

中質量ブラックホール形成の基礎的数値シミュレーションの紹介

漆畑 貴樹 (東京大学理学系研究科)

Abstract

相対論的効果が発生する現象を理解する為にはアインシュタイン方程式を解く必要がある。しかし複雑な連立偏微分方程式の型をしており、厳密解はおろか数値的にも解くのが難しい。そこで時空を 3+1 形式に分解し、アインシュタイン方程式を数値的に解く事を目的として研究された分野が数値相対論である。当発表では、京都大学の関口雄一郎氏と柴田大氏による 2007 年の論文を通して、中質量ブラックホール形成の基礎となった数値シミュレーションを紹介する。また 2011 年,2012 年の論文を参照し、現在の中質量ブラックホール形成の研究状況の発表を行う。

1 Introduction

観測による LGRBs(Long Gamma-Ray Bursts) のアフターグローは超新星と大質量星のコア崩壊に関係している事を示している。これを支持するものとして、LGRBs の中心エンジンは大質量で熱い降着円盤をまとった回転しているブラックホールである、というコラプサーシナリオがある。その為にはブラックホールの周りに、降着円盤が形成されるのに十分早く回転している Progenitors が必要である。また相対論的ジェットは星表面に達しなければならない。以上の条件を満たす LGRBs の Progenitors として、早く回転している大質量の WR(Wolf-Rayet) 星が候補として挙げられている。

20 世紀初めにブラックホールの存在が理論的に示唆された時、常識と懸け離れた性質を持っていた為、あくまで理論的なもので現実的には存在しないものと思われていた。しかし、恒星進化の研究が進むにつれて大質量星が進化すると中心部が極めて高密度になる事がわかり、ブラックホールが現実にも存在する可能性が論じられるようになった。観測的側面では 1970 年代初めに、小田稔氏らによりはくちょう座 X-1 と呼ばれる X 線源がブラックホールの候補として初めて提唱された。

ブラックホールには恒星質量ブラックホール、大質量ブラックホール、中質量ブラックホールの 3 種類あると言われている。これらは名前の通り質量により区別され形成過程が関係している。今回紹介する数値シミュレーションは上述の WR 星、つまり大質

量星の崩壊によるブラックホール形成を示している。

2007 年の論文では早く回転している星の崩壊を設定しているが、2011 年では初期の回転が遅い場合、普通の場合、早い場合のシミュレーションを行っている。

数値相対論について簡単に述べておく。一般相対論において、あえて重要な式を挙げよと言われれば測地線方程式とアインシュタイン方程式が挙げられる。アインシュタイン方程式は連立偏微分方程式であり、一般相対論の性質により、書き下すと時間微分や空間微分が入り混じった形で現れる。ここでアインシュタイン方程式を捉え直す。つまり時間方向 1 次元と空間方向 3 次元、3+1 形式へと分解し時空の空間(超曲面)の時間発展を表す式と解釈する。では時間や空間が入り混じった理論で如何に分解するか、そして時間発展をさせるか等を考える分野である。当発表では、数値相対論に深くは触れない。

2 Setting

最近の恒星進化モデルによると、早く回転している星は化学均一状態を生じさせるので崩壊直前の WR 星をポリトロープであるとし、ポリトロピック状態方程式を採用する。

$$P = K\rho^\Gamma \quad (\Gamma = \frac{4}{3}, K = const)$$

また、 $2M_\odot$ より大きな Fe コアへとなる大きな M_{CO} コアを生じさせる。これらの事を考慮して、今回扱う

コアの質量は $M \approx 3.5 - 4.5M_{\odot}$ とする。これにより定数 K は $9 - 10.5 \times 10^{14} \text{cm}^3/\text{s}^2/g^{1/3}$ となる。回転運動エネルギー T_{rot} と重力ポテンシャルエネルギー W の割合は ≈ 0.0088 となる。無次元スピンパラメータ $q \equiv cJ/GM^2$ を定義すると ≈ 0.98 となる。ただし、 M, J はそれぞれコアの質量と角運動量である。

圧力 P を考える際、cold part と thermal part に分けて考える。つまり、 $P = P_{cold} + P_{th}$ である。ここで、

$$P_{cold} = \begin{cases} K_1 \rho^{\Gamma_1} & , \rho \leq \rho_{nuc} \\ K_2 \rho^{\Gamma_2} & , \rho \geq \rho_{nuc} \end{cases}$$

そして $P_{th} = (\Gamma_{th} - 1)\rho(\epsilon - \epsilon_{cold})$ である。ここで ρ は静止質量密度、 ϵ と ϵ_{cold} は比内部エネルギーの合計とコールド部分の量である。また cgs 単位系で $K_1 = 5 \times 10^{14}$ で、 $K_2 = K_1 \rho_{nuc}^{\Gamma_2 - \Gamma_1}$ である。比内部エネルギーは $\Gamma = 4/3$ のポリトロピック状態方程式と同じ量を用いる。つまり $\epsilon = 3K\rho^{1/3}$ である。 Γ_1 の値は以前に行われた超新星シミュレーションにより、 $1.30 \leq \Gamma_1 \leq 1.33$ と考えられる。 Γ_2 と ρ_{nuc} の値は cold neutron star の重力質量のとれる最大値が $\approx 2.0M_{\odot}$ である事から選択される。またシンプルに $\Gamma_{th} = \Gamma_1$ とする。

比内部エネルギーの式

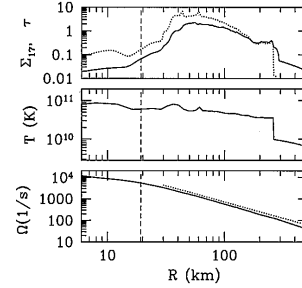
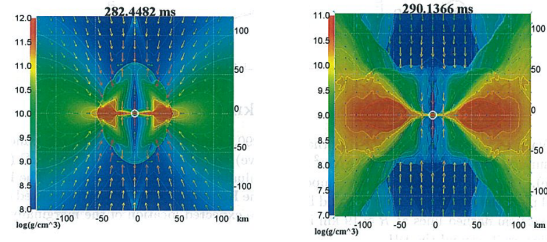
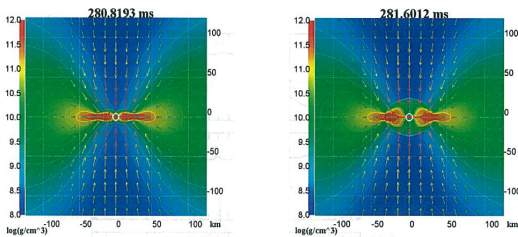
$$\epsilon = \epsilon_{gas} + \epsilon_{rad} + \epsilon_{\nu} + \epsilon_{cold}$$

を解く事によって、比内部エネルギーから温度が排出される。ここで $\epsilon_{gas}, \epsilon_{rad}, \epsilon_{\nu}, \epsilon_{cold}$ はそれぞれガス、輻射、ニュートリノの比内部エネルギーである。

またシミュレーションは軸対称、完全に一般相対論を考慮したコードで行われている。

3 Results

3.1 Figure



3.2 Explanation

崩壊が始まって早い段階では、コアの中心密度は核密度より小さく近似的に化学的均一な状態であるとみなせる。中心密度が核密度に達した時、遠心力により赤道面周りの崩壊が減速する。一方、回転軸沿いの崩壊は平板構造を形成するため加速していく。星のコアの質量が許された最大質量よりずっと大きいので、崩壊が始まるとダイレクトにブラックホールへとなる。ブラックホール形成は見かけの地平面が見つけられる事によって確認される。見かけの地平面が形成された後、ブラックホール周りに薄い降着円盤が形成される。この円盤は近似的にケプラー速度で回転している。

円盤が形成された後、円盤内部で衝撃波が形成され運動エネルギーは熱エネルギーに変換される。解放される重力ポテンシャルエネルギーは $4 - 5 \times 10^{52} \text{ergs}$ である。この時、熱エネルギーが残ると円盤の高さ H が増加する。

H が増加するとき重力により束縛は減るので、円盤は衝撃波を形成しつつ z 方向へ爆発的に広がっていく。衝撃波の伝播速度は $\approx 0.5c$ に達する。衝撃波が伝播している時、ブラックホールへの質量降着は減少する。伝播後、回転軸周りに低密度の漏斗状の領域が形成される。加えて、漏斗領域は hot wall に囲まれている。漏斗領域の温度は hot wall と同じレベ

ルで増加していく。したがって、この領域は thermal pressure によって支えられている。

$t = 290.14ms$ において、shock heating により衝撃を受けている所の領域の温度は $T \approx 4-9 \times 10^{10} K$ になる。これは衝撃を受けていない領域に対して、係数でいうと 4,5 倍になる。回転軸の表面密度は $\Sigma \approx 2-6 \times 10^{15} g/cm^2$ で、円盤の密度は $\Sigma \sim 10^{17} g/cm^2$ となる。この事は漏斗状の構造が出来ている事を表している。

LGRBs が形成されるのには少なくとも 3 つの要因が要求される。1. 高い relativistic outflows を生じる energetic fireball。2. relativistic outflows のコリメーション。3. 星のマントルを通して outflows が貫通している。強磁場を取り入れていないが、今回のシミュレーションはこれら 3 つの要件を満たしている。

4 + Information and Conclusion

2007 年の段階では、崩壊する星の回転を固定 ($q \approx 0.98$) して、磁場を考慮していない。2011 年では崩壊する星の回転を 3 つのパターンに分けてシミュレーションしている。2012 年では輻射-磁気流体力学を考慮したシミュレーションを行っている。

2012 年に至るまで様々な物理過程、条件を考慮した中質量ブラックホールのシミュレーションとなっている。今後、観測方面、特に重力波の検出が可能になればこれらのシミュレーションの妥当性を裏付ける、また逆に観測結果を有意なものにすると思われる。

参考文献

- 1) ブラックホールと高エネルギー現象 (小山勝二 他 2007)
- 2) 一般相対論の世界を探る (柴田大 2007)

Reference

- 1) Yuichiro SEKIGUCHI and Masaru SHIBATA. 2007. Progress of Theoretical Physics
- 2) YUICHIRO SEKIGUCHI AND MASARU SHIBATA. 2011. THE ASTROPHYSICAL JOURNAL
- 3) Masaru SHIBATA and Yuichiro SEKIGUCHI. 2012. Progress of Theoretical Physics