

# 大質量ブラックホールと Extreme Mass Ratio Inspiral における潮汐破壊

岩佐 真生 (京都大学大学院 理学研究科)

## Abstract

古在機構 (または Kozai-Lidov mechanism) は様々な宇宙物理学的現象に適用されてきた (系外惑星、近接連星、重力波源天体 etc)。今回我々は大質量ブラックホール (MBH) と Extreme Mass Ratio Inspiral (EMRI) で構成される階層的三体を考えた。古在機構は一般に非ケプラーポテンシャルにより抑制されることが知られている。今回考える階層的三体においては相対論的効果とそのポテンシャルに対応する。そこで我々は三体を等価に扱う直接三体計算 (ポストニュートン効果を 2.5 次まで含む) を行なった。その結果外側の MBH の落下にともない、内軌道における MBH からの潮汐力が相対的に相対論的効果を上回ることで、内軌道の離心率が急激に増加することがわかった。これにより最終的に内軌道の星は中心の MBH により潮汐破壊される。また、内軌道の進化を位相空間の面積保存に基づいて理解することに成功した。

## 1 Introduction

多くの銀河中心には大質量ブラックホール (以下 MBH) が存在することが観測的に示唆されている。現在の宇宙論によると銀河は衝突・合体により成長したと考えられている。従って銀河の衝突に際して MBH 連星が形成され、最終的に重力波放出により合体すると考えられている。

MBH 連星が形成されたときに、太陽質量程度の星が捕獲されると潮汐破壊が起こることで紫外線/X線の放射が起こることが示唆されている。これは重力波観測におけるカウンターパートになるとともにホスト銀河の特定ができるという点で重要である。

今回は潮汐破壊が起こるチャンネルを検討するために簡単な場合として、合体時に形成される可能性がある MBH- 太陽質量程度の星 (Extreme Mass Ratio Inspiral: EMRI)- MBH の階層的三体系を考えた。階層的三体には古在機構と呼ばれる機構が存在する [1]。この機構は内連星の離心率と軌道傾斜角が時間的に振動する現象である。古在機構が働くと内連星の離心率が 1 程度まで大きくなるので近点距離が短くなる。その結果星は潮汐力により破壊されることが期待される。

しかし古在機構は一般相対論的効果により抑制される。相対論的効果は外天体が遠いほど内連星に優位

に働くので、外天体はある程度内連星に近づかないと古在機構は働かない。

本研究では初期に相対論的効果により古在機構が抑制されており外天体が重力波放出により内連星へと近づいてくる状況を考え、ポストニュートン近似を用いて直接 3 体計算を行なった。その結果外天体が内連星へ近づくことで、内連星の離心率が急激に増加するという現象が起こった。我々はその振る舞いを理解すべく、永年摂動論を用いたモデル化による解析を行ない理解に成功した。また MBH に捕獲されていた星は最終的に潮汐破壊されることがわかった。

## 2 Methods

我々は階層的三体系 ( $m_0$ - $m_1$ )- $m_2$  の間に相対論的効果のみを考え、直接三体計算による数値実験を行なった ( $m_0, m_2$ : MBH,  $m_1$ : 太陽程度の大きさの星)。初期条件は 1) 重力波放出により摂動天体  $m_2$  の軌道が収縮している, 2) 内連星の相対論的最近点移動により古在機構が抑制されている状況に設定する。

以後我々は幾何単位系  $c = G = m_0 + m_1 + m_2 = 1$  を使用し、内・外の軌道要素に関して  $j=1, 2$  とラベルし、 $a_j$ : 軌道長半径,  $e_j$ : 離心率,  $g_j$ : 近点引数と表し、また 2 つの軌道面のなす角を  $i$  と表す。また議論を

簡単にするため質量を  $m_0 = 0.3, m_1 = 0.3 \times 10^{-6}, m_2 \simeq 0.7$  と固定する。

我々は三体の運動を直接追跡するために、2.5 次のポストニュートン項まで考慮した ADM ハミルトニアン  $\mathcal{H}_{\text{ADM}} = \mathcal{H}_{\text{N}} + \mathcal{H}_{1\text{PN}} + \mathcal{H}_{2\text{PN}} + \mathcal{H}_{2.5\text{PN}}$  より得られる運動方程式を用いた。ここで  $\mathcal{H}_{\text{N}}, \mathcal{H}_{1\text{PN}}, \mathcal{H}_{2\text{PN}}$  はそれぞれニュートン, 1 次のポストニュートン, 2 次のポストニュートン項である。 $\mathcal{H}_{2.5\text{PN}}$  は重力波放出による最低次の散逸項である。

数値積分を行なう上で我々は adaptive time-step control を用いて 4 次の Runge-Kutta 法を適用した。今回我々は  $m_0$ - $m_1$  間の瞬間的な距離が  $10m_0$  となった時に計算を終えている。

我々は次の 3 つの系 s-I, s-II, s-III の進化を追った。それぞれの初期条件は、s-I [  $e_{1,i} = 0.001, a_{2,i} = 6300, e_{2,i} = 0.0001$  ], s-II [  $e_{1,i} = 0.001, a_{2,i} = 6300, e_{2,i} = 0.3$  ], s-III [  $e_{1,i} = 0.3, a_{2,i} = 5700, e_{2,i} = 0.0001$  ] とした。またその他の軌道要素は  $a_{1,i} = 400, g_{1,i} = \pi/2, g_{2,i} = 0$  と共通して設定し、初期の軌道傾斜角  $i$  は内連星の  $z$  軸方向の角運動量  $J_1 \equiv \sqrt{1 - e_{1,i}^2} \cos i = 0.150$  となるように決めた ( $i \sim 80^\circ$ )。我々の主な関心は内側の離心率  $e_1$  の異なった 2 つの系 s-I, s-III であり s-II は外側の離心率  $e_2$  の影響を見るために取り上げた

### 3 Results

直接三体計算の結果、外天体があるクリティカルな軌道長半径を通過すると内連星の離心率が増加に転じる特徴的な現象が起こった。その結果外天体が内連星に近づくにともない離心率がどんどん増加し、最終的に潮汐破壊されることがわかった。またその内連星の離心率の振る舞いを理解するために我々は永年摂動論にもとづき解析を行なった。その結果位相空間内の面積を保存しながら系は進化していることがわかった。

### 4 Conclusion

我々は MBH-EMRI で構成される階層的三体の進化を直接計算により追跡した。その結果内連星の星

が太陽程度の質量・大きさの場合潮汐破壊が起こることが分かった。また直接三体計算の結果を永年摂動論にもとづくハミルトニアンを用いて解析を行なったところ、位相空間内の面積を保存しながら個々の軌跡は進化していることがわかった。また本講演における内容は現在執筆中の論文の内容のため、図や詳細な説明は割愛させていただく。

### Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

### Reference

- [1] Y. Kozai, *Astron. J.* **67**, 591 (1962); M. L. Lidov, *Planet.Space Sci.*, **9**, 719 (1962).