

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 23 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21540246

研究課題名（和文）バルジ、ディスク、ブラックホールの共進化と銀河形成論の新展開

研究課題名（英文）Co-evolution among Bulge, Disk, and Black Hole, and New Development of Galaxy Formation Theory

研究代表者

辻本 拓司 (TSUJIMOTO TAKUJI)

国立天文台・光赤外研究部・助教

研究者番号：10270456

研究成果の概要（和文）：バルジ、ディスク、ブラックホールが過去にどのような持ちつ持たれつの中で進化を遂げその中で銀河が形成されたかを銀河系で明らかにし、銀河形成論に新たなトレンドを切り開いた。特に銀河中心からのウインドが銀河形成に与える影響を精査することを通じて銀河系バルジの起源、形成史を解明し、宇宙に存在する半数以上のバルジの起源に大きな手がかりを与えることができた。さらに、バルジサイズとディスクの金属量分布の相関を予言した。

研究成果の概要（英文）：This study has presented a new trend of galaxy formation theory by revealing the co-evolution between bulge, disk, and black hole in the Milky Way. In particular, the effect of galactic wind from the center on galaxy formation has been extensively examined, which has led to a deep understanding of the formation history of the Milky Way. It turns out that the origin of more than half of bulges in the Universe has been unraveled. In addition, we predict the correlation between the size of bulges and the metallicity gradient over the disks.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：理論天文学

## 1. 研究開始当初の背景

我々の銀河に代表されるディスク、バルジ、ハローから構成される円盤銀河が一体どのように形成されたのか、それは謎に包まれていた。コールドダークマターシナリオに基づいた銀河形成の数値シミュレーションにおいて、バルジとディスクから成る銀河の形状の再現には成功しているものの、現実の銀河

とは様々な点で大きな相違が見られていた。特に、コールドダークマター宇宙においては、銀河の形成過程の中でバリオンが角運動量を非常に効率良く失うために、「大き過ぎるバルジとコンパクト過ぎるディスク」ができてしまうという長年にわたる未解決の問題を抱えている (e.g., Navarro & White 1994)。この問題への解決策として、銀河形成初期段

階における大規模なフィードバック作用が指摘されているが (Fall 2002)、その真偽は明らかにされていない。さらに、数値的に得られるバルジは楕円銀河の小型版である「古典的バルジ」と呼ばれているものであるが、現実の宇宙に存在するバルジの半数以上は、その形成にバー構造が原因していると思われる「ボックス／ピーナッツ型バルジ」か「pseudo バルジ」(擬似バルジ)なのである。そして、銀河系バルジはまさに、「ボックス／ピーナッツ型バルジ」に属し、シミュレーションが予言するバルジの範疇外にある。銀河系バルジの形成は謎に包まれていた。

一方、星の運動の観測から、銀河中心には太陽質量の数百万倍から数億倍の質量をもつ巨大ブラックホールが普遍的に存在しており、その質量と銀河バルジとの質量の間には強い相関があることが明らかにされた (Magorrian et al. 1998; Ferrarese & Merritt 2000)。これは、バルジとブラックホールが共に進化 (共進化) していることを強く示唆しており、銀河形成およびブラックホール観に新たな視点を与えることとなった。この両者間の強い相関が、銀河の階層的構造形成の中での、ブラックホール成長に伴うフィードバック効果によって再現できるというシミュレーション結果が提示されているが (di Matteo et al. 2005)、さきに述べたように、これは「古典的バルジ」に限られた話であり、この相関に従う銀河系バルジの位置づけは全くの不透明であった。

## 2. 研究の目的

星の化学組成は銀河の過去を探る強力なツールである。これを“chemical tagging”と呼ぶ。これまでに研究代表者である辻本は、太陽近傍星の一部の星に見られる化学組成の異常性と、そのバルジ星の化学組成との類似性に着眼することから、このテーマに新しい切り口で挑んできた。その結果、星の化学組成解読および化学進化モデルの構築から、銀河系ディスクが過去に銀河中心からの大規模なウインドによって汚染されたという結論に至った。本研究では、これまでの成果を踏まえ、さらなる発展を図ることを目的とした。まず、これまでに構築したシナリオを数値シミュレーションで検証することは必須であり、これは研究協力者である戸次と進めた。また、これまでの研究はバルジあるいはブラックホールからディスクへの作用に焦点を当てたものであったが、その逆のベクトルに対応する「共進化」の解明を研究連携者の梅村と理論的アプローチによって、さらに観測サイトから Bland-Hawthorn と Freeman との共同体制という布陣を敷き、バルジ、ディスク、ブラックホールの共進化の謎を解明し、銀河形成シナリオの新しいパラダイムを

構築することを目指した。

## 3. 研究の方法

銀河進化モデルの構築、化学組成解読、数値シミュレーションという理論的手法および観測データを取得・分析することから、バルジ、ディスク、ブラックホールの共進化の過去を明らかにし、銀河系に代表される円盤銀河の形成理論への新たなパラダイムを、オーストラリアの海外共同研究者との連携を軸に計3年間で確立することを目指した。具体的には、3年間に於いて、バルジ、ディスク、ブラックホールについて以下のことを明らかにすることから、三者の共進化の描像を構築していく計画を持って進めた。

(1) バルジ: ①バルジの星形成史。②バルジの起源-コールドダークマター宇宙で予言される階層的構造形成の中でバルジは形成されたのか? バーによって引き起こされる不安定性によってディスクからのガスが流入してくる過程の中でバルジが形成されたのか?。③バルジからのウインドの起源-バルジの星形成を終わらせることになった大規模なウインドの引き金はスターバーストによるものか?あるいは、ブラックホールによるものか?。

(2) ディスク: ①銀河中心からのウインドがディスクの形成に及ぼした影響(特に、ウインドの時期とタイムスケールと正体を突き止める)。②ディスクからバルジへのガス流入のメカニズム。

(3) ブラックホール: ①ブラックホールの成長過程。②ブラックホールのフィードバックがバルジ形成に与えた影響およびウインド発生メカニズム、その規模。

## 4. 研究成果

本研究では、バルジ、ディスク、ブラックホールがどのように相互作用しながら進化・成長し、そしてこれらの共進化を軸にどのように銀河が形成されてきたかを、「星の化学組成解読」、「銀河の化学進化モデル構築」、「N体/流体数値シミュレーション」等の手法を駆使することで明らかにし、謎に包まれた銀河系進化の物理過程を理論的に解明することを目指してきた。以下に代表的な成果を3つに分けて報告する。

(1) まず、上記2つの手法に基づき、太陽近傍のディスク星の化学組成の過去にわたる時間変化を解読することから、およそ50億年前にバルジ内で活発な星形成が起り、その結果大規模な銀河風が発生し、ディスク全体が重元素で汚染された事実を突き止めた。バルジでの星形成の引き金になったのは、ディスクからのガスの流入と考えられることから、バルジとディスク間でのガスや重元素と

いった物質の密なやり取りが進化を押し進めてきたという銀河系形成モデルへの新しい描像を提唱するに至った。

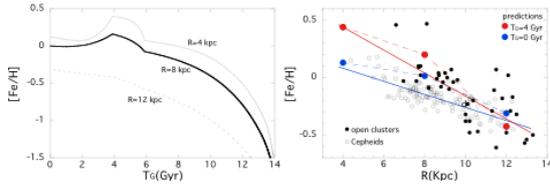


図1：(左) 銀河中心からの距離が 4kpc, 8kpc, 12kpc における [Fe/H] の時間変化の理論曲線。4kpc, 8kpc で見られるバンブは銀河中心からのウインドによる重元素汚染が原因である。(右) 銀河ディスクにおける動径方向の重元素量勾配の時間変化の理論予測を観測と比較したもの。

- (2) さらに、N 体数値シミュレーションを実行することにより、未だ未解決であるバルジの形成過程を明らかにすることができた。現在シミュレーションで得られるバルジは楕円銀河の小型版である「古典的バルジ」と呼ばれるものであるが、現実の宇宙に存在するバルジの半数以上は、その形成にバー構造が原因していると思われる「擬似バルジ」なのである。そして、銀河系バルジはまさに後者に属し、コールドダークマター宇宙が予言するバルジの範疇外にある。このように銀河系バルジの形成は謎に包まれ、観測結果を矛盾無く説明できるモデルはこれまで存在しなかった。それに対する答えとして、厚いディスクと薄いディスクの2成分バルジ起源説をモデル化し、銀河系バルジが擬似バルジの特徴である円筒状の回転速度分布を持つ一方で、古典的バルジの特徴である短軸方向に金属量の勾配が存在するというパラドックスの解明に成功した。このようにバルジがディスクから形成されたというシナリオを再構築することで、初めて化学的力学的に矛盾のない理論数値モデルを確立することができた。

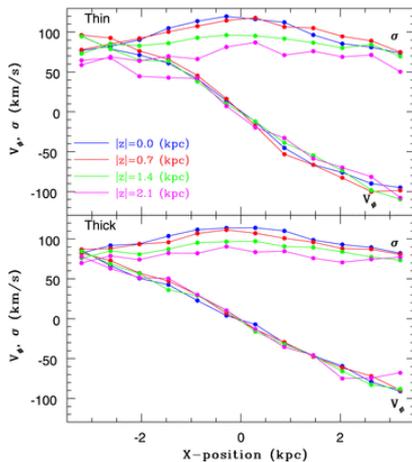


図2：バルジ内における回転速度および速度分散の垂直方向での距離が 0kpc, 0.7kpc, 1.4kpc, 2.1kpc での値を動径方向での関数で示したもの。上図が薄い円盤成分での結果で、下図は厚い円盤成分での理論予測値。

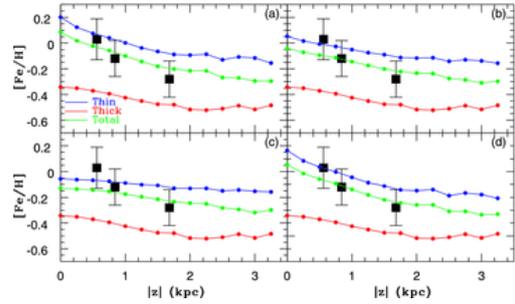


図3：バルジ内での銀河面に対して垂直方向の重元素量勾配の理論計算結果と観測値の比較。4つの図はモデルのパラメータを変えて計算したものである。

- (3) バルジ研究における近年の大きな進展の一つに、単純な一つの星種族からバルジが構成されているという既成概念から脱却し、バルジが少なくとも2つの成分をもつことが明らかにされてきたことが挙げられる。特に、星の重元素量頻度分布を見ると、明らかな2つのピークが存在し、しかも各々の重元素量に対応する星の運動に違いが見られることから、起源が異なる2つの成分がバルジに共存することが強く示唆される。今回行った計算から、2つの成分は厚いディスクと薄いディスクに対応するものであることがわかった。重元素量が小さい成分は比較的短い時間に厚いディスクから形成されたバルジであり、一方、重元素量が高い成分は、数十億年の時間をかけて薄いディスクから形成されたものであり、また top-heavy な初期質量関数が不可欠であることもわかった。

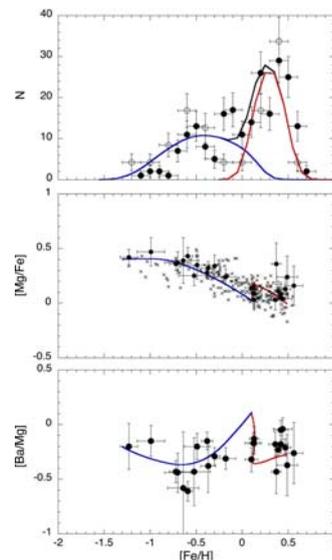


図4：バルジが薄い円盤（赤色）と厚い円盤（青色）から形成されたというシナリオに基づいたモデルで行った計算結果と観測値の比較。上から、重元素量頻度分布、[Mg/Fe]の進化、[Ba/Mg]の進化。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計10件）

- ① Tsujimoto, T., Bekki, K. ; Two-component Galactic Bulge Probed with Renewed Galactic Chemical Evolution Model, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 747, 2012, 125 (7pp), DOI: 10.1088/0004-637X/747/2/125
- ② Bekki, K. and Tsujimoto, T. ; Formation of the Galactic bulge from a two-component stellar disc: explaining cylindrical rotation and a vertical metallicity gradient, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 416, 2011, L60 - L64, DOI: 10.1111/j.1745-3933.2011.01097.x
- ③ Bekki, K. and Tsujimoto, T. ; Origin of Chemical and Dynamical Properties of the Galactic Thick Disk, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 738, 2011, 4(20pp), DOI: 10.1088/0004-637X/738/1/4
- ④ Tsujimoto, T. ; Chemical Signature Indicating a Lack of Massive Stars in Dwarf Galaxies, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 736, 2011, 113 (7pp), DOI: 10.1088/0004-637X/736/2/113
- ⑤ Tsujimoto, T. and Bekki, K. ; Implications of a non-universal IMF from C, N, and O abundances in very metal-poor Galactic stars and damped Ly $\alpha$  absorbers, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, 530, 2011, A78 (8pp), DOI:10.1051/0004-6361/201016210
- ⑥ Tsujimoto, T. ; Turn-off of deuterium astration in the recent star formation of the Galaxy disc, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 410, 2011, 2540 - 2548, DOI:10.1111/j.1365-2966.2010.17627.x
- ⑦ Bekki, K. and Tsujimoto, T. ; Origin of the Unusually Low Nitrogen Abundances in Young Populations of the Large Magellanic Cloud, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 721, 2010, 1515 - 1522,

DOI:10.1088/0004-637X/721/2/1515

- ⑧ Tsujimoto, T., Bland-Hawthorn, J., and Freeman, K. C. ; Evidence of Early Enrichment of the Galactic Disk by Large-Scale Winds, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, 62, 2010, 447 - 456, <http://pasj.asj.or.jp/v62/v62n2.html>
  - ⑨ Tsujimoto, T. and Bekki, K. ; Chemical Signature of a Major Merger in the Early Formation of the Small Magellanic Cloud, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, 700, 2009, L69 - L72, DOI:10.1088/0004-637X/700/2/L69
  - ⑩ Bekki, K., Tsujimoto, T., and Chiba, M. ; Role of Galactic Gaseous Halos in Recycling Enriched Winds from Bulges to Disks: A New Bulge-Disk Chemical Connection, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, 692, 2009, L24 - L28, DOI: 10.1088/0004-637X/692/1/L24
- 〔学会発表〕（計7件）
- ① Tsujimoto, T. ; The IMF variation and short-delayed SNe Ia in the context of Galactic chemical evolution, *The Chemical Evolution of the Milky Way*, 2012.1.26, セスト（イタリア）
  - ② Tsujimoto, T. ; Galactic Chemical Evolution in the context of the recently revealed SN Ia delay time distribution, *IAU Symposium 281*, 2011.7.4, パドバ（イタリア）
  - ③ Tsujimoto, T. ; Diagnosis of the IMF in the Universe Using the C, N Abundances, *Why Galaxies Care About AGB Stars II*, 2010.8.16, ウィーン（オーストリア）
  - ④ Tsujimoto, T. ; Chemical Evolution of D in the Local Disk, *IAU Symposium 268*, 2009.11.9, ジュネーブ（スイス）
  - ⑤ Tsujimoto, T. ; Galaxy Formation through Winds, Infall, and Merger: Learning from Galactic Archaeology, *Hunting for the Dark: The Hidden Side of Galaxy Formation*, 2009.10.19, マルタ（マルタ共和国）
  - ⑥ Tsujimoto, T. ; Evidence of a Major Merger in the Small Magellanic Cloud Imprinted in the Age-Metallicity Relation, *The Milky Way and the Local Group - Now and in the Gaia Era*, 2009.8.31, ハイデルベルグ（ドイツ）
  - ⑦ Tsujimoto, T. ; Galactic winds and the evolution of the Galactic abundance gradient, *Modelling the*

Milky Way in the Era of Gaia,  
2009. 8. 6, リオデジャネイロ (ブラジル)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻本 拓司 (TSUJIMOTO TAKUJI)  
国立天文台・光赤外研究部・助教  
研究者番号： 10270456

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

梅村 雅之 (UMEMURA MASAYUKI)  
筑波大学・数理物質科学研究科・教授  
研究者番号： 70183754