

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400220

研究課題名(和文) 超巨大ブラックホールの種となる超巨大星の進化と運命の解明

研究課題名(英文) The Final Fates of Accreting Super Massive Stars

研究代表者

梅田 秀之 (Umeda, Hideyuki)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：60447357

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：急速な降着によって形成された超巨大星は超巨大ブラックホール形成の有力な起源と考えられている。この形成過程に伴う進化、及び最終的な質量や運命を解明するため、これまでの星の進化コードを改良し一般相対論的(GR)不安定性による星の崩壊を考慮した降着星の進化計算を行った。その結果、従来の一定質量の星の進化と異なり、より大きな質量に達するまでGR不安定が起きないことを示した。具体的に明らかにしたのは以下の3点である。(1)降着率と最終質量の関係。(2)それぞれの場合に星が最終段階に至り崩壊する理由。(3)それぞれの場合、星が崩壊後に爆発するかブラックホールへと至るか、である。

研究成果の概要(英文)：The formation of supermassive stars (SMSs) via rapid mass accretion and their direct collapse into black holes (BHs) is a promising pathway for sowing seeds of supermassive BHs in the early universe. We calculated the evolution of rapidly accreting SMSs including general relativistic (GR) effects up to the onset of the collapse. We found that such SMSs have a less concentrated structure than a non-accreting ones. This effect stabilizes the stars against GR instability even above the classical upper mass limit around 100,000 Msun. We found that the final masses for $dM/dt = 0.1, 0.3, 1.0$ and 10 Msun/yr are 1.2, 1.9, 3.5 and 8.0 times 100,000Msun, respectively. We also found that the GR instability does not occur for the $dM/dt=0.1$ model. On the other hand, the instability occurs during He-burning stage for the $dM/dt=0.3$ and 1.0 models, and during H-burning stage for the $dM/dt=10$ model. And the reasons for these results were discussed.

研究分野：理論天体物理学

キーワード：超大質量星 初代星 超大質量ブラックホール 一般相対論

1. 研究開始当初の背景

我々の銀河を含め多くの銀河の中心には巨大なブラックホールがあるが、宇宙初期のように銀河内にガスがたくさんあると、それがブラックホールに降り積もる過程で非常に明るい光を発する。このような天体はクエーサーと呼ばれるが、最も遠いものは赤方偏移 $z=6$ で見つかっており、それは初期宇宙ですでに $10^9 M_{\odot}$ (太陽質量) もの巨大な質量を持つブラックホールが形成されていた事を意味する。

宇宙誕生後まもなくにして巨大なブラックホールを作るためには、少なくとも $100 M_{\odot}$ のブラックホールを種に非常に大きな降着率でガスを降らせ、短時間に成長させる必要がある。しかしこのような大きな降着率が可能であるのか議論が続いている。最近注目されているのは、特殊な環境下で $10^5 M_{\odot}$ を超えるような巨大な星が生まれ、それから大きなブラックホールの種が形成される可能性である。大きな種があれば、その後の巨大ブラックホール形成は遥かに容易になる。星はガスが集まって誕生するが、一般にガスの冷却率が小さいほど重い星が形成される傾向がある。重金属の乏しい宇宙初期では最も高率的な冷却剤は水素分子であり、これが壊されるような環境下では巨大な星が誕生する可能性がある。

このような環境下であっても実際に巨大な星が生まれるかどうかは自明ではない。なぜならガス雲の中心にできた原始星に降着が続くと、強い紫外線が発せられ、降着物質を電離するなどし、降着を妨げるからである。

しかし、実際に巨大星の形成が可能であることを示唆する重要な進展が近年あった。通常の場合、降着星は主系列星となる段階で半径が収縮し星の温度が上がるために紫外線放射が強くなる。これが質量降着を妨げる主因となる。しかし水素分子が破壊されているガス雲の中で起きる $0.1 M_{\odot}/\text{yr}$ を超える大きな降着率のもとでは星の半径が収縮せず、降着が妨げられる事が無いことが発見された。

これにより宇宙初期での巨大星形成の可能性が現実的になったが、実際にどのような質量な星が生まれ、更にそれが巨大ブラックホールとなるかどうかを明らかにするには降着中の星の進化計算を最後まで行う必要がある。これまで水素燃焼の段階で星の質量が $10^5 M_{\odot}$ に達するまでの計算しか行われていなかった。一方我々はこれまでに鉄のコアの崩壊まで計算を迫るコードを開発しており、少し状況は異なるが $10^5 M_{\odot}$ を超える質量降着星の進化計算を行った経験がある。そこで、今回のような大きな質量降着のある場合の星の進化計算を行う計画を立てるに

至った。

これまでも宇宙初期の金属の無い巨大星の計算が行われたことはあったが、これらは全て一定の質量を仮定して計算されたものであった。その結果は $10^5 M_{\odot}$ を超える巨大星は金属がある程度あると水素燃焼の段階で一般相対論的不安定性によって崩壊し、 10^{56} erg を超える巨大な爆発を起こすが、金属の無い場合にはそのような爆発は起こさずに巨大なブラックホールを形成するというものであった。その事からここで考えているような巨大星は爆発などはせずにブラックホールを作ると考えるのが妥当だと推測できる。しかし近年約 $5,5000 M_{\odot}$ の星は金属が無くとも 10^{55} erg を超える巨大爆発を起こすという主張に基づいた論文が複数出版されている。そこで、このような巨大爆発が一定質量ではなく、質量降着している場合でも起きるのか、またその爆発する質量範囲や条件などを明らかにすることが、求められている。

2. 研究の目的

観測によると太陽の 10^9 倍もの質量を持つ巨大なブラックホールが宇宙の極めて初期から存在することが明らかになっているが、その形成過程は未だ謎に包まれている。本研究では、最近提案された急速な質量降着による巨大星形成シナリオに従って、巨大質量星の進化とその重力崩壊の過程を詳細に計算し、実際に巨大なブラックホールが形成されるのか、またそれらの星の一部は宇宙で最も巨大な爆発を引き起こすのかどうかを明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究ではまず先行研究で用いた質量降着中の星の進化計算コードにポストニュートリアン重力項を加えて、急速降着中の Pop 星の進化計算を行う。これにより降着率の関数として星の最終質量を求める。次に流体力学コードを用いて計算を続け、これらの星が爆発するのか直接ブラックホールへ崩壊するのか明らかにする。この計算には通常の超新星爆発で追うよりも遥かに長時間流体力学計算を行わねばならず、コードの高速化と長時間に渡って精度の良いエネルギー保存が必要であり、そのためのコード開発を行う。計画の後半では1次元で近似無し的一般相対論的流体計算も行い結論の補強をはかる。このようにして急速降着シナリオに基づき巨大ブラックホールの種の質量を決定する。またこのような星の一部が巨大爆発を起こすのか、その場合はどのような性質であるのか明らかにする。

4. 研究成果

恒星進化計算コードを改良し、一般相対論の効果ポストニュートニアン近似の下で取り入れ急速降着している星の進化計算を行った。その結果一定の降着率の場合に関して以下のような結果を得て Umeda 他(2016)の論文として世界に先駆けて発表した。

明らかにしたのは主に次の三点である。

- (1) 降着率と最終質量の関係。
- (2) それぞれの場合に星が最終段階に至り崩壊する理由。
- (3) それぞれの場合、星が崩壊後に爆発するかブラックホールへと至るか。

(1) 降着率 \dot{M} と最終質量 M_f の関係
まず得られた結果は次の表のようになる。

$\dot{M} (M_{\odot}/\text{yr})$	0.1	0.3	1.0	10
$M_f (10^5 M_{\odot})$	1.2	1.9	3.5	8.0

ここで本計算における最終モデルは中心で炭素燃焼が始まった段階に対応するが、その後の進化時間は短いため上記の質量が星の最終質量と言える。この計算では一定の \dot{M} が仮定されているため星の寿命も表からわかり $\dot{M}=0.1$ のものでは 120 万年、 $\dot{M}=10$ では 80 万年と降着率の大きいものほど短くなっている。そのため星の最終質量は \dot{M} とは比例せず $\dot{M}=0.1$ の結果と比べて降着率がそれぞれ 3, 10, 100 倍になっても最終質量は 1.6, 2.9, 6.7 倍にしかならない。その理由については主に (2) で説明するが、一つの理由は \dot{M} の大きいモデルのほうがわずかに内部温度が高いため (図 1 参照) 中心の水素が早く燃えるからである。

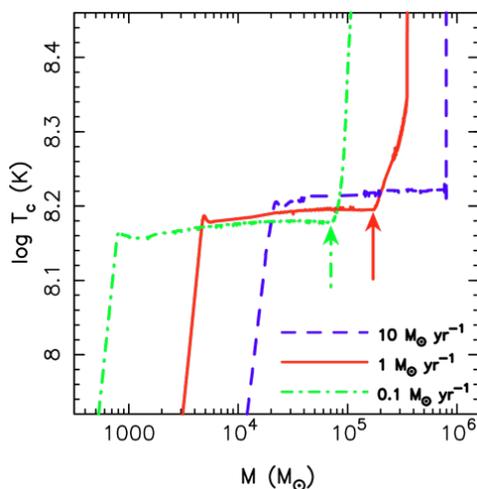


図 1 : 中心温度 T_c の進化に対する \dot{M} 依存性。横軸は星の質量であるが降着率が一定であるため時間に比例する。矢印は中心で水素が燃え尽きた時間を表している。

(2) 崩壊する理由
通常の大質量星 (約 $100 M_{\odot}$ 以下の質量の)

が重力崩壊する理由は星の中心部で核燃焼が進み鉄核が形成されると更なる核融合が起きないため星を支える圧力を生み出すことができなくなるためである。一方、過去の研究により質量が $10^5 M_{\odot}$ を超えるような超巨大星は一般相対論の効果によって不安定となり水素燃焼の段階で崩壊することが示されていた。今回計算を行ったものも最終質量が $10^5 M_{\odot}$ を超えており、どのような理由で重力崩壊に至るのか興味がある。

以下 \dot{M} が 0.1, 0.3, 1.0, 10 の場合にそれぞれどのような理由で崩壊するのか説明する。

$\dot{M}=0.1$ の場合には進化の最終段階まで一般相対論的不安定性はおきない。そのため中心で水素が燃え尽きた後も核燃焼エネルギーによって星が支えられる準静的進化が続き、鉄のコアが形成されて初めて流体力学的な重力崩壊が起きる。

$\dot{M}=0.3$ と 1.0 の場合には興味深い結果が得られた。この場合、水素燃焼終了時にはまだ一般相対論的不安定は起きていない。そのため図 1 で見られるように水素燃焼後直ちに崩壊することはなく、質量がまだ増えている。しかしヘリウム燃焼時に一般相対論的不安定がおき、その後ごく短時間のうちに崩壊した。この結果は図 1 で見ることができる。 $\dot{M}=1.0$ の曲線は中心で水素が燃え尽きた後も質量が増えているが $\log T_c=8.4$ 辺りで急に傾きが垂直になっておりこれがヘリウム燃焼中の一般相対論的不安定性の発動を示している。この垂直部分と $\dot{M}=0.1$ の曲線の傾きを比較すると後者のほうが収縮が緩やかであることが見て取れる。

これらの結果は過去の研究で求められた一般相対論的不安定性のおきる限界質量の表式と比較することにより大まかに理解できる。星が等エントロピーの構造をしている時 (例えば星が完全対流となっている場合にはこれが実現される) その限界質量は $M_{\text{crit}} \approx 1.6(0.5/\mu) \times 10^5 M_{\odot}$ と求められている。ここで μ は平均分子量で始原ガス (水素の質量比が約 75% で残りがヘリウム) では $\mu \approx 0.6$ で水素が燃え尽きてヘリウム 100% になると $\mu=4/3$ となる。この事から $\dot{M}=0.1$ の場合は星の質量が足りず不安定がおきない、また $\dot{M}=0.3-1.0$ の場合は水素燃焼時には限界質量に達していないが水素が燃え尽き μ が増えることによって限界質量が低下し一般相対論的不安定性が発動したと考えられる。

$\dot{M}=10$ の場合には水素が燃え尽きる前に一般相対論的に不安定になった。これは降着が速いため、水素が燃え尽きるよりコアが成長して限界質量に達する時間の方が速かったと考えられる。以下図 2 を用いて不安定性の発動の仕方をより詳細に説明する。

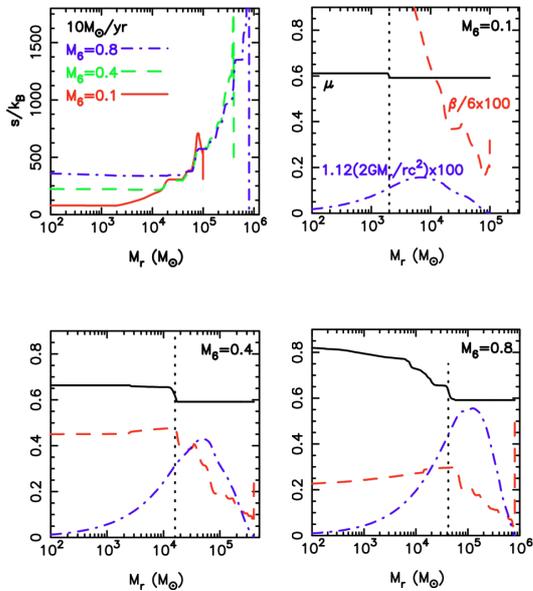


図2: $\dot{M}=10$ のモデルに対するエントロピー分布(左上図)とその他の物理量の分布の時間進化(その他の図)。横軸は星の質量座標で左上図では星の全質量($M/10^6 M_{\odot}$)が0.1, 0.4, 0.8の時をまとめて、他の図は星が各々の質量である時の分布である。縦の黒点線は等エントロピーコアの質量座標を表す。黒実線は μ の分布。

まず左上の図は星の全質量が $M_6=M/10^6 M_{\odot}$ の時のエントロピー分布を示しているが、このように降着星のエントロピー分布は一様ではなく等エントロピーコアの周りに高エントロピー外層を持つ構造になっている。そのため上記の限界質量よりも重い星でも一般相対論的な不安定性を起こさない。近似的には等エントロピーコアの大きさが限界質量に達したときに不安定となると考えて良いため、その他の図では μ の分布の他、縦点線で大体等エントロピーであるコアの質量座標を示している。

しかしこの図からわかるように進化の進んだモデルではコア内の μ の分布が一様でなく上記の限界質量の表式では不安定性の発動をうまく表現できない。そこで他の表式を用いるが、それはポリトロップ解の安定性を議論したもので安定条件は $\beta/6 > 1.12(2GM/Rc^2)$ と書ける。ここで β は全圧に対するガス圧の比で図2の赤ダッシュ線で示しているように巨大質量星では小さい値で放射圧優勢となっている。右辺は M/R (R は星の半径) に比例し重力の強さに対応している。

は大体エントロピーに反比例し星の質量とともに減少するが、 β が完全に一定である星は $n=3$ のポリトロップになるという性質があるため、等エントロピーコアは概ねポリトロップで近似でき上記の安定条件を目安として用いることができる。そこで図2においては $1.12(2GM_r/rc^2)$ を M_r の関数として青線で表示し赤線と青線の大小関係を等エントロ

ピーコアの上端で見ることにより一般相対論的な不安定性が起きているかどうかを見るときにも数値計算の結果の妥当性を議論した。

数値計算では急激な崩壊が $M_6=0.8$ の時に起きたが、図2を見ても実際 $M_6=0.4$ の時は等エントロピーコアの上端で赤線が青線より明らかに上にあり安定であることを示す一方、 $M_6=0.8$ の場合には黒点線の場所で逆転が見られる。このことから数値計算の結果は妥当であると結論できる。

(3) これらの星は崩壊後爆発するかしませんか？

そもそもこのような重い星は爆発するはずがなく調べるまでもなくブラックホールを形成するはずだと普通は考えるであろうが、似たようなケースで爆発する場合としてペア不安定型超新星というものがある(大体 $140-270 M_{\odot}$ の星になる)。これは中心に酸素が残っている段階で崩壊した星が急激な核燃焼によって爆発するものである。実際近年 $M_6=0.055$ の星はこのようにして爆発したという論文が出ている。

しかし今回の \dot{M} が 0.1, 0.3, 1.0, 10 のモデルはどれも爆発する兆候が全くなかった、すなわち核燃焼エネルギーは重力エネルギーより遥かに小さかった。それでも今回の結果はポストニュートニアン近似のコードを崩壊後もそのまま使ったものであり、星が崩壊した後の強い重力を正確に扱うには一般相対論をより完全に取り入れた計算が必要である。また、 \dot{M} を詳細に選ぶことにより最終コア質量が $M_6=0.055$ に近いモデルを計算し、こういう星が本当に爆発するのかどうか調べることも将来必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

H. Umeda, T. Hosokawa, K. Omukai, N. Yoshida, “The Final Fates of Accreting Supermassive Stars”, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, 830, 2016, L34-L38
DOI: 10.3847/2041-8205/830/2/L34

M. Shibata, Y. Sekiguchi, H. Uchida, H. Umeda, “Gravitational waves from supermassive stars collapsing to a supermassive black hole”, *Physical Review D*, 査読有, 94, 2016, id.021501
DOI: 10.1103/PhysRevD.94.021501

T. Yoshida, K. Takahashi, H. Umeda, K. Ishidoshiro, “Supernova neutrino

events relating to the final evolution of massive stars”, Physical Review D, 査読有, 93, 2016, id.123012
DOI: 10.1103/PhysRevD.93.123012

K. Takahashi, T. Yoshida, H. Umeda, K. Sumiyoshi, S. Yamada, “Exact and approximate expressions of energy generation rates and their impact on the explosion properties of pair instability supernovae”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 456, 2016, 1320-1331
DOI: 10.1093/mnras/stv2649

C. Kato, A. Delfan, S. Yamada, K. Takahashi, H. Umeda, T. Yoshida, K. Ishidoshiro, “Pre-supernova Neutrino Emissions from One Cores in the Progenitors of Core-collapse Supernovae: Are They Distinguishable from Those of Fe Cores?”, The Astrophysical Journal, 査読有, 808, 2015, id.168
DOI: 10.1088/0004-637X/808/2/168

Y. Suwa, T. Yoshida, M. Shibata, H. Umeda, K. Takahashi, “Neutrino-driven explosions of ultra-stripped Type Ic supernovae generating binary neutron stars”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 454, 2015, 3073-3081
DOI: 10.1093/mnras/stv2195

〔学会発表〕(計 4 件)

梅田秀之, “重力波源となるブラックホールのスピン進化と BZ 機構”, 日本天文学会 2016 年秋季年会, 2016/9/14~9/16, 愛媛大学 (愛媛県松山市)

梅田秀之, “Recent progress in supernova progenitor theories”, International Symposium on Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research, 招待講演, 国際学会, 2016/5/11~5/13, 東京大学 (東京都文京区)

梅田秀之, “急速降着により形成された超巨大質量星の進化と一般相対論的重力崩壊”, 「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第 3 回ワークショップ, 2015/10/17~10/18, 甲南大学 (兵庫県神戸市)

梅田秀之, “急速降着により形成された超巨大質量星の進化と一般相対論的重力崩壊”, 初代星 - 初代銀河研究会 2015, 2015/11/30~12/02, 草津セミナーハウス (群馬県吾妻郡)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等
<http://tron.astron.s.u-tokyo.ac.jp/~umeda/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梅田 秀之 (UMEDA, Hideyuki)
東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号 : 60447357

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :

(4) 研究協力者

()