

論文の内容の要旨

論文題目

Evolution of Supermassive Black Hole Binaries in
Galactic Center
(銀河中心領域における大質量ブラックホール連
星の進化)

氏名 岩澤全規

現在、多くの銀河中心領域において $10^6 - 10^9 M_{\odot}$ の大質量ブラックホール (SMBH) が存在すると考えられている。このSMBHを持つ銀河同士が衝突し合体した場合、SMBHは力学的摩擦により銀河中心へ沈みSMBH連星系を形成する。この連星が重力波放出により合体する事が可能ならば、銀河の合体によってSMBHは成長する事が出来る(合体説)。この合体説を用いることで現在観測的に知られている「大きな銀河程、大きなSMBHを持つ」(Magorrian et al. 1998; Marconi & Hunt, 2003) という関係は説明される。しかし、SMBH連星の合体はタイムスケールの点から現実的ではないとされてきた。

最初のSMBH連星についての論文(Begelman, Blandford & Rees 1980)によると、SMBH連星は星と相互作用をする事によって、連星間の距離を縮めて行くがやがてloss-coneの内側に有る星が少なくなり、連星の進化は遅くなって行く(loss-cone depletion)。loss-cone内に星を供給するメカニズムとして星同士の相互作用による2体緩和による効果が考えられるが、このタイムスケールを見積もるとハッブルタイムより長くなって

しまう。

loss-cone depletion が実際に起こるかどうかを調べるため、 N 体シミュレーションが行われて来た。理論的には、進化のタイムスケールは N に比例するはずだが、シミュレーションではその様な関係は得られていなかった。しかし、近年 Makino & Funato (2004) は、長時間、大粒子数 (100 万個) のシミュレーションを行い、進化のタイムスケールが N に比例し、理論的予測と無矛盾であると結論した。Berczik, Merritt & Spurzem (2005) も粒子数が 40 万個程度のシミュレーションを行い同様の結果を得ている。つまり、星との相互作用と重力波放出の効果を考えただけでは、一旦 **loss-cone** 内の星が無くなってしまうと、**SMBH** 連星は宇宙年齢内には合体出来ないということが分かった。

過去に行われたほとんどの N 体シミュレーションでは、**SMBH** を等質量、銀河を軸対称としていた。しかし、多くの銀河はある程度非軸対称構造を持っていると考えられており、**SMBH** が等質量という事もありえない。そこで、本研究では、非軸対称銀河中での **SMBH** 連星の進化、**SMBH** が非等質量の場合の **SMBH** 連星の進化について調べた。

1. 三軸不等銀河中での **SMBH** 連星の進化

銀河が非軸対称構造を持つ場合、軸対称の場合と異なり、星の軌道角運動量が保存しなくなるため、**box orbit**, **chaotic orbit** 等と呼ばれる中心を通る事の出来る軌道 (**centrophilic orbit**) を持つ星の割合が大きくなると考えらる。このため、**SMBH** 連星がエネルギーを与える事の出来る星の割合が増え、**loss-cone depletion** が起こらず、**SMBH** 連星の進化が球対称の場合とは異なり、進化の時間スケールが緩和時間に依存しない可能性がある (Merritt & Poon 2004)。しかし、中心に **SMBH** がある非軸対称銀河では、**SMBH** に星が散乱される事で **centrophilic orbit** が壊され、銀河が軸対称性になる可能性があり (Hozumi & Hernquist 2005)、**SMBH** 連星の進化がどの様になるかは分からない。

そこで、非軸対称銀河中での **SMBH** 連星の進化を N 体シミュレーションによって調べた。一般に非軸対称銀河の分布関数は知られていないので、球対称モデルを **cold collapse** する事で銀河モデルを作った (van Albada 1982)。出来た銀河中に **SMBH** を 2 つ置きシミュレーションを行う。比較の為、密度分布がほぼ同じ軸対称モデルでもシミュレーションを行った。

その結果、非軸対称銀河中では、**centrophilic orbit** の星が連星の進化に大きく影響している事、その為、**loss-cone depletion** が起こらず、**SMBH** 連

星の進化が銀河の緩和時間では決まらない事が分かった。さらに、SMBHの影響で銀河は徐々に軸対称になってしまうが、centrophilic orbitの星は銀河が軸対称になった後には、非常に角運動量が小さく、離心率が高い、loss-cone 領域内の星になる割合が高い事が分かった。その為、銀河が軸対称になってしまった後も、loss-cone depletion が起こりにくい事が分かった。

2. 質量の異なる SMBH 連星の進化

近年のN体シミュレーションから、質量が異なる SMBH 連星の場合は loss-cone depletion により軌道長半径の進化は減速するが、SMBH 連星の離心率は非常に高くなる事が分かった (Matsubayashi et al. 2007)。離心率が上がると、重力波による合体の時間スケールは $(1 - e^2)^{3.5}$ (e は SMBH 連星の離心率) に比例し、非常に離心率依存性が高い為、非常に短い時間スケールで合体する。しかし、何故、離心率が上がるのかは分かっていなかった。

質量の異なる SMBH 連星の N 体シミュレーションを行い、SMBH 連星の軌道進化と周りの星の変化を調べる事で、何故、離心率の成長が起こるのかを解明できた。銀河モデルは、中心には SMBH を置き、密度分布は $\rho \propto r^{-4/7}$ となるようにした (Bahcall & Wolf, 1976)。中心から少し離れた所に中心 SMBH の 1/1000 の質量の BH を置き、円運動になるように初期速度を与えた。

その結果、以下の二つのメカニズムで SMBH 連星の離心率が上がる事が分かった。1. 軽い SMBH の軌道は離心率があれば、軌道の時間平均をとることで、非軸対称ポテンシャル場を作ると考える事が出来る。非軸対称ポテンシャル中では星の角運動量が保存しないので、角運動量はカオス的に変化する。この為、星の軌道の向きが頻繁に入れ替わる (SMBH 連星に対して星の軌道が、順行 → 逆行軌道、逆行 → 順行軌道と変化する)。2. 一般に順行軌道の方が不安定であり、選択的に SMBH 連星から弾き飛ばされやすい。

星の軌道が逆行 → 順行軌道へ変化する事で、バックリアクションとして SMBH 連星は角運動量を失う事になる。この順行軌道へと変化した星が、選択的に SMBH 連星に弾き飛ばされる事により、SMBH 連星の角運動量は、この星によって抜かれたことになる。星の軌道が順行 → 逆行軌道へ変化する場合は、バックリアクションとして SMBH 連星は角運動量を得る事になるが、逆行軌道の星は SMBH 連星に弾き飛ばされにくく、

再び軌道の向きを変える(逆行→順行軌道)事が多い。この為、統計的には、SMBH連星は角運動量を失い、SMBH連星の離心率は高くなる事が分かった。

質量比が1:10程度までのSMBH連星では、離心率が上がる事が分かっており(安, 2008 修士論文)、このメカニズムは多くのSMBH連星に対して有効に働くと考えられる。