

球状星団における中間質量ブラックホールの成長

The growth of Intermediate-mass black holes in globular cluster

○山口 陽太郎 岩本 宏一

Youtarou Yamaguti Kouichi Iwamoto

Abstract: Active galaxies, quasars, and other galaxies have strong X-ray sources in their central parts. The luminosities exceed $10^{39} \text{erg s}^{-1}$, indicating that there are super massive black holes (SMBHs) in the galaxies. Their masses are estimated to be $\sim 10^8 M_{\odot}$ (solar masses) through Eddington luminosity. There is a large difference in mass between SMBHs and stellar mass black holes that are formed by normal stars, which are typically $10\sim 50 M_{\odot}$. Intermediate-mass black holes (IMBHs) are thought to give a clue to filling the gap between stellar mass and super massive black holes. Recently, the mass of an IMBH discovered in a globular cluster has been determined with better precision. We study the formation and growth of IMBHs in a globular cluster to see if the mass determined by observations can be explained in this scenario.

1. はじめに

活動銀河やクエーサーを始めとした多くの銀河の中心核には超巨大質量ブラックホール (SMBH) があることが予測されている。エディントン光度

$$L_E = 4\pi cGM/\kappa_{es}$$

との比較から $10^8 M_{\odot}$ (太陽質量) の質量を持つことが推定されている[1]。しかし、恒星が超新星爆発により形成するブラックホールは $50 M_{\odot}$ 程度と SMBH の質量とは大きな隔たりがあり、その形成過程には多くの謎がありました。有力な説としては、中間質量ブラックホール (IMBH) の合体、銀河中心への落下が挙げられる。IMBH は球状星団など高密度の星団中で形成されると考えられ、長年探索が続けられてきた。最近、小球星団 47 Tucanae の深い位置に発見された IMBH 候補天体の質量に対し強い制限が与えられた。星団中のパルサーの位置と加速度の情報から、質量は $2200 M_{\odot}$ 程度とこれまでにない少ない誤差で推定されている[2]。本研究の目的は、ブラックホールへの質量降着率、星団の初期条件などを設定することで、47 Tucanae に発見された IMBH が実際に形成されるかどうかを、解析的な考察やシミュレーションによって確認することである。

2. 中間質量ブラックホールの形成

小球星団には大小様々な天体があり重力系を形成している。それらはお互いの重力によって運動量を交換したり、星団内のガスとの摩擦によって速度を失ったりして緩和していく。その過程でより重たい天体は相互作用で角運動量を渡していき、自身は小球星団の深部へと沈んでいく(本研究では恒星質量の BH が優先して落ちていくと考える)。このようにして星団の中心に重たい BH が集まりそれらが連星系を作り、これを

繰り返していくことで更に中心は質量の大きい BH が密集していく。その結果、BH の衝突、合体が多数回繰り返されると考えられる[5]。

質量が M である BH が中心に沈んでいく時間は $t = \langle m \rangle / M \times t_r$ として見積もることができる。ここで、 $\langle m \rangle$ は星団の天体の平均質量、 t_r は星団の半分の質量の緩和時間である。典型的な星団の値として、 $\langle m \rangle = 0.4\sim 0.6 M_{\odot}$ 、 $t_r = 10^7\sim 10^8 \text{yr}$ と与えられる。この値から BH が銀河中心に沈み重力ポテンシャルの深部で BH 連星系を作りだすまでの時間は $t = 10^6 \text{yr}$ 程度と推定できる。宇宙年齢や球状星団の年齢と比べても十分短く、形成は可能と考えられる。これは最も重たい天体を BH 連星と考えれば更に早く沈み重力系を形成できることを意味している。

星団中心に沈んだ BH は合体だけでなくガスの降着により質量を増加させることも考えられる。上記の過程では、重たい天体程より深く中心に落ち込んでいくことになり、中心は外部に比べより密度も高くなると考えられる。その結果、ガスもまたより多く集まると想定される。このシナリオでは、BH の初期質量は $10\sim 50 M_{\odot}$ であるが、 $10^3 M_{\odot}$ 程度の IMBH になるまで成長することもできると考えられる。このようにして成長した BH は中心部の衝突や運動量の交換などに影響をより大きく与えるようになり合体に影響を及ぼす。

3. 力学の基本方程式

ブラックホールの運動を計算する上で本研究では以下の運動方程式を用いる[4]。

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \sum_j^N \left\{ -Gm_j \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^3} + \mathbf{a}_{PN,ij} \right\} + \mathbf{a}_{acc,i} + \mathbf{a}_{DF,i}^{gas} + \mathbf{a}_{pot,i}$$

ここで r_i と r_j はそれぞれ i 番目と j 番目の BH の位置、 N は BH の総数、 G は万有引力定数、 m_j は j 番目の BH の質量である。 $a_{acc, i}$ と $a_{DF, i}^{gas}$ と $a_{pot, i}$ はそれぞれ、ガス降着、ガスとの動摩擦、ガスの重力ポテンシャルによる補正項（単位質量あたりの力）である。それぞれ、

$$\begin{cases} a_{acc, i} = -\frac{\dot{m}_i v_i}{m_i} \\ a_{DF, i}^{gas} = -4\pi G^2 m_i m_H n_{gas}(r) \frac{v_i}{v_i^3} \times f(M_i) \\ a_{pot, i} = -\frac{4}{3} \pi G m_H n_{gas} r_i \end{cases}$$

と表される。ここで m_H は水素原子核の質量、 n_{gas} はガスの密度、 v_i は i 番目 BH の速度、 \dot{m}_i は i 番目の BH の臨界質量降着率で ϵ を降着効率としてホーリー・リットリトン降着から

$$\dot{m}_i = \epsilon \frac{4\pi G m_H n_{gas} m_i^2}{(C_s^2 + v_i^2)^{3/2}}$$

と表される。ここで、 C_s は音速である。また $f(M_i)$ として[3]による式を用いる。

$a_{PN, ij}$ は j 番目の BH が i 番目の BH に及ぼす相対論的な加速度の補正である。計算にはポスト・ニュートン近似の 2.5 項[3]までを用いる。1 項と 2 項は赤方偏移による、2.5 項は重力波の放出による加速度の補正である。

3. パラメーターの設定

小球星団における BH の成長過程において重要になるパラメーターの一つは、ブラックホールの初期密度である。典型的な小球星団での BH の広がりを見込んで 0.01~0.1pc を初期条件としてシミュレーションしていくとする。

また、ガスの数密度 n_{gas} も重要なパラメーターとなる。銀河系円盤にあるガスの塊から少なくとも 10^8cm^{-3} と推定される。本研究では、小球星団の中心部 ($r=0.01\text{pc}$) はこれより高い密度を想定し、 $10^8 \sim 10^{10} \text{cm}^{-3}$ の値を仮定する。また中心部には常に小球星団の外や銀河円盤からガスが供給されると考えられる。半径 0.01pc の球内にはその結果 $M_{gas} = 10^5 M_\odot$ 程度の質量のガスが満ちており、BH はこの外のガスには影響を及ぼさないと仮定する。

最後に BH が合体するときの距離（間隔）を決める必要がある。BH はその質量の大きさから光速でも脱出できないシュバルツシルト半径を持っており、その大きさは $r_s = 2Gm_i/c^2$ である。本研究では二つの BH の距離が $|r_i - r_j| = 100(r_{s,i} - r_{s,j})$ となったところで二つ

の BH は相互に脱出できなくなり合体したとみなすことにする。

4. BH 成長シナリオ

2 節で星団中心に IMBH を形成する一つのシナリオを紹介した。しかし、合体の進行や降着率などによっては、必ずしも IMBH ができるとは限らない。個々の観測された小球星団ごとに、いくつかの成長シナリオを考えていく必要がある。大まかに、以下の二つのシナリオがあると考えられる[5]。一つ目は著しい降着は起こらず、中心部で同質量程度の BH が連星系を作り合体していくというシナリオである。10~50 M_\odot の恒星質量 BH がどの程度の時間をかけて合体し IMBH を形成するかを調べていきたい。もう一つは中心の BH がガス降着によって質量を増した状態で合体が始まる場合である。この場合では、 $M_{BH} > 10^3 M_\odot$ の初期質量の BH の周りに恒星質量 BH が集まり、重力系を作り IMBH を作ることを計算していきたいと考えている。

パラメーターを変化させて、発見された小球星団 47Tucanae の 2200 M_\odot の IMBH が形成できるモデルを調べていくことが目標である。

4. 今後の展望

IMBH の計算を終えたならば、更に SMBH へと至る計算や理論も調べていきたいと考えている。スケールが銀河になり、距離、質量、密度、そして時間などが大きく変わることを考慮して検討していきたい。

5. 参考文献

- [1] 福江 純 「輝くブラックホール降着円盤」プレアデス出版
- [2] Bülent K., Holger B., Abraham L., 2017 An intermediate-mass black hole in the center of the globular cluster 47 Tucanae
- [3] H.Tagawa, M.Umehara, N.gouda, T.Yano, Y.Yamai Early cosmic merger of multiple black holes
- [4] H.Tagawa, M.Umehara, N.gouda, Mergers of accreting stellar-mass black holes
- [5] M.Coleman M., Douglas P.H., 2001 production of intermediate-mass black holes in globular clusters