

## 古在機構と連星合体

岩佐 真生 (京都大学 理学研究科)

### Abstract

銀河は多数の衝突を繰り返して現在の形になったと考えられている。また銀河核には SuperMassive Black Hole(SMBH) が存在しており、銀河衝突の際に形成される SMBH 連星は LISA などの重力波観測において有望な重力波源となっている。ここでは銀河衝突が連続して起こるときに形成される可能性のある SMBH からなる階層的 3 体を考えその軌道進化を計算した。

階層的 3 体と呼ばれる系には内連星の離心率と軌道傾斜角が振動する古在機構と呼ばれる現象が存在する。この機構が働くと内連星の合体時間は働かなかった場合に比べて、factor30 程度短くなることがわかった。本発表は Blaes et al (2002) のレビューである。

## 1 Introduction

多くの銀河核には SMBH が存在していると考えられている。この銀河核が他の銀河核と衝突を起こして形成される SMBH 連星は有望な重力波源となっており、将来 LISA などにより観測されると期待されている。

連星合体で問題になってくるのは宇宙年齢以内に合体が起きるかどうか、である。そのため SMBH 連星が重力波放出して合体できるくらいに短い軌道長半径を実現する必要がある。そのプロセスとしては、(1) 周囲に存在する星との相互作用によりエネルギーを渡して短くする、(2) ガスと相互作用して短くする、などが考えられる。しかしこれらの過程は複雑であり、どの程度軌道長半径を短くできるかは不明確である。

そのためここでは別のシナリオを考える。重力波放出による合体のタイムスケールは離心率を  $e$  とすると

$$t_{GW} \propto (1 - e^2)^{3.5} \quad (1)$$

となっているので、離心率が大きな連星ほど早くに合体することがわかる。そこで今回考える連星合体のシナリオは、2つの銀河が衝突しているところにもう一つ銀河が衝突してきて、SMBH からなる階層的 3 体が形成され内連星が合体する、というものである。階層的 3 体において内連星と外連星との軌道傾斜角がある程度大きな値をとると古在機構と呼ば

れる現象が起こる。古在機構とは内連星の離心率と軌道傾斜角がある振幅で振動する現象である。この機構が働くと離心率を 1 付近の値まで大きくすることができる。当然ながら、離心率の大きな状態にどの程度の時間滞在するかによって合体の時間は変化するが、古在機構が働かない場合に比べて合体時間が短くなることが予想される。

## 2 Methods

今回考える階層的 3 体は、3つの SMBH の質量を  $m_0, m_1, m_2$  とすると、 $m_0 - m_1$ 、 $(m_0 - m_1)$  の重心)  $- m_2$  と二つの連星と見なすことの出来る系であり、各々の連星は Kepler 軌道である。(図 1 参照。)

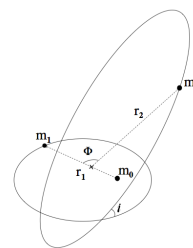


図 1: 本計算における座標系

今回計算に用いるハミルトニアンは Ford, E.B. et al (2000) に記載されているものに加え、内連星のみ重力波放出を考慮したものを使用する。このとき  $a_i$  を軌道長半径、 $e_i$  を離心率、 $g_i$  を近点への偏角とし

( $i = 1$ : 内連星、 $i = 2$ : 外連星)、 $H$  を全角運動量とすると運動方程式は

$$\frac{da_1}{dt} = -\frac{64G^3m_0m_1(m_0+m_1)}{5c^5a_1^3(1-e_1^2)^{7/2}}\left(1+\frac{73}{24}e_1^2+\frac{37}{96}e_1^4\right) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dg_1}{dt} = & 6C_2\left\{\frac{1}{G_1}[4\theta^2+(5\cos 2g_1-1)(1-e_1^2-\theta^2)]\right. \\ & +\frac{\theta}{G_2}[2+e_1^2(3-5\cos 2g_1)]\left.\right\}+C_3e_2e_1 \\ & \times\left(\frac{1}{G_2}+\frac{\theta}{G_2}\right)\{\sin g_1\sin g_2 \\ & [A+10(3\theta^2-1)(1-e_1^2)]-5\theta B\cos\phi\} \\ & -C_3e_2\frac{1-e_1^2}{e_1G_1}[10\theta(1-\theta^2)(1-3e_1^2) \\ & \sin g_1\sin g_2+\cos\phi(3A-10\theta^2+2)] \\ & \frac{3}{c^2a_1(1-e_1^2)}\left[\frac{G(m_0+m_1)}{a_1}\right]^{3/2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{de_1}{dt} = & 30C_2\frac{e_1(1-e_1^2)}{G_1}(1-\theta^2)\sin 2g_1 \\ & -C_3e_2\frac{1-e_1^2}{G_1}[35\cos\phi(1-\theta^2)] \\ & \times e_1^2\sin 2g_1-10\theta(1-e_1^2)(1-\theta^2) \\ & \cos g_1\sin g_2-A(\sin g_1\cos g_2- \\ & \theta\cos g_1\sin g_2)]- \\ & \frac{304G^3m_0m_1(m_0+m_1)e_1}{15c^5a_1^4(1-e_1^2)^{5/2}} \\ & \times\left(1+\frac{121}{304}e_1^2\right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{da_2}{dt} = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dg_2}{dt} = & 3C_2\left\{\frac{2\theta}{G_1}[2+e_1^2(3-5\cos 2g_1)]\right. \\ & +\frac{1}{G_2}[4+6e_1^2+(5\theta^2-3)(2+3e_1^2 \\ & -5e_1^2\cos 2g_1)]\left.\right\}-C_3e_1\sin g_1\sin g_2 \\ & \times\left\{\frac{4e_2^2+1}{e_2G_2}10\theta(1-\theta^2)(1-e_1^2)\right. \\ & -e_2\left(\frac{1}{G_1}+\frac{\theta}{G_2}\right)[A+10(3\theta^2-1) \\ & \times(1-e_1^2)]\left.\right\}-C_3e_1\cos\phi \\ & \times\left[5B\theta e_2\left(\frac{1}{G_1}+\frac{\theta}{G_2}\right)+\frac{4e_2^2+1}{e_2G_2}A\right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{de_2}{dt} = & C_3e_1\frac{1-e_2^2}{G_2}[10\theta(1-\theta^2)(1-e_1^2) \\ & \times\sin g_1\cos g_2+A(\cos g_1\sin g_2- \\ & \theta\sin g_1\cos g_2)] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dH}{dt} = & -\frac{32G^3m_0^2m_1^2}{5c^5a_1^3(1-e_1^2)^2}\left[\frac{G(m_0+m_1)}{a_1}\right]^{1/2} \\ & \times\left(1+\frac{7}{8}e_1^2\right)\frac{G_1+G_2\theta}{H} \end{aligned} \quad (8)$$

(3) と異なる。ここで

$$G_1 = m_0m_1\left[\frac{Ga_1(1-e_1^2)}{m_0+m_1}\right]^{1/2} \quad (9)$$

$$G_2 = (m_0+m_1)m_2\left[\frac{Ga_2(1-e_2^2)}{m_0+m_1+m_2}\right]^{1/2} \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{Gm_0m_1m_2}{16(m_0+m_1)a_2(1-e_2^2)^{3/2}}\left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2 \quad (11)$$

$$C_3 = \frac{15Gm_0m_1m_2(m_0-m_1)}{64(m_0+m_1)^2a_2(1-e_2^2)^{5/2}}\left(\frac{a_1}{a_2}\right)^3 \quad (12)$$

$$B = 2+5e_1^2-7e_1^2\cos 2g_1 \quad (13)$$

$$A = 4+3e_1^2-\frac{5}{2}(1-\theta^2)B \quad (14)$$

$$\theta = \cos i \quad (15)$$

$$\cos\phi = -\cos g_1\cos g_2-\theta\sin g_1\sin g_2 \quad (16)$$

であり、 $G_1$ 、 $G_2$  はそれぞれ内連星、外連星の軌道角運動量を表し、 $i$  は内連星、外連星間の軌道傾斜角を表す。

### 3 Results

今回の計算では SMBH の質量は、 $m_0 = 2 \times 10^6 M_\odot$ 、 $m_1 = 10^6 M_\odot$ 、 $m_2 = 10^6 M_\odot$ 、とした。また初期条件は、 $a_1 = 3.16 \times 10^{-3} pc$ 、 $a_2 = 10a_1$ 、 $e_1 = 0.1$ 、 $e_2 = 0.1$ 、 $i = 80^\circ$ 、 $g_2 = 90^\circ$ 、とし  $g_1$

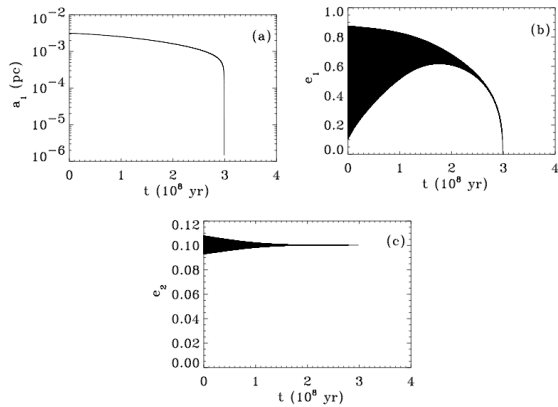


図 2: 初期  $g_1 = 0^\circ$  における (a) $a_1$ , (b) $e_1$ , (c) $e_2$  の進化

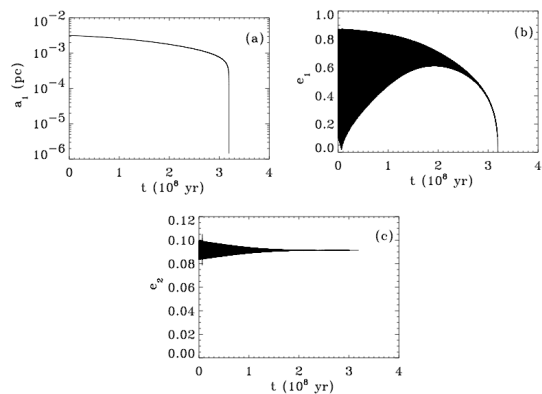


図 3: 初期  $g_1 = 90^\circ$  における (a) $a_1$ , (b) $e_1$ , (c) $e_2$  の進化

に関しては、 $g_1 = 0^\circ$ 、 $g_1 = 90^\circ$  の 2 つの場合に関して計算した。またこの初期条件のもと古在機構が働かない場合の重力波放出による連星合体の時間は  $t_{merge, binary} = 9.3 \times 10^9 \text{ yr}$  である。以下ではこの初期条件のもと計算した結果について述べていく。

図 2、図 3 を見てみると factor 程度の違いはあるけれども、 $t_{merge} \approx 3 \times 10^8 \text{ yr}$  で合体していることがわかる。このように古在機構が働くことで連星合体の時間が短くなるのがわかる。

$e_1$  の時間発展について見比べてみると、 $g_1 = 90^\circ$  のほうでは進化の初期段階で  $e_1$  の値が 0 付近まで小さくなっており、振る舞いが異なる。これは  $(e_1, g_1)$  で記述される位相空間での軌跡を見ることで理解できる。図 4 の (a) をみると進化の初期段階から位相空間内を回転しているが、(b) では初期段階では秤動

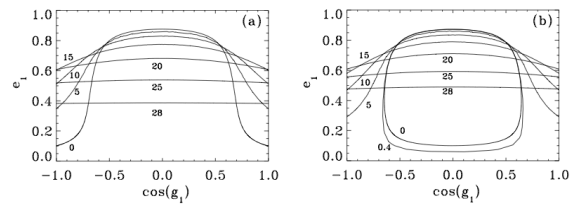


図 4:  $e_1$  と  $\cos g_1$  の位相空間における軌跡のスナップショット。(a) は  $g_1 = 0^\circ$ , (b) は  $g_1 = 90^\circ$  の時の軌跡を表す。各々の軌跡は  $10^7 \text{ yr}$  で規格化した時間でラベルされる。

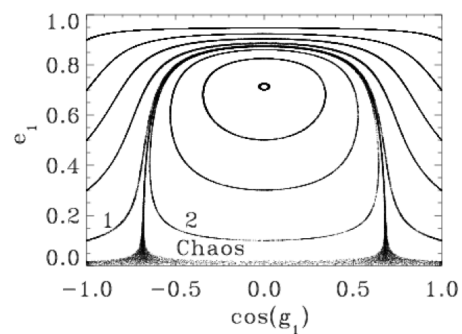


図 5:  $e_1$  と  $\cos g_1$  の位相空間における軌跡。(重力波の効果は除く)

を起こしており、時間経過とともに回転へと遷移している。これは、重力波の効果により  $e_1$  の最小値が減少し、separatrix を超えるところで秤動から回転へと遷移している。図 5 をみると  $e_1$  が非常に小さいところでカオス的になり、separatrix を超え得ることがわかる。

## 4 Conclusion

古在機構が働くことにより内連星の合体時間は短くなるのがわかった。ここでは述べていないが、様々な初期条件について計算が行われており、その多くの場合で合体時間が短くなるのがわかった。

この計算では内連星の重力波放出による合体時間が外連星の重力波放出による合体時間に比べて短い場合を考えているので、外連星については重力波の効果を考えていない。しかし、外連星の合体時間が

2014 年度 第 44 回 天文・天体物理若手夏の学校

短い系の場合は重力波の効果を取り入れなければならぬ。

## Reference

Kozai, Y. 1962, AJ, 67, 591

Blaes, O., Lee, M. H., & Socrates, A. 2002, ApJ, 578, 775

Ford, E. B., Kozinsky, B., & Rasio, F. A. 2000 ApJ, 535, 385