

超大質量ブラックホール質量—バルジ質量関係の 進化と銀河形成過程

榎 基 宏

**On the evolution of the supermassive black hole mass-bulge
mass relation: effects of galaxy formation processes**

Motohiro Enoki

Abstract

In the local universe, the mass of supermassive black hole (SMBH), M_{BH} , is proportional to the bulge mass of the host galaxy, M_{bulge} . We investigate effects of galaxy formation processes on the evolution of the $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ relation, using a semi-analytic model of galaxy and SMBH formation. We find that the mass ratio $M_{\text{BH}}/M_{\text{bulge}}$ decreases with cosmic time. In our model, the mass growth processes of SMBH are cold gas accretion during starburst and SMBHs coalescence. Bulges grow from stars formed from cold gas during starbursts. Moreover, bulges also grow from stars in progenitor galaxies. Because cold gas in galaxies depleted by star formation, the amounts of cold gas accreted onto SMBH decrease with time. On the other hand, bulges grow from stars in progenitor galaxies during mergers, even at low redshifts. As a result, one should expect the $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ relation to evolve with cosmic time. Comparing these results with observations in a future, we can put a stringent constraint on galaxy and SMBH formation model.

1. はじめに

銀河は、暗黒物質が自己重力により凝集したダークハローの中にある、星、星間ガス、暗黒物質からなる天体であり、宇宙における物質分布の基本的要素である。銀河は、光学的に見た形態から、中心部にある3次元的なふくらみを持ったバルジと、円盤状のディスクの二つの成分に分けられる。ディスクは星と星間ガスから成るが、バルジは星のみで星間ガスはほとんど含まれていない。

近年、近傍宇宙 ($z=0$) の多くの銀河の中心、つまり、バルジの中心に、質量が $10^6 \sim 10^9 M_\odot$ 程の超大質量ブラックホール (Supermassive Black Hole: SMBH) が存在しており、その SMBH の質量 (M_{BH}) と、バルジの質量 (M_{bulge}) や星の運動の速度分散 (σ_*) との間に相関があることが観測的に示されるようになった (e.g. [9, 10, 11, 12, 13, 16])。 M_{bulge} と σ_* には相関があることから、 M_{BH} と M_{bulge} の相関が本質であると見なすことができる。このような相関関係が存在することは、銀河と SMBH が共進化してきたこと、即ち、銀河の形成過程と SMBH の形成過程の間には密接な関係があることを示していると考えられる。

では、 $z=0$ 、つまり現在の宇宙でのバルジの質量と SMBH の質量の関係 (以後 $M_{\text{BH}} - M_{\text{bulge}}$ 関係、と呼ぶ) は、過去の宇宙でもそのまま成り立っているのだろうか？ それとも進化しているのだろうか？ 近年、多くの観測が進みつつあるが、まだ確定的でないのが現状である (e.g. [2, 5, 14, 15])。

そこで、本研究では、標準的な宇宙論的構造形成理論に基づく、準解析的銀河+SMBH 形成モデルを用いて、 $M_{\text{BH}} - M_{\text{bulge}}$ 関係がどのように進化するのか理論的に調べた。更に、銀河形成の物理過程が、その関係の進化にどのような影響を与えるのかも調べた。本研究で影響を調べた銀河の形成過程は、(1) ディスクでの星形成、(2) 超新星爆発による星間ガスの再加熱 (SNe feedback)、(3) 銀河の合体が major merger である割合、の三つである。

本論文の構成は以下のとおりである。第2節では、準解析的銀河+SMBH 形成モデルの概要を述べる。第3節では、 $M_{\text{BH}} - M_{\text{bulge}}$ 関係の進化のモデルの結果を示す。第4節において、銀河形成の物理過程が、 $M_{\text{BH}} - M_{\text{bulge}}$ 関係にどのような影響を与えるのかを示す。最後に、第5節で、全体のまとめを行う。

2. 準解析的銀河+SMBH 形成モデル

標準的な宇宙論的構造形成理論に基づく、銀河の形成シナリオは次のようなものである。まず、物質密度の高い領域で、ダークハローが形成される。ダークハローは重力的に集積し、衝突・合体を繰り返すことにより、より大きなダークハローへと成長していく。銀河は、このダークハローの中で形成され、進化する。ダークハローが形成された時や合体した時、ダークハローに取り込まれたバリオンガスは衝撃波によりピリアル温度にまで加熱され hot gas となる。hot gas は、放射冷却によりダークハローの中心部に沈殿し、星間ガスである cold gas となり、ディスクを形成し銀河となる。ディスク中で cold gas から星が形成される。寿命の短い大質量星は形成後すぐに超新星爆発を起こし、周囲の cold gas を再加熱し hot gas に戻す。この過程は SNe feedback と呼ばれる。この放射冷却-星形成-SNe feedback のサイクルが銀河中で繰り返される。ダークハローが合体すると、一つのダークハロー中に複数の銀河が存在するようになるが、銀河同士も合体し、より大きな銀河へと成長していく。

銀河同士が合体すると、爆発的星形成 (starburst) が起き、ディスクが壊されバルジが形成される。

準解析的銀河モデル (SA-model) は、上記の様々な物理過程を簡単な解析的モデルを組み合わせて銀河の進化を解くことにより、物理過程同士や物理過程と観測量との関係を統合的に解析するための手法である。SA-model は銀河の様々な観測的な特徴を再現することに成功している (詳しくは、SA-model の review である [1, 3] を参照のこと)。

本研究では、Nagashima et al. [18] の SA-model に、SMBH 形成モデルを組み込んだ、Enoki et al. [7, 8] の準解析的銀河+SMBH 形成モデルを用いる。銀河の合体の数値流体力学シミュレーションによると、銀河の合体が major merger である時、合体時にディスクの星間ガスが中心部に流れ込んで starburst を起こしバルジを形成することが示されている。さらに、中心部へ流れ込んだガスの一部は SMBH へと降積すると考えられ、major merger が SMBH の成長の重要な過程の一つになりうることが示唆されている (e.g. [6, 17])。そこで、我々は、SMBH の形成と進化については次の二つの仮定を置いてモデルを構築した。(1) SMBH を含む銀河同士が合体した時には、SMBH は連星となり最終的に重力波を放射して合体する。(2) 銀河同士の合体が major merger の場合は、cold gas の一部を SMBH に降積させ成長させる。SMBH に降積する cold gas の量は、major merger 時の starburst で形成される星の質量に比例するとし、その比例定数は、近傍宇宙 ($z=0$) での $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係の観測結果とモデルの結果が合うように決定する。ダークハロー内部での各成分の関係と物質のやり取りについて、Figure 1 に示した。

なお、ここで出てきた major merger とは、銀河の合体のタイプの一つである。我々のモデルでは、銀河の合体のタイプを銀河の質量比で major merger と minor merger の二つに分けている。合体する二つの銀河の銀河の質量をそれぞれ M_{large} , M_{small} とし、 $M_{\text{large}} \geq M_{\text{small}}$ であるとする。この時、合体のパラメタ f_{bulge} を導入し、 $M_{\text{small}}/M_{\text{large}} \geq f_{\text{bulge}}$ であれば、major merger, $M_{\text{small}}/M_{\text{large}} < f_{\text{bulge}}$ であれば、minor merger とする。major merger の場合は、starburst が起き、cold gas の一部は SMBH に降積するが、残りの cold gas は全てバルジの星になるとする。同時に、ディスクが破壊され、合体前の銀河のディスクとバルジの星は、合体後の銀河のバルジの星になるとする。minor merger の場合は、単に小さい方の銀河のみが破壊され、その銀河の星とガスは、大きい方の銀河のディスクに呑みこまれると考える。

この準解析的銀河+SMBH 形成モデルには様々なパラメタが含まれるが、それらは近傍銀河の観測結果に合うように定める。本研究では Enoki et al. [8] で採用したモデルパラメタセットを用いる。以後、このパラメタセットのモデルを reference model と呼ぶ。

3. $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係の進化

この節では、reference model での $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係の結果を示す。Figure 2 (a) では、 $z=0$ でのモデルの結果を示した。図中の実線が reference model の結果の平均値であり、シンボルは観測結果 (Häring Rix [11]) である。平均的には、 M_{BH} が M_{bulge} に比例する。

Figure 2 (b) は、reference model での $z=3$ から $z=0$ までの、 $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係の進化の結果を示したものである。この図より、high- z から low- z になるに従って、 M_{BH} は M_{bulge} に比例したままであるが、その比例定数である $M_{\text{BH}}/M_{\text{bulge}}$ は、減少していくことが分かる。具体的には、 $z=0$ では、 $z=3$ の約 1/6 になっている。

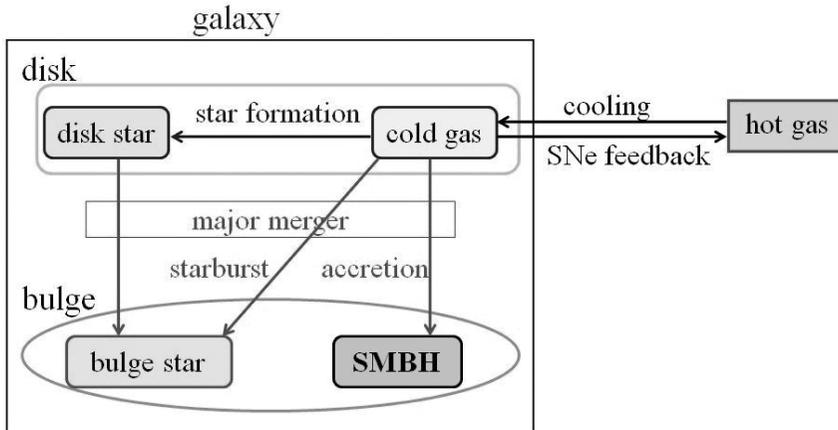


Figure 1 SA-model における、ダークハロー内部での銀河の各成分の関係。

我々のモデルでの SMBH の質量増加の要因は、SMBH 同士の合体と major merger 時の cold gas の降積である。一方、バルジの質量増加の要因は、合体前の銀河のディスクとバルジにいる星の供給と、major merger 時の starburst による星形成である。初期には、cold gas が豊富にあるので、SMBH とバルジは同じように成長する。そのうち、cold gas はディスクの星となり、寿命の長い小質量星は星のまま生き残り続けるため、cold gas の量は減少する。そうすると、銀河が合体する時、starburst で形成される星の質量は小さくなり、同時に SMBH に降積する cold gas の量が減るため、SMBH はあまり成長しなくなる。しかし、銀河が合体する時には、合体前のディスクの星も合体後のバルジに加わるため、バルジは成長を続ける。その結果、バルジと比べると SMBH の成長は遅れ、 $M_{\text{BH}}/M_{\text{bulge}}$ は減少していく。

近年の観測結果は、多くの場合、このモデルと同じように、定性的には high- z から low- z

になるに従って $M_{\text{BH}}/M_{\text{bulge}}$ が減少していくことを示している (e.g. [2, 5, 14, 15])。しかし、まだ不定性が大きく、定量的には一致していない。 $M_{\text{BH}}/M_{\text{bulge}}$ は、ほとんど一定で、 $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係は、進化しないという結果もある (e.g. [19])。また、このモデルの結果は、Croton [4] の理論モデルの結果とも定性的には一致している。

4. 銀河形成の物理過程と $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係の進化

SMBH が成長する主要因は cold gas の降積である。しかし、cold gas は星形成の材料でもあるため、SMBH の成長は銀河形成の物理過程にも左右される。故に cold gas の減少量を増やす場合には、 $M_{\text{BH}}/M_{\text{bulge}}$ の変化率は大きくなると考えられる。具体的には、(1) ディスクでの星形成率を高くする場合、(2) SNe feedback を強める場合、(3) major merger が起きる割合を減らす場合である。そこで、この節では、ディスクでの星形成や SNe feedback、銀河の merger のモデルのパラメタを reference model の値から変えた場合、 $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係とその進化がどのように変化するかを示す。

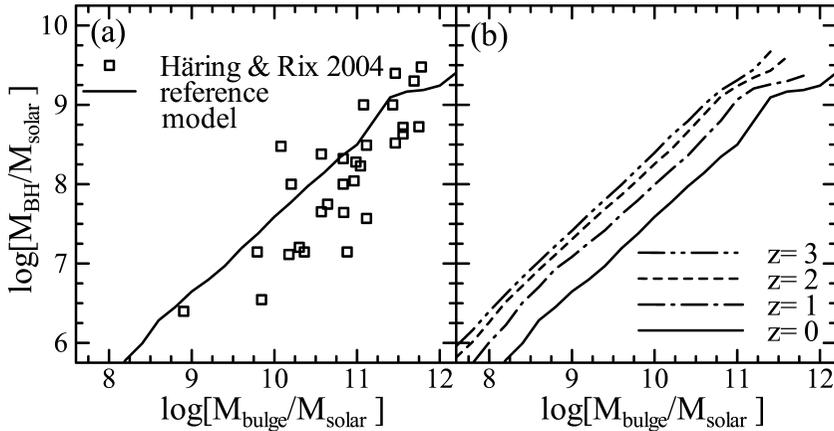


Figure 2 $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係とその進化。(a) 近傍 ($z=0$) での $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係。実線が reference model の結果の平均値であり、シンボルは観測結果 (Häring Rix 2004[11]) である。(b) $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係の進化。 $z=3$ から $z=0$ までの reference model の結果を示した。

4.1 star formation

星はディスクにある cold gas (星間ガス) から形成される。我々のモデルでは、ディスクでの星形成率は、 $M_* = M_{\text{cold}}/\tau_*$ で与えられるとしている。ここで、 M_{cold} は cold gas の質量

であり、 τ_* は星形成のタイムスケールである。この星形成のタイムスケールは、 $\tau_* = \tau_{*,0} \times (V_c/300 \text{ km s}^{-1})^{\alpha_*}$ で与えられると仮定する。なお、 V_c は銀河の回転速度であり、銀河の重力ポテンシャルの深さを反映した物理量である。 $\tau_{*,0}$ と α_* が星形成のモデルのパラメータであるが、reference model では $\tau_{*,0} = 1.5 \text{ Gyr}$ 、 $\alpha_* = -2$ を用いている。これは、銀河のディスク中の cold gas と星の質量比が、観測結果と一致するように決めたものである。この小節では、この二つのパラメータの値を変えた場合に、 $M_{\text{BH}} - M_{\text{bulge}}$ 関係にどのような影響を与えるのかを示す。

$\tau_{*,0}$ の値のみを変えた場合の $M_{\text{BH}} - M_{\text{bulge}}$ 関係の進化を Figure 3 の (a) と (b) に示した。 $\tau_{*,0}$ を小さくすると、全ての銀河のディスクでの星形成率が高くなり、cold gas の消費量は増える。その結果、Figure 2 と比べると、全ての銀河で、 $M_{\text{BH}}/M_{\text{bulge}}$ の変化率は大きくなる。逆に、 $\tau_{*,0}$ を大きくすると、ディスクでの星形成率が低下し、low- z になっても、cold gas が多く残される。その結果、銀河が合体した時には、starburst が常に起き、SMBH にも cold

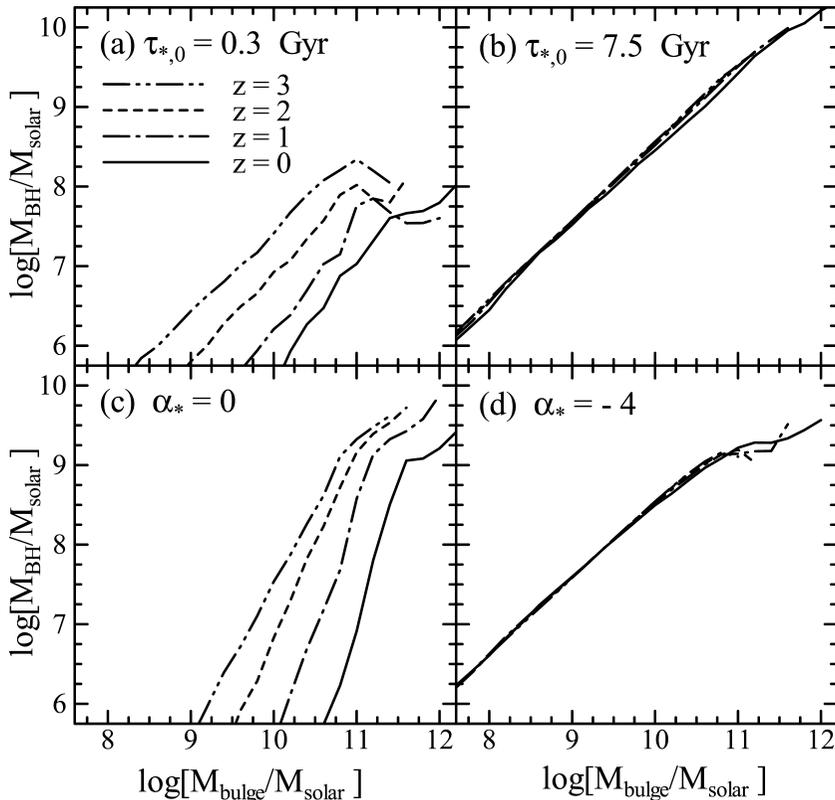


Figure 3 星形成過程が $M_{\text{BH}} - M_{\text{bulge}}$ 関係とその進化に与える影響。(a) は、 $\tau_{*,0} = 0.3 \text{ Gyr}$ としたもので、(b) は、 $\tau_{*,0} = 7.5 \text{ Gyr}$ としたものの。(c) は、 $\alpha_* = 0$ としたもので、(d) は、 $\alpha_* = -4$ としたものの。いずれのパネルでも、 $z = 3$ から $z = 0$ までの結果を示している。

gas が降積するため、バルジと SMBH の質量増加率はほぼ変化せず、 $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係の進化は見られなくなる。

α_* の値のみを変えた場合の $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係の進化を Figure 3 の (c) と (d) に示した。 α_* を大きくすると、 $V_c < 300 \text{ km s}^{-1}$ である銀河、つまり、バルジの質量が、 $10^{11} M_\odot$ 程度よりも小さな銀河でディスクでの星形成率が高くなり、cold gas の消費量は増える。その結果、 $M_{\text{BH}}/M_{\text{bulge}}$ の変化率は大きくなる。 V_c が小さい銀河ほど、星形成率がより高くなり、 $M_{\text{BH}}/M_{\text{bulge}}$ の変化率がより大きくなるため、 M_{bulge} と M_{BH} は比例しなくなる。逆に、 α_* を大きくすると、 $V_c < 300 \text{ km s}^{-1}$ である銀河でディスクでの星形成率が低下するため、 $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係の進化は見られなくなる。

4.2 SNe feedback

SNe feedback で cold gas は加熱されて hot gas に戻される。我々のモデルでは加熱率は、 $\dot{M}_{\text{reheat}} = \beta \dot{M}_{\text{star}}$ で与えられるとしている。ここで、 β は、加熱の効率を表し、 $\beta = (V_{\text{hot}}/V_c)^{\alpha_{\text{hot}}}$ であると仮定する。なお、 V_{hot} と α_{hot} が SNe feedback のモデルのパラメタであるが、reference model では、 $V_{\text{hot}} = 280 \text{ km s}^{-1}$ 、 $\alpha_{\text{hot}} = 2.5$ を用いている。これは、近傍銀河の光度函数が観測結果と一致するように決めたものである。この小節では、この二つのパラメタの値を変えた場合に、 $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係にどのような影響を与えるのかを示す。

V_{hot} の値のみを変えた場合の $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係の進化を Figure 4 の (a) と (b) に示した。 V_{hot} を大きくすると、全ての銀河で SNe feedback が強くなり、cold gas の減少量は大きくなる。その結果、Figure 2 と比べると、全ての銀河で、 $M_{\text{BH}}/M_{\text{bulge}}$ の変化は大きくなる。逆に、 V_{hot} を小さくすると、全ての銀河で SNe feedback が弱くなる。Figure 4 (b) で示した、 $V_{\text{hot}} = 0 \text{ km s}^{-1}$ の場合は、 $\beta = 0$ 、つまり SNe feedback の効果が入っていないモデルに相当する。この場合、cold gas が加熱されて hot gas になることがないので、low- z になっても、cold gas が多く残される。その結果、銀河が合体した時に starburst が常に起き、cold gas が SMBH に降積するため、バルジと SMBH の質量増加率はほぼ変化せず、 $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係の進化は見られなくなる。

α_{hot} の値のみを変えた場合の $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係の進化を Figure 4 の (c) と (d) に示した。 α_{hot} を大きくすると、 $V_c < V_{\text{hot}}$ である銀河、つまり、バルジの質量が $10^{11} M_\odot$ 程度よりも小さな銀河で SNe feedback が強くなるため、cold gas の減少量が大きくなる。その結果、 $M_{\text{BH}}/M_{\text{bulge}}$ の変化は大きくなる。 V_c が小さいほど、SNe feedback はより強くなり、 $M_{\text{BH}}/M_{\text{bulge}}$ の変化率がより大きくなるため、 M_{bulge} と M_{BH} は比例しなくなる。逆に、 α_{hot} を小さくすると、 $V_c < V_{\text{hot}}$ である銀河で SNe feedback が弱くなるため、 $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係の進化は見られなくなる。

4.3 galaxy merger

銀河の合体が, major merger であるか, minor merger であるかの違いは, 合体によってディスクが破壊され, バルジが形成されるかの違いであるので, 銀河の形態に大きな影響を与える。銀河の合体が major merger か minor merger であるかを分けるのが合体のパラメタ f_{bulge} である。reference model では, $f_{\text{bulge}}=0.5$ を用いている。これは, 銀河の形態別の個数比が, 近傍での観測結果と一致するように決めたものである。この小節では, このパラメタの値を変えた場合に, $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係にどのような影響を与えるのかを示す。

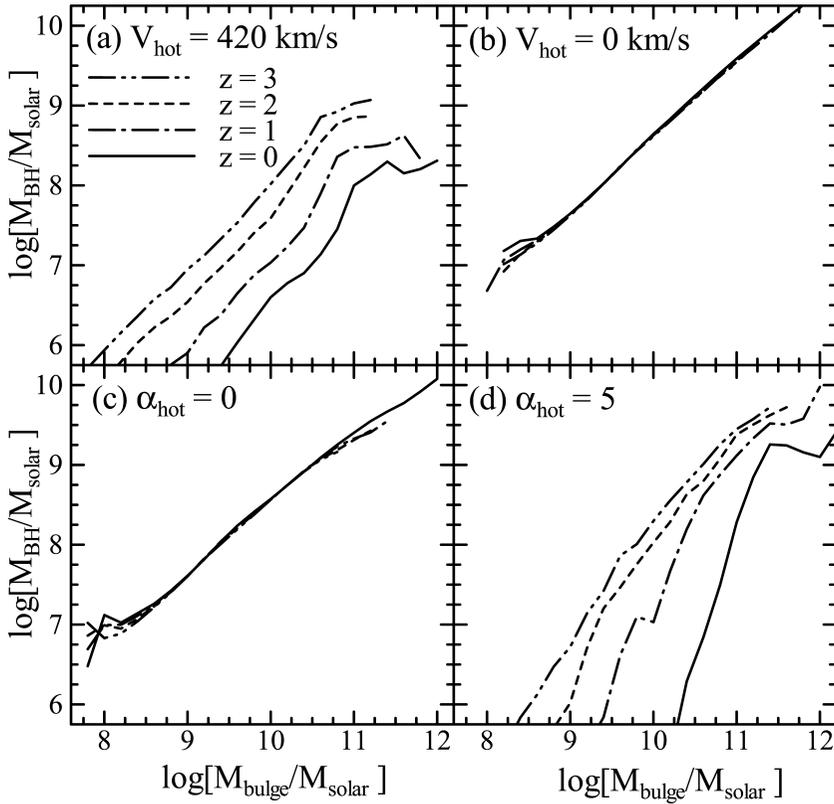


Figure 4 SNe feedback が $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係とその進化に与える影響。(a) は, $V_{\text{hot}}=420 \text{ km s}^{-1}$ としたもので, (b) は, $V_{\text{hot}}=0 \text{ km s}^{-1}$ としたもの。(c) は, $\alpha_{\text{hot}}=0$ としたもので, (d) は, $\alpha_{\text{hot}}=5$ としたもの。いずれのパネルでも, $z=3$ から $z=0$ までの結果を示している。

f_{bulge} の値のみを変えた場合の $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係の進化を Figure 5 の (a) と (b) に示した。 f_{bulge} を大きくすると, major merger になる割合が減るため, starburst の頻度が減り, SMBH に cold gas が降積する機会が減る。更に, starburst の頻度が減れば, ディスクで cold gas か

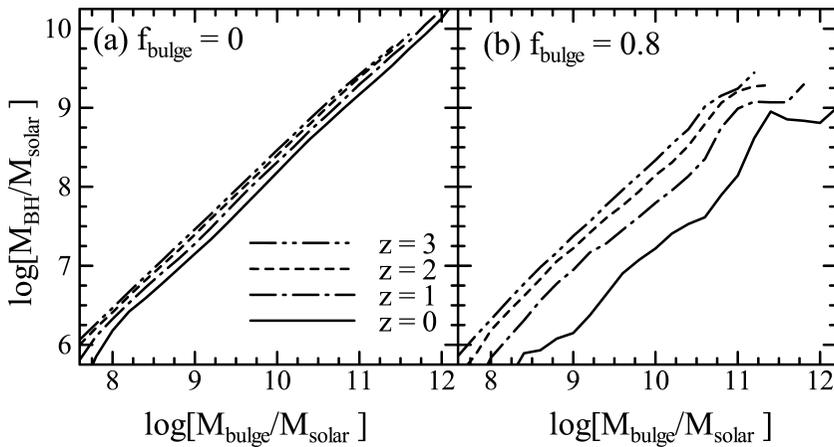


Figure 5 galaxy merger のタイプが $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係とその進化に与える影響。(a) は、 $f_{\text{bulge}}=0$ としたもので、(b) は、 $f_{\text{bulge}}=0.8$ としたもので、いずれのパネルでも、 $z=3$ から $z=0$ までの結果を示している。

ら星が形成されて cold gas が消費され続けるので、SMBH に降積する cold gas の量も減る。しかし、starburst の頻度が減っても、銀河が一度でも major merger を起こせば、合体前の銀河のディスクの星が、合体後の銀河のバルジの星に加わるので、バルジは成長する。その結果、バルジと比べると SMBH はあまり成長しなくなるため、 $M_{\text{BH}}/M_{\text{bulge}}$ の変化率が大きくなる。

5. まとめ

銀河が合体した時に、SMBH が成長するとしたモデルを組み込んだ準解析的銀河+SMBH 形成モデルを用いて、SMBH とバルジの質量の関係がどのように進化するか調べた。

その結果、SMBH とバルジの質量比は減少していくことが分かった。具体的には、 $z=0$ では、 $z=3$ の約 1/6 になる。これは、現在得られている多くの観測結果と矛盾しない。

このように SMBH とバルジの質量の関係が進化する理由は、ディスクで通常の星形成が進み cold gas が減少していくと、major merger 時に、バルジは成長するが、SMBH は降積する cold gas が減少しているため、あまり成長しなくなるからである。これは、星形成のタイムスケールを長くして銀河中の星形成を高めるなどして、cold gas を多く消費するようなモデルパラメータにすると、その質量比の変化率が大きくなることから分かる。

このように、SMBH とバルジの質量の関係の進化は、SMBH と銀河の両方の形成過程と密接に関連していると考えられる。そのため、将来得られるであろう、SMBH についてのより詳細な観測結果は、SMBH 形成のみならず銀河形成モデルについても、より精密な構築に有

用な情報を与えることができると考えられる。

References

- [1] Baugh, C. M. (2006), A primer on hierarchical galaxy formation: the semi-analytical approach, *Reports on Progress in Physics*, 69, pp. 3101–3156
- [2] Bennert, V. N., Auger, M. W., Treu, T., Woo, J. H. Malkan, M. A. (2011), The Relation between Black Hole Mass and Host Spheroid Stellar Mass Out to $z \sim 2$, *Astrophysical Journal*, 742, 107 (6pp)
- [3] Benson, A. (2010), Galaxy formation theory, *Physics Reports*, 495, pp. 33–86
- [4] Croton, D. J. (2006), Evolution in the black hole mass-bulge mass relation: a theoretical perspective, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 369, pp. 1808–1812
- [5] Decarli, R., Falomo, R., Treves, A., Labita, M., et al. (2010), The quasar $M_{\text{BH}} - M_{\text{host}}$ relation through cosmic time-II. Evidence for evolution from $z=3$ to the present age, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 402, pp. 2453–2461
- [6] Di Matteo, T., Croft, R. A. C., Springel, V. Hernquist, L. (2005), Black Hole Growth and Activity in a Λ Cold Dark Matter Universe, *Astrophysical Journal*, 593, pp. 56–68
- [7] Enoki, M., Nagashima, M., Gouda, N. (2003), Relations between galaxy formation and the environments of quasar, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 55, pp. 133–142
- [8] Enoki, M., Inoue, K. T., Nagashima, M. Sugiyama, N. (2004), Gravitational Waves from Supermassive Black Hole Coalescence in a Hierarchical Galaxy Formation Model, *Astrophysical Journal*, 615, pp. 19–28
- [9] Ferrarese, L. Merritt, D. (2000), A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies, *Astrophysical Journal Letters*, 539, pp. L9–L12
- [10] Gebhardt, K., Bender, R., Bower, G., Dressler, A., et al. (2000), A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion, *Astrophysical Journal Letters*, 539, pp. L13–L16
- [11] Häring, N. Rix, H. (2004), On the black hole mass-bulge mass relation, *Astrophysical Journal Letters*, 604, pp. L89–L92
- [12] Magorrian, J., et al. (1998), The Demography of Massive Dark Objects in Galaxy Centers, *Astronomical Journal*, 115, pp. 2285–2305
- [13] Marconi, A., Hunt, L. K. (2003), The Relation between Black Hole Mass, Bulge Mass, and Near-Infrared Luminosity, *Astrophysical Journal Letters*, 589, pp. L21–L24
- [14] McLure, R. J., Jarvis, M. J., Targett, T. A., Dunlop, J. S. Best, P. N. (2006), On the evolution of the black hole: spheroid mass ratio, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 368, pp. 1395–1403
- [15] Merloni, A., Bongiorno, A., Bolzonella, M., Brusa, M. et al. (2010), On the Cosmic Evolution of the Scaling Relations Between Black Holes and Their Host Galaxies: Broad-Line Active Galactic Nuclei in the zCOSMOS Survey, *Astrophysical Journal*, 708, pp. 137–157
- [16] Merritt, D., Ferrarese, L. (2001), Black hole demographics from the $M_{\bullet} - \sigma$ relation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 320, pp. L30–L34

- [17] Mihos, J. C., Hernquist, L. (1996), Gasdynamics and Starbursts in Major Mergers, *Astrophysical Journal*, 464, pp. 641–663
- [18] Nagashima, M., Totani, T., Gouda, N., Yoshii, Y. (2001), Galaxy Number Counts in the Hubble Deep Field as a Strong Constraint on a Hierarchical Galaxy Formation Model, *Astrophysical Journal*, 557, pp. 505–518
- [19] Yamada, T., Kajisawa, M., Akiyama, M., Ichikawa, T. et al. (2009), MOIRCS Deep Survey. III. Active Galactic Nuclei in Massive Galaxies at $z=2-4$, *Astrophysical Journal*, 699, pp. 1354–1364

謝 辞

本論文は、2010年度東京経済大学個人研究助成費(10-02)による研究成果の一部である。本研究で用いた準解析的銀河+SMBH形成モデルの計算コードは、長島雅裕氏が開発した準解析的銀河形成モデルの計算コードを基に作成した。また、齋藤貴之氏、市川伸一氏、小林正和氏には、有益なコメントや情報を頂いた。以上記して深く感謝の意を表したい。