

学位論文題名

Dynamical Evolution of a Supermassive Black Hole Binary

(巨大ブラックホールバイナリーの力学的進化に関する研究)

学位論文内容の要旨

研究背景

多くの銀河中心に、太陽質量の 10^6 倍以上の質量をもつ巨大ブラックホール(以下SMBH)があることが観測から示唆されている。これらのSMBHの形成・成長メカニズムやプロセスは未だに明らかにされておらず、現在、大変重要な研究課題となっている。最近の観測により、SMBHの質量と銀河バルジの質量に相関があることがわかっており(Marconi & Hunt 2003)、このことはSMBHと銀河が共進化していることを示している。この共進化を説明できるSMBHの成長メカニズムとして、SMBH同士の合体が重要な役割を果たしていると考えられている。

SMBHの合体プロセスは、SMBHをもつ銀河が衝突合体した後、それぞれのSMBHが周りの星から受ける力学的摩擦によって角運動量を失い、銀河中心に落ち、最終的に重力波を放出することによってエネルギーを失って合体すると考えられている。しかしながら、これまでの研究からSMBHの合体にはloss cone depletion問題により、合体が宇宙年齢以内に起こらないことが指摘されている(Begelman et al. 1980, Makino & Funato 2004)。Loss cone depletion問題とは、SMBHが周りの星によって角運動量を失う一方で、周りの星は角運動量を得るため、銀河中心領域を通過する星が少なくなり、その結果、SMBHは銀河中心領域で力学的摩擦を受けにくく、お互いが宇宙年齢以内に重力波を放出して衝突合体できる半径まで近づけないという問題である。このことが現在大きな問題となっている。

我々はこの問題を解決するために、矮小銀河がバイナリーを持つ宿主銀河に衝突合体(以下minor merger)する影響を考えた。Minor mergerが起こると、銀河中心領域のポテンシャルが歪み、星の軌道が歪む。その結果、多くの星が銀河中心領域を通過することができるようになる。これらの星はSMBHと重力相互作用をすることが期待できる。また、矮小銀河が銀河中心領域を通る場合、矮小銀河の星もSMBHと重力相互作用をされると考えられる。その結果、SMBHがこれらの星から力学的摩擦を受け、お互いの距離を急速に縮めることができると考えた。本研究では、高精度N体シミュレーションを用いて、この可能性を調べた。

研究方法

矮小銀河の衝突がバイナリーの合体に与える影響を調べるため、高精度N体シミュレーションをおこなう。シミュレーション手順は、まず宿主銀河の中心領域にSMBHバイナリーをおき、

ホスト銀河の星とSMBHバイナリーの運動を計算する。この計算でloss cone depletionが起った後、ホスト銀河に矮小銀河を衝突させる。

シミュレーションモデルについて述べる。ホスト銀河の密度分布を King model で与え、その全質量を $1 (10^{10} M_{\odot})$ 、ビリアル半径を $1 (239 \text{ pc})$ とする。これらを 100000 体の N 体粒子を用いて表す。SMBH バイナリーとして、それぞれの SMBH の質量を 0.01 とし、初期の軌道は円軌道とする。矮小銀河の密度分布を King model で与え、質量を 0.1 とする。どのような矮小銀河モデルのとき、バイナリーの力学的進化に効果的に影響を与えるのかを調べるため、様々なコンパクトで計算をおこなう。また、様々なインパクトパラメータで計算をおこなう。

シミュレーション方法について述べる。この計算では、巨大ブラックホールの運動を精度よく解く必要がある。そこで力学的摩擦時間積分方法として、4 次のエルミート法を用いる。このスキームは高精度であり、エネルギー誤差の溜まり方が他のスキームと比べて溜まりにくいことが確かめられている。また、自己重力の計算を高速におこなうために、重力計算専門のハードウェア GRAPE-6 を用いる。

計算結果

コンパクトな矮小銀河がインパクト衝突したときの semi-major axis の結果を図 1 に示す。矮小銀河が最初にバイナリーの中心領域を通るとき ($T=25.9$) から、矮小銀河の衝突を考慮しない場合と比較して semi-major axis が急速に縮んでいることがわかる。この理由としてバイナリーと十分に重力相互作用できる星粒子が増えていることが考えられる。図 2、3 は矮小銀河がバイナリー中心を通過した直後 ($T=25.8$) のホスト銀河の星粒子の分布 (図 2) と矮小銀河の星粒子の分布を (J, E) 平面で見たものである。ここで、J は単位質量当たりの角運動量、E は単位質量当たりの binding energy である。loss cone depletion が起きているとき ($T=25$) のホスト銀河の星粒子の分布と比較すると、バイナリーと重力相互作用できる小さい J、低い E をもつホスト銀河の星粒子が増え、矮小銀河の星粒子もこうした粒子が多くあることがわかる。SMBH がこれらの星粒子から力学的摩擦を受け、バイナリーの semi-major axis が急速に縮まると考えられる。

また、矮小銀河が上のモデルより密度が $1/8$ のとき、上の場合より縮む割り合いは半分であるが、バイナリーの距離が急速に縮むことが示された。また、インパクトパラメータを与えた場合、矮小銀河がホスト銀河の星から受ける力学的摩擦によってバイナリー近くに落ちた後、上の場合と同等の割り合いでバイナリーの距離が急速に縮むことが示された。

まとめと考察

我々は、loss cone depletion 問題を解決するために、矮小銀河とホスト銀河の合体を考慮して研究をおこなった。N 体シミュレーションの結果、コンパクトな矮小銀河が合体すると、バイナリーの距離が急速に縮むことが示された。また、その縮まる割り合いから合体の時間スケールを見積もると 10^{6-7} yr で、これは宇宙年齢に比べて非常に短い時間である。また、初期宇宙において、コンパクトな矮小銀河の衝突は頻繁に起こることが期待されるため、このプロセスが SMBH バイナリーの力学的進化にとって大変重要であると考えられる。

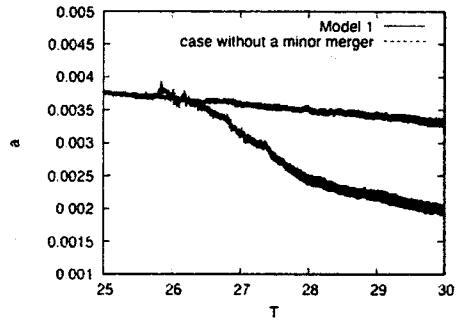


図 1、SMBH バイナリーの semi-major axis の時間変化。赤い線が矮小銀河の合体を考慮した場合、緑の線がそれを考慮しない場合の結果を示す。

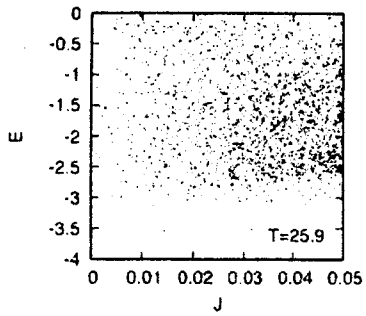


図 2、 $T=25.9$ での (J, E) 空間でのホスト銀河の星粒子分布

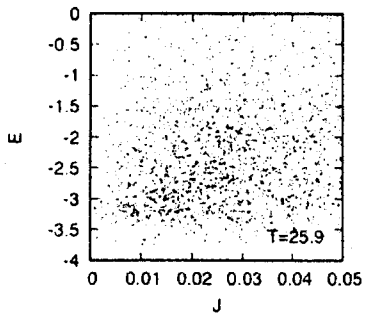


図 3、 $T=25.9$ で (J, E) 空間での矮小銀河の星粒子分布

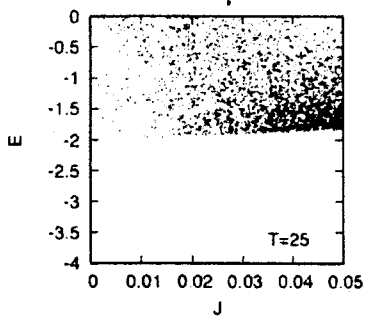


図 4、 $T=25$ での (J, E) 空間でのホスト銀河の星粒子分布

学位論文審査の要旨

主査	准教授	羽部朝男
副査	教授	藤本正行
副査	教授	小笹隆司
副査	教授	倉本圭
副査	准教授	大西明
副査	准教授	鈴木久男

学位論文題名

Dynamical Evolution of a Supermassive Black Hole Binary

(巨大ブラックホールバイナリーの力学的進化に関する研究)

多数の銀河の中心で、太陽質量の 10^6 倍以上の質量の巨大ブラックホール (以下 SMBH) の存在が観測から示されている。この SMBH の形成・成長過程は未解明であり、現在、大変重要な研究課題である。最近の観測から、SMBH の質量と銀河バルジの質量の相関が示され (Marconi & Hunt 2003)、SMBH と銀河の共進化の可能性の指摘がある。このことから SMBH の成長メカニズムとして、SMBH 合体が重要と考えられている。

SMBH の合体過程は、SMBH をもつ銀河の衝突合体後、各 SMBH が周りの星から力学的摩擦を受け角運動量を失い、銀河中心に落ち、最終的に重力波放出でエネルギーを失い合体すると考えられる。しかし、従来の研究から、この過程で loss cone depletion 問題が起り、宇宙年齢以内の SMBH 合体の困難が指摘されていた (Begelman et al. 1980)。これは、SMBH が周りの星から力学的摩擦を受ける過程で、周りの星に角運動量を与え、銀河中心領域を通過する星が減少し、その結果、SMBH の力学的摩擦は減少し、宇宙年齢以内の合体が困難となるためである。これが現在大きな問題とされている。

本学位論文著者は、この問題の解決として、矮小銀河と SMBH バイナリを持つ銀河の衝突合体 (以下 minor merger) を提案した。その理由は、1) Minor merger により、銀河中心領域の重力ポテンシャルが歪み、多くの星の銀河中心領域通過が可能になり、これらの星と SMBH との力学的摩擦が期待できる、2) 矮小銀河の銀河中心領域通過の際、矮小銀河の星も SMBH と力学的摩擦が期待できる、3) その結果、SMBH はこれらの星から力学的摩擦を受け、お互いの距離を急速に縮めることが可能、と考えたからである。本論文で、高精度 N 体シミュレーションを用いて、この可能性を調べた。この結果、1) コンパクトな矮小銀河の合体による SMBH 間の距離の急速な収縮、2) その収縮率から合体の時間スケールは 10^6 – 10^7 yr で、これは宇宙年齢に比べて非常に短い、を示した。初期

宇宙では、コンパクトな矮小銀河の衝突は頻繁であると期待され、このプロセスがSMBH バイナリーの力学的進化にとって大変重要になることも指摘した。

これを要するに、著者は矮小銀河の衝突合体によるSMBH 合体過程への影響を分析することにより、SMBH の進化についての理解を深めたものであり、宇宙物理学の研究に対して貢献するところ大なるものである。

よって著者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格があるものと認める。