

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20340039

研究課題名（和文） 超高解像度電波観測に基づく宇宙暗黒物質構造の解明

研究課題名（英文）

Resolving structure of cosmic dark matter based on extremely high-resolution radio observations

研究代表者

千葉 柁司 (CHIBA MASASHI)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50217246

研究成果の概要（和文）：冷たい暗黒物質（CDM）の階層的合体過程に基づく宇宙の構造形成理論によると、銀河系のような明るい銀河の周囲に数千に及ぶ暗黒物質のサブストラクチャー（CDMサブハロー）が存在することが示唆されている。そこで、この暗黒物質サブハローを実際に検出して標準理論に重要な制限を付けるために、本研究において重力レンズ天体の高空間分解能天体観測に基づいた暗黒物質分布の新しい導出方法を開発した。

研究成果の概要（英文）：Hierarchical clustering models of cold dark matter (CDM) predict that a galaxy-sized dark halo with total mass being comparable to the Milky Way contains thousands of substructures (so-called CDM subhalos) having each mass of million to billion solar masses. To directly identify such substructures and set limits on standard model of dark matter, we have developed the new method based on radio observation of gravitationally lensed objects using ALMA, TMT and other large-aperture telescopes with extremely high angular resolution.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2009年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2010年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
年度			
年度			
総計	12,500,000	3,750,000	16,250,000

研究分野：天体物理学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：暗黒物質、電波観測、重力レンズ

1. 研究開始当初の背景

研究を開始する当初から、宇宙背景輻射衛星（WMAP）による宇宙背景光の温度揺らぎの観測等により、宇宙の幾何学構造が劇的に高い精度で決定できる時代に入っていった。すなわち、宇宙膨張のダイナミクスを定める宇宙論パラメータ（宇宙空間の曲率、宇宙密度パラメータなど）が10パーセント以内の精度で求めることが可能となってきた。

そして、我々が新たに知る宇宙像は、約7割の暗黒エネルギーと約3割の暗黒物質で占められているものであった。これらの量やその時間発展をさらに正確に決定することが、今後の宇宙論における主たるテーマであり、そのための多くの巨大プロジェクト（たとえばWFMO S、L S S Tなど）が世界的に計画され検討されていた。

このようにして膨張宇宙の枠組みが固まっ

てきた中で、今後観測的宇宙論において解明すべき最も重要な問題のひとつは、宇宙膨張を大きく左右する暗黒物質の詳細な空間構造の解明、さらに、この暗黒物質のダイナミクスに支配された銀河、銀河団といった宇宙の諸階層構造の起源である。

暗黒物質の候補として最も有力なものは、冷たい暗黒物質（CDM）である。その主たる理由として、CDM理論に基づく初期密度揺らぎパターンとそれに基づく暗黒物質ハローの階層的合体は、観測される様々な宇宙の大規模構造（銀河の空間分布など）を大変良く説明できるからである。また、CDMが重力支配するハローの下で、バリオンが急速に冷却して星が生まれ銀河が形成されるとするシナリオは、観測される銀河の平均密度や内部速度といった統計量の間関係を自然に説明できる。このようにCDMに基づく構造形成は、宇宙におけるあらゆる空間構造や物質構造を理解するための、最も標準的な理論という位置づけにある。

一方、研究開始当初までに行われてきた詳細な理論計算や銀河・銀河団の観測から、銀河・銀河団の内部にわたる小スケールの空間範囲において、CDM理論の予言と大きく矛盾するような事項が幾つも判明してきており、標準理論を揺るがす大きな問題となってきた。最も重要な問題のひとつに、ミッシングサテライト問題とよばれるものがある。すなわち、銀河系のような典型的な銀河の周りには20個程度の伴銀河（矮小銀河）のみ存在していることが知られているが、CDM理論によれば桁違いに多数の小ハロー、すなわち質量が太陽の1千万倍から10億倍程度のCDMの小塊（CDMサブハロー）が数百個以上存在することが期待され、観測事実と大きく食い違っている。このような質量範囲にあるサブハローは、宇宙における最初の天体（始原天体）の形成母体となり、宇宙初期の再電離過程において大変重要であると共に、階層的な合体を繰り返して銀河が形成され現在見られるような形態に至る過程において本質的な役割を成す。観測される伴銀河の数に合わせて、全ての暗黒物質サブハローにおいて銀河が生まれないようにするには、銀河形成を抑制するような物理機構が働かねばならず、ひとつの有力な考え方として、宇宙再電離に伴う光電離作用によってガスの冷却が抑制されるとするものがある。しかし、この場合矮小銀河内の星は全て再電離以前に生まれていなければならないが、局部銀河群における矮小銀河内の恒星の観測と大きく矛盾する。要するに、理論・観測の双方が全く矛盾した状態に陥っていた。

さらに、このサブハローの問題に加えて、銀河ハローや銀河団ハロー中心部の密度構造に関して、理論予言と観測結果とが大きく異なっていることも知られており、これらの問題は小質量ハローの階層的合体過程に基づく限り普遍なものである。したがって、銀河・銀河団スケールにおける冷たい暗黒物質ハローの集積過程と存在形態を知ることは、宇宙において目に見える物質部分がどのように形成されたかを解明する上で最も本質的で中心的な課題であると言える。

2. 研究の目的

本研究の目的は、この暗黒物質構造の解明のために、近未来に実現される超高解像度電波観測に基づく方法論と観測実践の検討を行なうものである。

天文学において近年の観測技術は大きく発展してきており、特に、すばる望遠鏡に代表される大型の光学赤外線望遠鏡によって、銀河・銀河団における暗黒物質の大域的な空間分布が調べられており、具体的にCDM理論が予言するものと比較できるところまでに達している。このような光学赤外線望遠鏡が解像できる暗黒物質構造の空間スケールは、銀河団サイズよりも大きなスケールに渡るものに限定され、我々が最も知りたい銀河スケールにおける暗黒物質の詳細な密度分布や質量関数に至らない。ところが、近未来において超高解像電波望遠鏡（ALMA、SKAなど）が建設中あるいは計画中であり、このような電波望遠鏡は我々に劇的に新しい暗黒物質情報を与えるものと期待される。その主たる理由として、このような電波望遠鏡によって、ミリ秒角からマイクロ秒角の角度スケールに迫る天体の詳細な電波マッピングが可能となり、このような小空間スケールに対応する暗黒物質の構造を導くことが可能となるからである。ここで用いる主たる方法は、暗黒物質の微細構造が背景電波源からの光をその重力で影響を与える、いわゆる重力レンズ現象である。

本研究では、このような来たる超高解像電波望遠鏡観測を視野に入れて、暗黒物質構造を解明する目的の新しい研究プロジェクトを発足させ、その準備と遂行を行なう。そして、暗黒物質ハローが銀河・銀河団やその周囲においてどのような状態で存在しているか、つまり質量関数、空間分布、速度分布を導出することを試み、このようなハローの動力学的状態と銀河形態の形成過程とがどのように関係しているのかを、理論と観測の両面から総合的に解明することを目標とする。この目標達成のために、理論と観測それぞれに秀で

た研究者チームを構成し、互いに有機的に相互作用することによって、暗黒物質に関する全く新しい知見を得ることを最大の課題とする。

3. 研究の方法

暗黒物質はその周囲に及ぼす重力を通じて存在形態を導出することが可能となる。暗黒物質ハローの詳細な構造を見出す有力な方法は、それらが背景の光に引き起こす重力レンズ現象である。我々は重力レンズ現象に基づく方法を駆使して、銀河・銀河団における暗黒物質構造の導出に対して実績を積んできた。銀河ハローにおける暗黒物質に関しては、4重クエーサーの相互のフラックス比の異常に基づいて、レンズ天体である手前の銀河内部における暗黒物質サブハローを導出する方法を提唱した (Chiba 2002)。この方法は当該分野において広く受け入れられている。また、弱い重力レンズの方法をハッブル望遠鏡とすばる望遠鏡による詳細な銀河観測データに適用することによって、銀河団における暗黒物質の密度分布とその問題点をはじめて明らかにした (Broadhurst et al. 2005)。この最新成果も頻繁に引用されている。また、重力レンズ現象に基づく方法をさらに発展させて、始原天体起源のブラックホールを次世代スペース電波干渉計によって検出する方法 (Inoue & Chiba 2003) や暗黒物質サブハローの実際の物理量 (空間分布、質量分布) を建設中の電波望遠鏡ALMAによって導出する方法 (Inoue & Chiba 2005) なども提案してきた。このように、重力レンズを用いた理論的方法と現存や将来の大望遠鏡による観測を組み合わせることで、暗黒物質の性質を解明する多くの可能性があることがわかってきた。さらに、暗黒物質サブハローが銀河円盤構造に対してどのような動力学的作用を及ぼすかも、N体数値実験を用いて調べてきた (Hayashi & Chiba 2006)。しかし、このような初期研究の段階で判明したのは、こういった暗黒物質の新しい導出方法の開発と具体的な理論的解析の実践、さらに実際の観測データの解析方法の構築、といった早急に実施すべき重要な事項が全く手付かずの状態である、ということである。たとえば、重力レンズ現象のフラックス比統計からどのような暗黒物質構造が期待されるか、恒星によるマイクロレンズ現象がどの程度影響しているのか、さらに、暗黒物質ハローの詳細な3次元動力学構造に基づく重力レンズ現象の解析など、多くの重要な理論的解析と大規模数値実験の実践を要する問題が山積している。

そこで、本研究チームの組織によって、(1)

銀河スケールにおける暗黒物質 (冷たい暗黒物質、ブラックホール) の存在形態を導く新しい方法論の確立、(2) 高解像度電波観測装置に基づく暗黒物質の探査の実施とその解析方法の確立、(3) 暗黒物質の存在形態に関する理論的理解の確立、の3本柱を基にして、銀河における暗黒物質の存在形態を解明することを目的とする。さらに、これらの研究目的を達成することによって、一般銀河の形成とその進化に関する新しい知見を獲得することを目標とする。

4. 研究成果

研究目的に記述したように、本研究の目標は暗黒物質の存在形態とその銀河進化における意義を様々な視点から研究して、今後の高解像度天体観測を用いた暗黒物質探査に生かしていくことにある。以下にその成果を記す。

(1) 多重像クエーサーを用いた暗黒物質部分構造の解析

多重像クエーサーのフラックス比異常に基づいて暗黒物質を導出する際に、そのようなクエーサーの中にはレンズ銀河の中の恒星による重力レンズ効果、すなわちマイクロレンズ効果を受けているものも少なからずある。つまり、フラックス比異常が恒星によるマイクロレンズ効果なのか、CDMサブハローによるレンズ効果なのかを明確に区別する必要がある。そこで我々は、中間赤外線によって対象となるクエーサーを観測することにより、CDMサブハローのみの効果を導出する着想を得た。クエーサーは典型的には赤方偏移が2や3といった距離にあるので、静止系では近赤外線となり、これは丁度クエーサーの中心核周りにあるダストトーラスからの黒体放射のピーク波長に近い。なぜなら、このようなダストトーラスは、中心核からの連続光で熱せられ、ダストの昇華温度近くの1800Kに熱せられていると期待される。トーラスの内径はおおよそ1パーセックかそれ以上と推測され、これはレンズ銀河にある恒星のアインシュタイン半径に比べて圧倒的に大きい。したがって、このような赤外線の波長では、恒星によるレンズ効果を考慮しなくてもよいし、途中のレンズ銀河における星間吸収の効果も無視できると思われる。

このような着想により、すばる望遠鏡を用いて実際に幾つかの重力レンズクエーサーを中間赤外線の撮像装置で観測した。そして、中間赤外線域における詳しいフラックス比の導出と詳細な重力レンズモデルの構築に基づいて、各クエーサー手前にあるレンズ銀

河におけるCDMサブハローの存在状況について有意な制限を与えることができた。

(2) 暗黒物質集積過程と銀河進化

円盤銀河を取り囲むハローと呼ばれる広大な空間には、100億歳をこえるような古い年齢の恒星（ハロー星）や球状星団が分布している。ハロー星は円盤部分にある若い恒星とは全く異なる元素組成と空間運動を持ち、銀河系の形成と進化過程に対して大変重要な情報を提供する。なぜなら、年齢が古い恒星はすなわち最初に生まれた恒星であり、原始銀河系の物理状態を反映した性質をもっているからである。また、これらの星は、銀河系の広い空間域を軌道運動しているため、このような運動を支配する背景の暗黒物質による重力ポテンシャル、すなわち暗黒物質の分布を導出するのに大変都合が良い。

このような動機に基づき、スローン・デジタル・スカイ・サーベイ（SDSS）と呼ばれる掃天観測の大規模なデータの解析を国際共同研究によって進め、銀河系にある恒星系ハローの構造が2層構造を示していることを明らかにした。すなわち、ハローは2つの広範に重複している構造成分（内側のハローと外側のハロー）に分かれ、それぞれ異なる空間分布や軌道分布、金属含有率（ヘリウムより重い元素の存在率）の分布を示すことが明らかになった。内側のハローは回転楕円型で、長軸半径は6万光年、短軸半径は4万光年程度の長さをしている。内側のハローにある恒星はそれぞれいろいろな方向に空間運動をしているが、平均すると銀河円盤と同じ方向に約30km/sで回転運動をしている。一方、外側のハローは全体的に球に近い形をもち半径50万光年以上まで達している。外側のハローにある恒星の空間運動は、驚くことに平均して銀河円盤とは逆方向に約80km/sで回転運動をしている。また、外側のハローは内側のハローよりも金属含有率が低いことがわかった。

それぞれのハロー成分は異なる物理機構によって形成されたと考えられる。特に、角運動量の方向が違うハロー成分を単一の重力収縮で達成されない。恐らく、暗黒物質の階層的合体過程が本質的な原因であり、ハローの内側と外側でその合体過程に大きな違いがあったのだらうと推測され、実際に詳細な数値実験によって上記の解析結果に対して一定の再現ができています。

(3) 高空間分解能電波観測による暗黒物質部分構造の導出方法

点源のレンズ像のフラックス比異常を用いて、手前のレンズ構造を探る方法では、観測から得られる情報量が十分ではないので、暗黒物質の詳細な存在形態を導出するには不十分である。もっと直接的にCDMサブハローの存在証拠とその物理量を決めたいところである。そのためには、空間的にある程度広がった光源を使い、レンズ現象によって大きくアーク状に広げられたものを利用するという着想を得た。なぜなら、レンズ位置にCDMサブハローが幾つかあると、それらが重力レンズ効果によって「影」のようなスポットをアーク状の像の中に与えるからである。ここで、光源内部にもともと存在している微細構造は、多重像を使って取り除くことができる。そこで、このような「影」の特徴を調べれば、CDMサブハローの質量関数や空間分布を知ることが可能となる。

この具体的な方法論について、重力レンズの詳細な理論モデルの構築に基づいて調べた。そして、十分な空間分解能を有する望遠鏡、例えばALMAを用いれば、サブハローの「影」の検出が可能になることを見出した。さらに「影」の輝度分布からCDMサブハローの3次元マッピングができることを詳細な計算によって示した。同様な原理で、さらに高い空間分解能観測によって、CDMサブハローだけでなく種族III起源のブラックホールや中質量ブラックホールの「影」をも検出できる可能性があることがわかった。

(4) 30メートル光学望遠鏡を用いた計画

前述のように、すばる望遠鏡の様な光学望遠鏡と中間赤外線装置の組み合わせによって、重力レンズクエーサーのフラックス比異常を具体的に探査することが可能となるが、8メートル級の望遠鏡で実際に観測できるターゲットは10個に満たない。そこで、もっと多くのレンズサンプルを観測して統計的に有為な結果を得るためには、30メートル級の大きな光学望遠鏡と十分に精度の高い中間赤外線装置が必要になる。

日本の光学・赤外線分野の将来計画において、ハワイ島に30メートル望遠鏡（TMT）を建設するプロジェクトに国際協力に参加することになっている。また、同様に国際共同研究によって、この望遠鏡に装着する新しい中間赤外線観測装置（MICH I）の開発計画がある。我々のグループではこの装置開発グループと共同で研究を進め、暗黒物質の部分構造を導出するためには装置にどのような性能を持たせるべきかを検討した。そして、実際にTMTとMICH Iの組み合わせを用いた観測計画の立案を行うことができた。

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 14 件)

- ①Carollo, D., Beers, T. C., Chiba, M., 他 6 名、Structure and Kinematics of the Stellar Halos and Thick Disks of the Milky Way Based on Calibration Stars from Sloan Digital Sky Survey DR7, 2010、アストロフィジカルジャーナル、査読有、712、692--727
- ②Ishigaki, M., Chiba, M., Aoki, W., Chemical Abundances of Outer Halo Stars in the Milky Way, 2010、日本天文学会欧文誌、査読有、62、143-178
- ③Tanaka, M., Chiba, M., Komiyama, Y., Guhathakurta, P., Kalirai, J. S., Iye, M., Structure and Population of the Andromeda Stellar Halo from a Subaru/Suprime-Cam Survey, 2010、アストロフィジカルジャーナル、査読有、708、1168-1203
- ④Zhang, L., Ishigaki, M., Aoki, W., Zhao, G., Chiba, M., Chemical Compositions of Kinematically Selected Outer Halo Stars, 2009、アストロフィジカルジャーナル、査読有、706、1095-1113
- ⑤Hayashi, H., Chiba, M., On the Size Evolution of a Galactic Disk in Hierarchical Merging of Cold Dark Matter Halos, 2009、アストロフィジカルジャーナル、査読有、702、871-879
- ⑥Garcia, P. A. E., Aoki, W., Inoue, S., Ryan, S. G., Suzuki, T. K., Chiba, M., 6Li/7Li estimates for metal-poor stars, 2009、ヨーロッパジャーナル、査読有、504、213-223
- ⑦Ohashi, S., Chiba, M., Inoue, K. T., Lens Mapping of Dark Matter Substructure with VSOP-2、2009、In Approaching Micro-Arcsecond Resolution with VSOP-2: ASP Conf. Ser., 査読無、Vol. 402, Eds. Y. Hagiwara et al., pp.290-291
- ⑧Minezaki, T., Chiba, M., Kashikawa, N., Inoue, K. T., Kataza, H., Subaru Mid-Infrared Imaging of the Quadruple Lenses. II. Unveiling Lens Structure of MG0414+0534 and Q2237+030, 2009、アストロフィジカルジャーナル、査読有、697、610-618
- ⑨ Bekki, K., Chiba, M., Origin of Structural and Kinematic Properties of the Small Magellanic Cloud, 2009、オーストラリア天文学誌、査読有、26、48-68
- ⑩Bekki, K., Tsujimoto, T., Chiba, M., Role of Galactic Gaseous Halos in Recycling Enriched Winds from Bulges to

Disks: A New Bulge-Disk Chemical Connection, 2009、アストロフィジカルジャーナルレター、査読有、692、24-28

- ⑪Ishigaki, M., Chiba, M., Aoki, W., Kinematics and chemical abundances of metal-poor stars in the Galactic outer halo, 2008、ドイツ天文学誌、査読有、329、1073-1075
- ⑫Brown, T. M., Beaton, R., Chiba, M. 他 14 名、The Extended Star Formation History of the Andromeda Spheroid at 35 kpc on the Minor Axis, 2008、アストロフィジカルジャーナルレター、査読有、685、121-124
- ⑬Bekki, K., Chiba, M., Formation of the Small Magellanic Cloud: An Ancient Major Merger as a Solution to the Kinematical Differences between Old Stars and H I Gas, 2008、アストロフィジカルジャーナルレター、査読有、679、89-92
- ⑭Bekki, K., Chiba, M., McClure-Griffiths, N. M., The Magellanic impact: Collision between the Outer Galactic H I Disk and the Leading Arms of the Magellanic Stream, 2008、アストロフィジカルジャーナルレター、査読有、672、17-22

[学会発表] (計 8 件)

- ① 田中幹人、他、すばる主焦点カメラで探る NGC55 恒星ハローの構造と種族 I、日本天文学会 2010 年秋季年会、2010. 9. 24、金沢大学
- ② 岡本美子、他、The science drivers for a mid-infrared instrument for the TMT, SPIE, 2010. 06. 30、アメリカ
- ③ 千葉 柁司、広視野撮像・分光サーベイに基づく銀河考古学の展開、日本天文学会 2009 年秋季年会、2009. 9. 16、山口大学
- ④ Daniela Carollo、他、Structure and Kinematics of the Stellar Halos and Thick Disks of the Milky Way Based on Calibration Stars from SDSS DR7, IAU265, 2009. 08. 12、ブラジル
- ⑤ 田中幹人、他、すばる主焦点カメラで探るアンドロメダ恒星ハローの構造と種族、日本天文学会 2009 年春季年会、2009. 3. 27、大阪府立大学
- ⑥ 石垣美歩、他、銀河系外部ハローに属する金属欠乏星の軌道運動と化学組成、日本天文学会 2008 年秋季年会、2008. 9. 12、岡山理科大学
- ⑦ 林 寛人、他、銀河円盤の形成における暗黒物質サブハローの影響、日本天文学会 2008 年春季年会、2008. 3. 26、国立オリンピック記念青少年総合センター
- ⑧ 大橋 盛徳、他、重力レンズで探る暗黒物質サブハロー、日本天文学会 2008 年春季年会、2008. 3. 26、国立オリンピック記

6. 研究組織

(1) 研究代表者

千葉 柁司 (CHIBA MASASHI)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50217246

(2) 研究分担者

井上 開輝 (INOUE KAIKI)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：70388495

峰崎 岳夫 (MINEZAKI TAKEO)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：60292835

(3) 連携研究者

齋藤 正雄 (SAITO MASAO)

国立天文台・ALMA 推進室・助教

研究者番号：90353424

亀野 誠二 (KAMENO SEIJI)

鹿児島大学・理学部・准教授

研究者番号：20270449

菅井 肇 (SUGAI HAJIME)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：50291422

住 貴宏 (SUMI TAKAHIRO)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教

研究者番号：30432214