞬間のように、強重力場が激しく時間変動する現象ですが、このような場合には解析解を見つけるのは不

可能であるため、数値的にアインシュタイン方程式を解く方法が研究されるようになりました。このような研究分野が数値相対論です。本稿では、大質量星の重力崩壊という現象に対して、数値相対論の手法を用いて研究を行ってきた私たちの研究について紹介したいと思います。

2. 数値相対論とは

本稿で数値相対論をレビューする余裕はありませんので、詳細は参考文献 1 にゆずるとして、本節では本稿の計算手法である数値相対論について、ニュートン理論と一般相対性理論との大きな違いに注目して端的に解説したいと思います。

2.1 絶対時間がない！

数値シミュレーションでは、ある時間一定面の物理量を未来の時間一定面の物理量まで時間発展することになります。ニュートン理論では時間は絶対的な概念ですから、「時間発展」とは絶対時間方向への発展を意味します。一方、一般相対性理

論では時間の概念が絶対的ではないため、時間や空間の方向が一意的に定まりません。実際、アインシュタイン方程式は時間微分と空間微分が入り交じった方程式になっています。したがって天体や重力場の時間発展を計算するためには、時間と空間の方向を決定して、ある時間一定面の物理量を未来の時間一定面まで時間発展させる形に定式化する必要があります(3+1分解²⁾)。

ニュートン理論での重力ポテンシャルは、一般相対性理論では時空の計量(ゆがみ) (g_{ab}) へとその姿を変えています。時間方向および空間方向(時間一定面)が決定されると、時間一定面における空間のゆがみ(計量の時間一定面への誘導計量 (γ_{ab})) と、時間一定面でのゆがみの「速度」に類似する外的曲率 (K_{ab}) を定義することができます*1。物質分布と併せてこれらが時間発展させるべき物理量となります。

2.2 拘束条件式と発展方程式

3+1分解によって時間一定面が導入されると、アインシュタイン方程式から数値シミュレーションで解く際に用いる発展方程式を導くことができます。このことはちょうど、共変形式で書かれた電磁場の基本方程式から、いわゆるマックスウェル方程式を導く場合に類似しています。すなわち、共変形式の方程式の時間方向射影からガウスの法則およびモノポールなし条件が導かれ、空間方向への射影から電場磁場の発展方程式が得られるということです。ここで、ガウスの法則およびモノポールなし条件には、時間微分を含む項がありませんから、これらは各時間一定面において電場・磁場が満たすべき拘束条件とみなすことができます。これと同様に、アインシュタイン方程式の時間を含んだ方向への射影は各時間一定面で重力場 (γ_{ab}, K_{ab}) が満たすべき拘束条件式となっており、

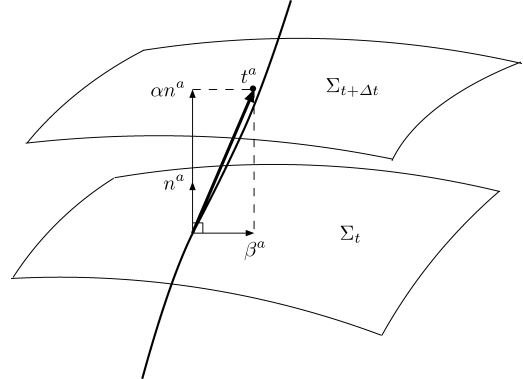


図1 時間方向のベクトル場 t^a 、スライス Σ の単位法線ベクトル n^a 、ラプス関数 α およびシフトベクトル β^a の関係。

発展方程式は空間方向への射影から得られます。

2.3 座標条件の決定

ニュートン理論でのシミュレーションの際にも、デカルト座標を選ぶか、円筒座標を選ぶかといった問題はありますが、一般相対性理論の場合にはその一般共変性に起因して、座標の張り方とは異なる、時間空間軸の選び方に付随した自由度が存在します。具体的には、時間一定面の各点各点でどのように時間を進ませるか、に相当する自由度(ラプス関数 α) と、時間軸の時間一定面に垂直な方向からの空間方向のずれを表す自由度(シフトベクトル β^i) が存在します。これらの自由度に対して座標条件を設定し、自分で時間軸 (t^a) を決めて時間一定面を張る必要があります*2(図1参照)。

2.4 日本の研究者の貢献と数値相対論の現状

一般相対性理論では時間一定面で満たすべき拘束条件が存在することは先に述べましたが、拘束条件を解くことは一般にたいへんであるので、拘束条件は初期条件を与える際にのみ解きます。拘束条件は、初期時間一定面で満たされていれば、

*1 $\gamma_{ab} = g_{ab} + n_a n_b$ および $K_{ab} = -(1/2) \mathcal{L}_n \gamma_{ab}$ 。ここで n^a は時間一定面に垂直な方向の単位ベクトル。 \mathcal{L}_n は n_a 方向へのLie微分。

*2 うまい座標を選ばないと、ある時間一定面以降の発展が追えなくなったり、得られたシミュレーション結果の物理的理解が困難になったりするので注意が必要です。

発展方程式を正確に解く限りにおいて、数学的には常に満たされることが（ビアンキ恒等式によって）保証されています。しかしながら数値計算では誤差ゼロで発展を解くことは不可能なため、拘束条件の破れが単調増加し、ついには数値計算が破綻してしまうという問題がありました。京都大学の中村卓史教授と柴田 大教授は方程式の再定式化を行うことで、世界に先駆けてこの問題を解決しました^{3), *3}。これは現在では **BSSN (Baumgarte-Shapiro-Shibata-Nakamura)** 形式と呼ばれ、数値計算を長時間安定に実行できる強力な定式化として世界で広く用いられています^{3), 4)}。

さらに、最近 10 年間の研究によって、長時間安定に時間発展を計算することができ、かつ少ない計算量で設定することのできる座標条件もほぼ確立されています。また、ブラックホール形成やその進化を計算する方法論も現在では研究が進んでいます。まず、ブラックホールの存在を知るためには、事象の地平面が形成されたかどうかを知る必要がありますが、これについては問題はほぼ解決しています。一方、ブラックホールが存在する時空を長時間安定に時間発展を計算することはごく最近になるまで非常に困難でした。ブラックホール誕生後すぐに時空に特異点が発生しますが、特異点を数値的に取り扱うことができないからです。しかしながら、ここ数年で爆発的に進んだ連星ブラックホールの合体シミュレーションの計算手法の進展⁵⁾によって、ブラックホールが形成する時空の継続的時間発展が可能となりつつあります。

3. 大質量星の重力崩壊を数値相対論で探る

3.1 大質量星の重力崩壊におけるブラックホール形成条件

太陽質量のおよそ 10 倍を超える恒星は、その進化の最後に主に鉄族からなる中心コア（鉄コア）を形成します。鉄は最も安定な元素であるので、その核反応からエネルギーを取り出すことができず、自身の重力を支えることができずに徐々に収縮していき、中心密度が $\geq 10^9 \text{ g/cm}^3$ 、中心温度が $\geq 10^{10} \text{ K}$ にも達します。恒星の質量にもよりますが、鉄コアは主に鉄の光分解反応および電子捕獲反応によって不安定化し^{*4}、重力崩壊します⁶⁾。

崩壊中のコアは、落下速度が亜音速である内部コア (inner core) と、超音速である外部コア (outer core) に分けることができます⁷⁾。崩壊が進んで中心密度が核密度 ($\rho_{\text{nuc}} \sim 2 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$) に達すると、核力による強い反発によって、崩壊は減速されます。内部コアの質量が中性子星の最大質量以下の場合には崩壊は止まり (コアバウンス)、内部コア表面で衝撃波が生じます。衝撃波が恒星の外層を吹き飛ばすことができれば超新星爆発が起こります^{*5}。一方、内部コアの質量が中性子星の最

表 1 シミュレーションで採用した (Γ_1 , Γ_2 , ρ_{nuc}) のパラメーターセット。ゼロ温度の中性子星の最大重力質量が $1.6 M_{\odot}$ になるように設定されている。

Model	Γ_1	Γ_2	$\rho_{\text{nuc}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$
a	1.32	2.25	2.0×10^{14}
b	1.30	2.5	2.0×10^{14}
c	1.30	2.22	1.0×10^{14}
d	1.28	2.75	2.0×10^{14}

*3 中村卓史教授はほかに世界で初めて軸対称ブラックホール形成のシミュレーションに成功するなど、数値相対論の黎明期の第一線で研究をしました。柴田 大教授は現在でも数値相対論の分野をリードする第一人者です。

*4 光分解反応は吸熱反応なのでコアの熱によるサポートを減らします。電子捕獲反応は、電子の縮退圧を減らします。

*5 本稿執筆時点で、世界的に認められた超新星爆発の成功シミュレーションはありません。

大質量よりも大きい場合にはブラックホールへと崩壊してしまいます。ブラックホールが形成するか、それともコアバウンスするかは、内部コアの質量、状態方程式の硬さ、およびコアの角運動量によって決められます。ブラックホールの形成条件および形成過程を明らかにすることは、数値相対論の重要な問題の一つとなっています。

本節で紹介する研究⁸⁾では、組み入れるべき複雑な微視的物理過程を簡略化して取り扱うことで、ブラックホールの形成条件について系統的に調べることができました。このような手法は、(1)核力および核密度以上の高密度における物質の性質についてはまだ不確定要素が大きいため、その不定性の範囲で必要となる物理を変えた計算を行うことは重要と考えられること。(2)電子捕獲反応などの弱い相互作用は鉄コアの密度、温度、電子の割合 (Y_e) などに強く依存しますが、初期条件となる鉄コアを与えるべき星の進化計算モデルにもまだまだ不確定要素が大きいため。(3)微視的物理過程を簡略化してパラメーター化したほうが、結果に直接的に重要である物理を明らかにしやすいこと。という観点からも有力です。

初期条件としては、崩壊前の鉄コアが主に電子の縮退圧で支えられていることを考慮して⁶⁾、 $\Gamma=4/3$ の一般相対論的回転ポルトロープ（圧力が密度によって $P \propto \rho^\Gamma$ と与えられる）の平衡形状を考え、ブラックホール形成に対する依存性を調べるため、さまざまな質量 ($2-3 M_\odot$)、角運動量 ($q \equiv cJ/(GM^2) = 0-1.1$)、角運動量分布をもつ初期条件を用意して計算を行いました。

崩壊中のコアの状態方程式⁷⁾として、大質量星の重力崩壊のシミュレーションでしばしば用いられるパラメトリック状態方程式⁹⁾を採用しました。

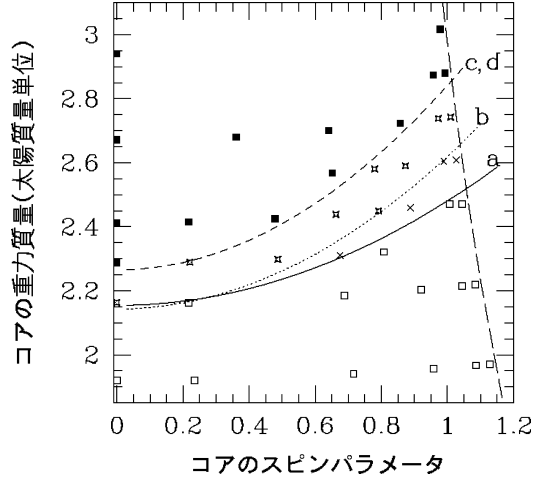


図2 質量-角運動量 (q) 平面におけるブラックホール形成条件。黒い四角はすべての状態方程式においてブラックホールが形成した初期条件、白い四角はすべての状態方程式で中性子星が形成した初期条件。白い星は状態方程式 a, b, d ではブラックホールが直ちに形成したが、状態方程式 c では中性子星が形成した初期条件。バツ印は状態方程式 a でのみブラックホールが形成した初期条件。実線、点線、破線はそれぞれ状態方程式 a, b と d, c に対するブラックホール形成の閾値を表す。右端の長破線は最大回転モデルの境界を表す。

$$P = P_{\text{cold}} + P_{\text{th}} \tag{2}$$

ここで、 P_{th} はガス圧（と輻射圧）に対応する部分で、温度とともに大きくなります。一方 P_{cold} は電子の縮退圧や、核力などそれ以外の部分で、温度が 0 ケルビンでも寄与する項です。 P_{cold} については、

$$P_P = \begin{cases} K_1 \rho^{\Gamma_1}, & \rho \leq \rho_{\text{nuc}}, \\ K_2 \rho^{\Gamma_2}, & \rho \geq \rho_{\text{nuc}}, \end{cases} \tag{3}$$

⁶⁾ 鉄コアを支える主要な圧力源が電子の縮退圧であることは電子のフェルミエネルギー (ϵ_F) と熱エネルギー ($k_B T$, k_B はボルツマン定数) の比が以下になることからわかります。

$$\frac{\epsilon_F}{k_B T} \approx 10 \left(\frac{Y_c}{0.45} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho}{10^{10} \text{ g/cm}^3} \right)^{1/3} \left(\frac{T}{10^{10} \text{ K}} \right)^{-1}$$

⁷⁾ 熱力学的状態を決める、密度、温度、内部エネルギーや圧力などの間の関係式を状態方程式と呼びます。

と置きます。ここで $\Gamma_1 < 4/3$ は主に電子捕獲反応によって崩壊コアが不安定化する度合を司るパラメーターで、このパラメーターが小さいということは、電子捕獲反応がよく効いてコアが崩壊しやすくなることを意味します。一方 $\Gamma_2 > 2$ は核力による反発力の度合を司るパラメーターで、この値が大きいほど核力が効いて状態方程式が「硬い」ことを意味します^{*8}。 P_{th} については理想気体型の状態方程式

$$P_{th} = (\Gamma_{th} - 1)\rho\epsilon_{th} \quad (4)$$

を採用し、簡単のために $\Gamma_{th} = \Gamma_1$ と置いています。この設定のもとで状態方程式のパラメーターは $(\Gamma_1, \Gamma_2, \rho_{nuc})$ の三つですが、ブラックホール形成条件に対するこれらのパラメーターの依存性をより明確にするために、ゼロ温度での中性子星の最大重力質量が $1.6 M_{\odot}$ になるように設定しました(表1参照)。

シミュレーションから得られたブラックホールの形成条件を、質量-角運動量図上にまとめました(図2)。まず球対称コア ($q=0$) の結果に注目します。今回用いた初期条件の質量 ($> 2 M_{\odot}$) は、いずれもゼロ温度での中性子星の最大重力質量 ($1.6 M_{\odot}$) を超えていますから、衝撃波などによって熱エネルギーが供給されない限りはブラックホールへと直ちに崩壊するはずですが、球対称星の重力崩壊によるブラックホール形成の質量下限値が $2 M_{\odot}$ を超えているという結果から、主に衝撃波による圧力の上昇によって、ブラックホールが直ちに形成する場合の質量下限値が 20-30% 増大することが明らかになりました。

コアが回転している場合には、遠心力が重力によるコア崩壊に対抗する効果となるため、最大回転コアの場合では、回転がない場合よりも質量が 25% も大きくなると、コア崩壊によるブラッ

クホール形成は進みません。ここで、最大回転とは、それ以上速く回転すると、コア表面での遠心力が重力よりも大きくなり、コアの平衡形状が存在しなくなる限界の回転のことです。以上は回転角速度がコア内部で一定の剛体回転の場合ですが、また、コアの中心に近いほど速い回転角速度で回転する微分回転の場合には、遠心力によるサポートの効果はより強く現れます。微分回転の場合も含めて、崩壊コアにおいて、中性子星の最大質量以内の部分がどれだけの角運動量をもつかが、ブラックホール形成条件を決める重要な指標となっていることが明らかとなりました。

詳細は論文⁹⁾に譲りますが、ブラックホールが形成されるかどうかは、状態方程式にも大きく依存することが明らかとなりました。例えば、 Γ_1 が大きい場合^{*9}には、失われる圧力が小さいために、より質量の大きい内部コアができます。その結果としてブラックホールが形成しやすくなります。

このように、電子捕獲反応の度合や原子核物理などの微視的物理の不定性によって、ブラックホールの形成条件が大きく変更を受けることが明らかとなりました。ブラックホールの形成条件がこれら微視的物理過程に依存するということは、逆に考えれば大質量星の重力崩壊からもたらされる情報によって未だ完全に解明されていない微視的物理を制限することができるということです。高密度核物理学とブラックホール形成(宇宙物理学、天文学)との間の学際領域の研究の発展によって、超高密度での物質の物理やブラックホール形成の瞬間の情報など、従来の研究、観測では知りえなかった情報を知ることができる可能性があるのです。

3.2 大質量星の重力崩壊におけるブラックホール+ディスク形成

大質量星の重力崩壊によってブラックホールが

^{*8} 物質を圧縮しようすると反発力を受けます。相対的な表現ですが、反発が強くて圧縮しにくい場合を状態方程式が「硬い」といい、その逆を「軟らかい」といいます。

^{*9} 電子捕獲反応による不安定下の度合が小さい場合。

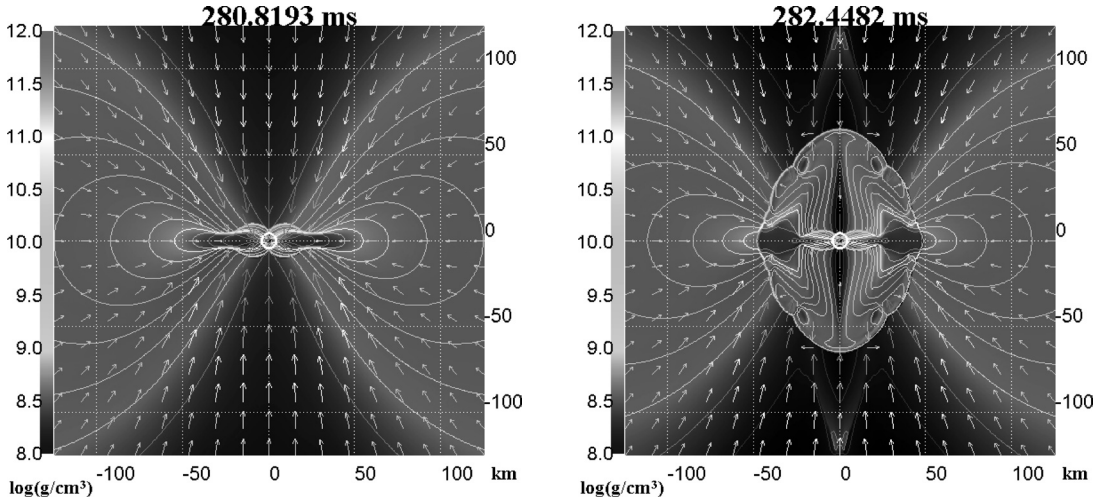


図3 $x-z$ 平面における密度等値面と速度ベクトル. 原点付近の白い楕円はブラックホールの見かけの地平面を表す.

形成する場合に、中心コアが高速回転している場合には、ブラックホールの周りに降着円盤（ディスク）が形成されると考えられます。このような天体は、 γ 線バーストと呼ばれる、宇宙で再大規模の高エネルギー天体現象の中心動力源の有力な候補であるため^{10), 11)}、こうした系の形成過程の解明は数値相対論における重要課題の一つとなっています。本節で紹介する研究¹²⁾では、ブラックホール切り取り技法と呼ばれる、ブラックホール形成後の時空を安定に時間発展する手法を用いて、高速回転コアの重力崩壊によってブラックホール+ディスク系が形成される過程を、数値相対論によって世界で初めて計算しました。

本研究においても、微視的物理過程をパラメトリック状態方程式を用いることで簡略化した計算手法を採用しています。ただしゼロ温度での中性子星の最大重力質量が $2M_{\odot}$ となるように設定しています。初期回転星のモデルとしては $\Gamma=4/3$ の一般相対論的回転ポリトロップ ($P \propto \rho^{\Gamma}$) の平衡形状を与え、直ちにブラックホールが形成される大質量コアを与えています。

図3に、ある時間一定面での $x-z$ 平面における密度等値面と速度ベクトルを示します。崩壊コアの質量が中性子星の最大質量よりも大きいので、

ブラックホールが直ちに形成されます。その後、周囲の物質が降着するに伴い、遠心力によって支えられた薄いディスクがブラックホールの周りに形成されます（図3左のパネル）。その後、降着流体がディスクの表面にぶつかることでディスクは加熱され、その熱エネルギーが上昇していきます。ついには熱による圧力でディスク自体が上下方向に膨張し、衝撃波が伝播していきます（図3右のパネル）。ブラックホールというイメージがありますが、その形成過程ではこのように物質が飛び出してくる可能性もあります。

衝撃波によって熱エネルギーが供給されるために温度はさらに上昇し、計算の終状態では、ブラックホールとそれを取り巻く高温、高密度のトーラスが形成されることが明らかとなりました（図4）。天文月報の表紙図は図4左パネルの中心領域を拡大したものになっています。図5にディスクの面密度、温度を示します。衝撃波によって回転軸付近の流体が掃かれた結果、回転軸付近に密度の低い領域が形成されていることがわかります（図4左パネルも参照）。また衝撃波によってディスクの温度が1桁程度高くなっていることもわかります（図4右パネルも参照）。最終的に、初

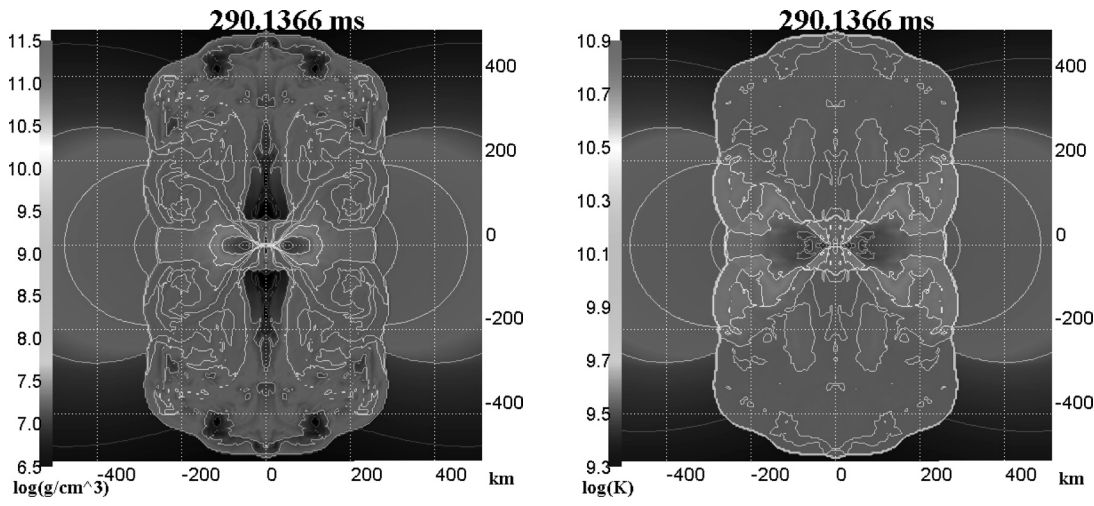


図4 計算の終状態での、 $x-z$ 平面における密度等値面（左図）と温度等値面（右図）。

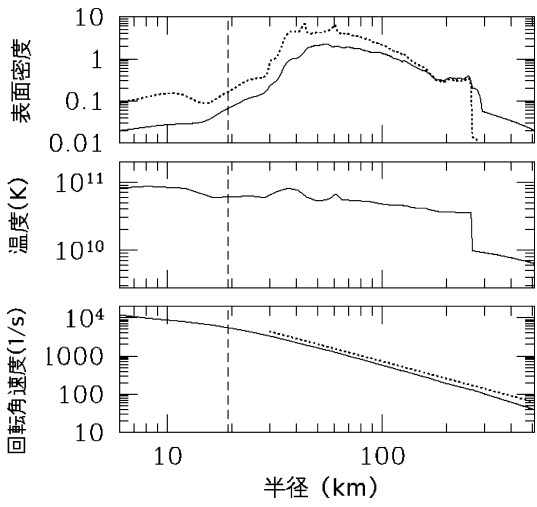


図5 計算の終状態における、面密度 $\Sigma_{17} \equiv \Sigma / 10^{17} \text{ g/cm}^2$ (実線) およびニュートリノに対する光学的厚さ $\tau \approx \kappa_{\nu} \Sigma$ (点線) (一番上のパネル). 赤道面での温度 (真中のパネル). 回転角速度 Ω (実線) およびケプラー回転角速度 (点線) (一番下のパネル). $R \approx 19 \text{ km}$ に引かれた破線はブラックホール周りの最内郭安定軌道を表す。

期コアのうち 90% がブラックホールにのみ込まれ、残りの 10% 程度がトーラスを形成することがわかりました。

本研究で明らかになったディスクにおける衝撃波形成が、どの程度一般的なもので、実際の γ 線バーストの形成過程でどのような役割を果たすかの詳細について、確定的なことはまだわかりません。しかしながら、もしこのような急激な熱エネルギーの上昇が実際に起こるとすると、それは γ 線バーストの中心動力源にとって極めて好都合であるかもしれません。というのは、膨大な熱エネルギーのほとんどすべては、ニュートリノと呼ばれる粒子によってトーラスから運び去られますが、ニュートリノをエネルギー源として、(ニュートリノの対消滅によって電子陽電子からなるプラズマを作り出し) γ 線バーストを起こすシナリオ¹¹⁾が提唱されているからです*10。

*10 拡散近似のもとでニュートリノルミノシティを計算すると、 $T_{11} \equiv T / 10^{11} \text{ K}$ および $\Sigma_{17} \equiv \Sigma / 10^{17} \text{ g/cm}^2$ として、

$$L_{\nu} \approx 2\pi R_{\text{disk}}^2 F_{\nu} \sim 5 \times 10^{53} T_{11}^2 \Sigma_{17}^{-1} \left(\frac{R_{\text{disk}}}{70 \text{ km}} \right)^2 \text{ ergs/s}$$

という膨大なものになります。過去の研究¹³⁾によると、このような膨大なニュートリノ放射によって、 $\dot{E}_{\nu\bar{\nu}} \sim 10^{52} \text{ ergs/s}$ ものニュートリノ対消滅による電子陽電子対へのエネルギー注入が起こる可能性が示唆されており、衝撃波加熱による温度上昇がない場合に比べて、数桁高い電子陽電子対生成が起こります。

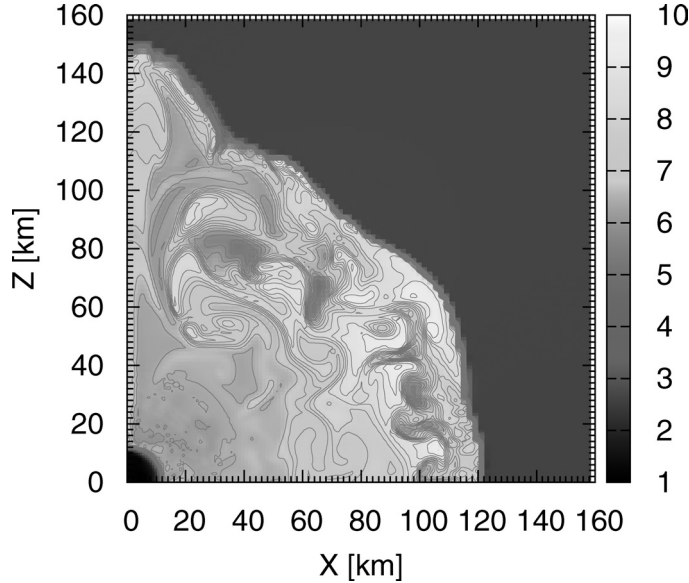


図6 $x-z$ 平面における、バリオン当たりのエントロピー (k_B) の等値面。対流不安定が成長していることが見てとれる。なお、文中で述べた「軽い物の上に重い物が乗る」状況となり対流が駆動される条件は、高エントロピー物質の上に低エントロピー物質が存在する状況に対応している。

3.3 微視的物理過程を考慮した大質量星の重力崩壊シミュレーション

最後に、私たちの最近の研究について簡単に紹介しましょう。今まで紹介してきた研究では、重力崩壊において重要となる微視的物理過程について簡略化した取り扱いをしていましたが、ブラックホール形成過程をより詳細に解明するためには、微視的物理を組み入れた計算を行う必要があります。数値相対論の枠組で必要となる微視的物理過程すべてを考慮した計算は存在しませんでした*¹¹、最近世界で初めてそのような計算をすることに成功しました^{15)-17)*12}。このような計算の精緻化は、非常に時間と労力の掛かる仕事ですが、単に現象をより定量的に精確なものとするにとどまらず、以下に例を挙げるように、定性的にも結果を変更させるものであり、非常に重要です。

開発した数値コードを用いて、初期質量が $15 M_{\odot}$ の恒星の球対称進化計算モデル⁶⁾を初期条件とした重力崩壊のシミュレーションを行いました。この初期条件では、内部コアの質量は中性子星の最大質量以下なので、コアバウンスを起し、衝撃波が発生します。衝撃波によって熱エネルギーが増大し、その熱エネルギーはニュートリノによって運び去られることは先に述べました。コアの温度は衝撃波のすぐ後ろで高くなっているので、この領域からニュートリノはエネルギーをより運び去ります。結果として軽いもの（コア内部）の上に重いもの（衝撃波のすぐ後方）が乗る状況になり、対流が駆動されます。図6に示すとおり、衝撃波の後方で激しい対流現象が起きていることがわかります。

ところで、対流はそれに付随した重力波が放出

*¹¹ 電子捕獲反応のみ近似的に考慮した計算は存在する¹⁴⁾。

*¹² 有限温度の核密度状態方程式¹⁸⁾、電子捕獲反応¹⁹⁾、電子陽電子対消滅反応²⁰⁾、プラズモン崩壊²¹⁾、ニュートリノ制動放射²²⁾、およびニュートリノ散乱反応²²⁾。ニュートリノ輸送に関しては、ニュートリノ洩れ出し法と呼ばれる技巧を独自に改良した手法を用いて近似的に取り扱っています。

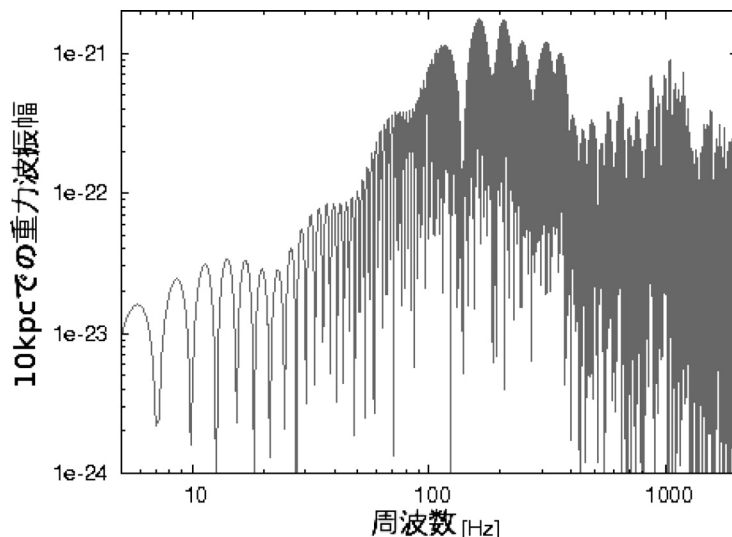


図7 地球から10 kpcのところにある重力波源での、対流運動によって放出される重力波波形のスペクトル。

されるという観点からも非常に興味深い現象です。重力波は質量エネルギー四重極の時間変動によって生じるからです。図7に、地球から10 kpcのところから重力波源があった場合の重力波スペクトルを示します。100–400 kHz付近にいくつかのピークが見られますが、これは対流運動を反映したものであると考えられます。このような重力波は、現在稼働中の重力波干渉計によって観測される可能性があり、その解析から電磁波による観測では知ることのできない、(光学的に厚い)恒星の中心領域の情報を得ることができると考えられます。

4. まとめと今後の展望

近年の数値相対論分野の発展により、本稿で取り上げた、大質量星の重力崩壊によるブラックホール形成や、連星中性子星の合体など、天体物理学的にたいへん興味深い現象を数値シミュレーションによって解明することができるようになってきました。しかしながら、電磁波では観測することのできない高密度領域であるがために、また、ニュートリノや重力波といった相互作用の弱いシグナルを主に放出するゆえに、シミュレー

ション結果を観測と比較して現象の実像に迫るといった試みはまだ進んでいません。しかしながら、ニュートリノや重力波の観測からは、電磁波では知ることのできない、また地球上の実験では到底たどり着くことのできない高温高密度下の物理に対するユニークかつ相補的な情報を得ることができると考えられます。そのときに観測データと現象をつなぐのが数値相対論の役割でしょう。そのためには、本稿で概説したように、簡略化したモデルを用いて物理的エッセンスを抽出する理論計算、および関連する物理を詳細に組み入れた理論計算の双方が必要となると考えられます。前者に関してはほぼ計算可能になっており、今後は後者の研究がより重要度を増すと予想されます。世界で先駆けて開発した計算コードによって大きな成果を上げられることを期待して本稿を閉じます。

参考文献

1) 柴田大, 一般相対論の世界を探る: 重力波と数値相対論, (UT Physics 3, 東京大学出版会).
 2) York Jr., J. W., 1979, Kinematics and Dynamics of General Relativity, in *Sources of Gravitational Radiation*, ed. by Smarr L. (Cambridge University Press, Cambridge)
 3) Shibata M., Nakamura T., 1995, Phys. Rev. D 52, 5428
 4) Baumgarte T. W., Shapiro S. L., 1999, Phys. Rev. D 59, 024007
 5) Pretorius F., 2009, Binary Black Hole Coalescence, in *Physics of Relativistic Objects in Compact Binaries: from Birth to Coalescence*, ed. by Colpi M., et al. (Springer Verlag)
 6) Woosley S. E., Heger A., Weaver T. A., 2002, Rev. Mod. Phys. 74, 1015
 7) Bethe H. A., 1990, Rev. Mod. Phys. 62, 801
 8) Sekiguchi Y., Shibata M., 2005, Phys. Rev. D 71, 084013
 9) Takahara M., Sato K., 1984, Prog. Theor. Phys. 72, 978
 10) Woosley S. E., 1993, Astrophys. J. 405, 273
 11) MacFadyen A., Woosley S. E., 1999, Astrophys. J. 524, 262
 12) Sekiguchi Y., Shibata, M., 2007, Prog. Theor. Phys. 117, 1029
 13) Setiawan S., Ruffert M., Janka H.-Th., 2004, MNRAS 352, 753
 14) Ott C. D., et al., 2007, Phys. Rev. Lett. 98, 261101
 15) Sekiguchi Y., 2008, Ph.D. thesis, Univ. of Tokyo
 16) Sekiguchi Y., 2009, Prog. Theor. Phys. submitted
 17) Sekiguchi Y., 2009, Prog. Theor. Phys. submitted
 18) Shen H., et al., 1998, Nucl. Phys. A 637, 435
 19) Fuller G. M., Fowler W. A., Newman M. J., 1985, Astrophys. J. 293, 1
 20) Cooperstein J., van den Horn L. J., Baron E. A., 1986,

Astrophys. J. 309, 653
 21) Ruffert M., Janka H.-T., Schaefer G., 1996, Astron. Astrophys. 311, 532
 22) Burrows A., Reddy S., Thompson T. A., 2006, Nucl. Phys. A 777, 356

Exploring Massive Stellar Collapse via Numerical Relativity

Yuichiro SEKIGUCHI

Division of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

e-mail: sekig@th.nao.ac.jp

Abstract: There are significant progresses in Numerical Relativity, in which Einstein's equation is solved numerically, thanks to the recent advanced efforts and studies. For example, simulations of black hole formation in the collapse of massive stellar core, and calculations of gravitational waveforms from binary neutron star merger become possible. In this article, first, I will briefly address the principle differences between simulating in Newtonian theory and in general relativity, aiming at introducing readers into the world of numerical relativity. Then, some recent results such as criteria of prompt black hole formation in gravitational collapse of massive stellar core, and formation mechanism of black hole surrounded by accretion torus, will be reported. Finally, one of the hottest topics in Numerical Relativity, that is, Numerical Relativity with microphysics (a finite temperature nuclear equation of state, weak interactions such as electron capture and neutrino cooling), will be mentioned.