

すばるによって冷たい暗黒物質を読み解く

千葉 柁 司

〈東北大学大学院理学研究科 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉〉

e-mail: chiba@astr.tohoku.ac.jp

冷たい暗黒物質に基づく構造形成論は、現在の標準理論として広く受け入れられているが、典型的な銀河やそれ以下の空間スケールでは未解決の問題が存在する。本稿では、すばる望遠鏡を用いた研究成果を紹介して、この暗黒物質の問題に迫る。

1. はじめに

冷たい暗黒物質 (CDM) に基づく構造形成論は、宇宙におけるさまざまな大構造の様子をよく説明でき、現在の理論的パラダイムとなっている。たとえば、銀河や銀河団といった明るく輝く天体や、宇宙に点在する銀河間雲などは、一様な空間分布になっておらず、CDM が予測するような集まり方をしている。また、最新の宇宙背景放射の温度揺らぎの観測結果によれば、宇宙項入りの膨張宇宙において、CDM に基づいて計算した予測とぴたりと一致することが知られている。このように、CDM は空間スケールで1メガパーセックを超えるような宇宙の大構造をよく説明でき、宇宙全体の密度の約3割を占めることもわかってきた。

ところが、近年の計算機の発展により、膨張宇宙における CDM の階層的合体過程に関して、これまでになく高解像度の N 体シミュレーションが可能となり、その結果観測に合わない新しい問題が判明してきた。特に、CDM の標準理論では、銀河系のような規模の銀河のハロー空間に、数百から千にのぼる数の小さな暗黒物質ハロー (CDM サブハロー) の存在を与える^{1), 2)}。個々のサブハローの質量は数百万から数億倍の太陽質量と考えられ、質量の2乗に反比例するような質量

関数が期待されている。ところが、銀河系の周りやアンドロメダ銀河などを眺めても、そのような数にのぼる銀河は見当たらず、せいぜい1ダース程度の暗い伴銀河を認めるのみである。これは、「ミッシングサテライト問題」として知られており、CDM は1メガパーセックより小さな空間スケールでは観測をうまく説明できない可能性がでてきた。

このような状況から、標準的な CDM 理論とは異なって、小スケールにおいて密度揺らぎのパワースペクトラムが小さいとする別の暗黒物質理論が提唱されたり、あるいは、CDM 理論の枠組みの中で問題を解決しようと試みも提案されている。後者の考え方としては、必ずしもすべての CDM サブハローの中で銀河が形成されるのではなく、宇宙背景紫外光の照射といった星間ガスの冷却を抑制する効果で、サブハローの一部のみで星が生まれる条件が整うというものである。いずれにせよ、このような銀河スケール内において、暗黒物質がどのような分布をしているかは、CDM 理論の正否を問ううえでとても重要となってきた。また、CDM サブハローが銀河ハロー内にどの程度存在しているかという問題は、銀河以下の空間スケールにおける密度揺らぎの初期分布と密接に関係しているため、それらが引き金となって生まれるであろう種族 III などの始原天体

と宇宙再電離の問題ともかかわってくる。さらに、CDM サブハローの階層的合体が銀河形成過程に大きく影響を与えることから、銀河形態の起源といった長年の問題ともかかわりがあり、たいへん重要なテーマと認識されてきた。

2. CDM サブハローを検出する方法

では、このような目に見えない暗黒物質の塊の存在をどうやって確認できるだろうか。おそらく最も自然な方法としては、その重力が周囲に及ぼす影響を探るのが良いであろう。まず、CDM サブハローがたくさんあると、銀河円盤などの恒星系に力学的な影響を与えうるので、そのような考察からサブハローの性質に制限を与えることができる。例として、重いサブハローが多く存在していると、銀河円盤と重力相互作用をすることによって、銀河円盤の厚さが観測されているものよりも大きくなってしまいうだろう。もう一つの方法として、サブハローが重力レンズ現象に与える影響を見るものである。背景に光源があり、その手前に銀河などの重力レンズがあると、光源からの光の経路がずれることによって、増光したり像が歪んだりする。そこで、レンズの中にサブハローなどの「つぶつぶ」がたくさんあると、このような重力レンズ現象に影響が出るので、それを確認しようというものである。

前者の方法に基づいた研究はいくつか存在するが、結果がまだよく整理されていないのが現状である一方、後者の重力レンズを用いた方法は近年精力的に調べられている。特に、多重像を示すようなクエーサーにおいて、各像間のフラックス比が異常を示すものが着目されてきた。このような多重像クエーサーでは、通常のスムーズな重力ポテンシャルをもったレンズを使っても、各像間のフラックス比がどうしても再現できないという問題があったが³⁾、この原因は、レンズ銀河の中に多数存在するサブハローが重力レンズ現象に影響を与えている効果と期待されるからであ

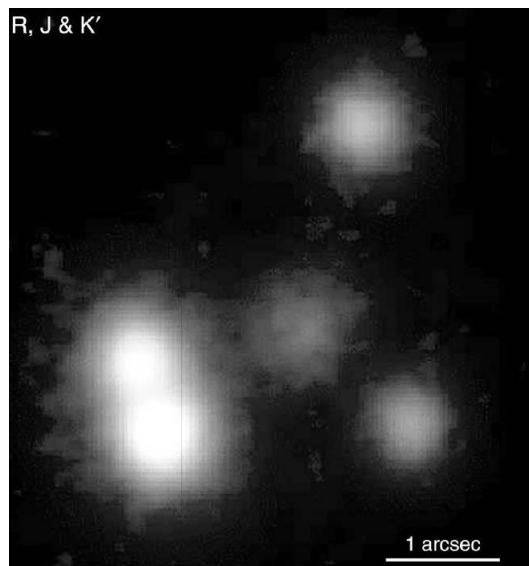


図1 すばる CISCO による PG1115+080 像⁵⁾。すばるホームページ掲載の画像より。

る⁴⁾。その例として、すばるのファーストライト年に CISCO を用いて撮像された、PG1115+080 という多重像クエーサーのイメージ (R, J, K' バンドの合成) を図1に示す⁵⁾。左斜め下に二つの近接したレンズ像 (上がイメージ A2, 下がイメージ A1) が存在するが、これは光源がレンズのコースティックと呼ばれる位置にちょうどあって、二つの近接するイメージがアインシュタイン半径に対応するような臨界線に現れているものである。図2に各レンズ像の位置を再現するレンズモデルの様子を示す。レンズ理論によれば、この二つの近接した像はそれぞれ同じ明るさを示すはずなのに、図1から明らかなようにイメージ A1の方が明るいのがわかる。なお、ハッブル宇宙望遠鏡による観測でも同様な結果が得られており、イメージ A2と A1の比が波長によらないことから、塵による減光効果ではないことが示されている。そこで、スムーズなレンズモデルの仮定を捨て、どちらかの像の近傍にサブハローがあって摂動を与えているのではないかと期待するのである。このようにフラックス比が異常を示す多重像

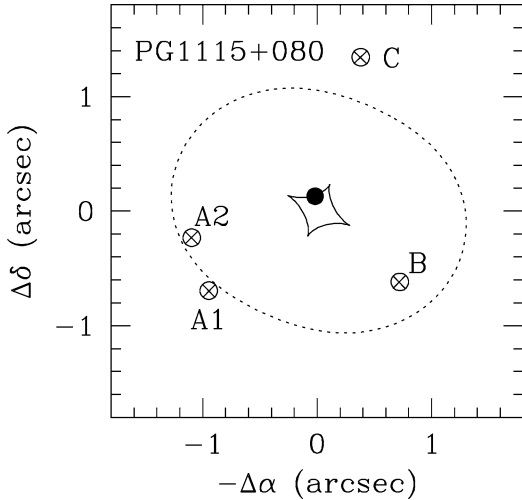


図2 PG1115+080のレンズモデル。黒丸は光源、 \otimes 丸はレンズ像位置を表し、実線と破線はそれぞれ caustics と critical lines を示す。

クエーサーはいくつも見つかっており、「anomalous flux ratios」をもったクエーサーと称されている。ここで、多重像クエーサーの一つに二重クエーサーがあるが、これではレンズモデルに制限を与える情報量が足りないため、フラックス比の異常性を確かめることはできない。したがって、四重像かそれ以上の像をもったものが、フラックス比異常のサンプルとなる。

もっとも、銀河の周囲には球状星団や目に見える伴銀河もあるので、これらもこの現象に一役買っているかもしれないが、よく調べてみるとその確率はほとんどないことがわかっている⁴⁾。これはそのような天体の数が CDM サブハローに比べて圧倒的に少ないことが主な理由である。そこで、すでに知られているフラックス比異常を示す四重クエーサーの割合に対して、各レンズ銀河の中に CDM サブハローがどの程度あれば説明可能であるか統計を取った研究がある。それによると、総質量比にして約数パーセントの CDM サブハローがあれば良いと推測され、宇宙論的な N 体計算が予言する数値とほぼ同等であろうとされた^{6), 7)}。

3. 中間赤外線観測の動機

ところが、フラックス比異常を示す四重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 (microlensing) を受けているものも少なからずあると思われる⁸⁾。レンズ像のフラックスが電波で測られているもの、すなわち電波を出すクエーサー (radio-loud QSOs) においては、この効果は気にしなくてよいだろう。なぜなら、電波放射領域の大きさが恒星のアインシュタイン半径よりも圧倒的に大きいために、恒星による重力レンズ効果が効かないと期待されるからである。

ところが、電波で見えないクエーサー (radio-quiet QSOs) では、レンズ像フラックスの観測波長が可視光や近赤外線 (静止系で紫外線や可視光) のみとなり、これらの波長域の放射領域が恒星のアインシュタイン半径より小さいことから、恒星によるレンズ効果も無視できなくなる。つまり、恒星によるレンズ効果なのか、あるいは CDM サブハローによるレンズ効果なのか区別できない。さらに、このような観測波長では、レンズ銀河内の塵による減光の可能性もあるので、この点も明確にしないといけない。また、radio-loud QSOs の場合でも、電波放射領域の大きさをきちんと評価できないために、CDM サブハローのアインシュタイン半径、すなわちその質量が評価できないという問題がある。

これに対して、中間赤外線によって対象となるクエーサーを観測してやれば、上記のような問題が解決されると考えた。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、これはちょうどクエーサーの中心核周りにあるダストト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 1,800 K に熱せられていると期待される⁹⁾。ト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。さらに、中間赤外線観測する最大の利点は、いわゆる「dust reverberation」効果によって、中心核からの連続光の変化とダストトラスからの放射のそれに時間差が生じ、これがちょうど中心核とトラス間の距離に比例することから、トラスの典型的なサイズを評価できる点にある。むしろ、対象となるクエーサーの赤方偏移では、この時間差は長すぎて測定はできない。だが、この原理に基づいて、ハレアカワ山頂に建設されたマグナム望遠鏡によって時間差の系統的な観測が行われており、トラスサイズと中心核の光度に有意な相関があることが明確となっているので¹⁰⁾、この関係を遠方のクエーサーに適用することで、対象となるクエーサーのトラスサイズを評価できる。そうすると、中間赤外線観測で得られるレンズ像フラックス比から、CDM サブハローの質量に対して有意な制限をつけることが可能となる。

4. すばる COMICS による観測

このような動機に基づいたすばる観測課題が採択され、平成16年5月のゴールドデンウィーク時期に、峰崎岳夫氏（東京大学）、柏川伸成氏（国立天文台）、片堅宏一氏（宇宙研）、井上開輝氏（近畿大）からなるチームで観測することになった。用いる観測装置はCOMICSで観測波長は11.7ミクロン、ターゲットはフラックス比異常を示す四重クエーサーの代表格であるPG1115+080とB1422+231とした。中間赤外線の観測ではチョッピング・ノッディングの設定なども必要となり¹¹⁾、初めてのことばかりでどうなることか不安であったが、経験豊かな観測屋が共同研究者としてそろっていたことと、藤吉拓哉氏、酒向重行氏の手厚いサポートがあり無事遂行できた。期待さ

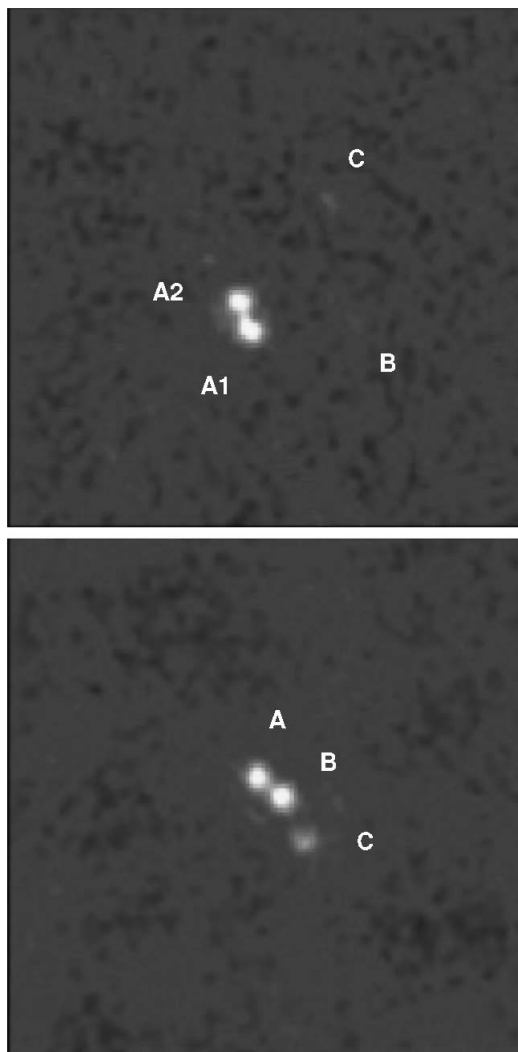


図3 すばる COMICS による PG1115+080 と B1422+231 の 11.7 ミクロン帯像。

れる中間赤外線フラックスに関しては、典型的なクエーサースペクトラムからある程度押さえていたが、実際に観測した際には、期待値よりも明るいことが判明し、比較的短時間の露出ですぐに有意な撮像イメージを得ることができた。特に、空間的によく分離された複数の重力レンズ像を無事確認できたときは、みんなで万歳することになった。とてもエキサイティングな観測であった。

得られたイメージを図3に示す。すばるの大口

径の威力で、中間赤外線域での各レンズ像が見事に分離されているのがわかる。PG1115+080では、近接する明るいA1とA2のペアが0.48秒という小さな角度しか離れていないにもかかわらずよく分離されており、さらに比較的暗い像であるBとCもかすかに検出できている。B1422+231では、三つの近接する像A、B、Cのセットがよく分離できている。AとB間の角度は0.5秒である。可視などの他の波長域では、これらの南東側にもうひとつ暗い像Dが見つかるが、あまりに暗すぎて今回の観測では検出されていない。

この図は、200枚以上の多くの撮像データに対して、角度分解能を落とさないように「drizzle」

と呼ばれる技術で重ね合わせて達成されたもので、峰崎さんを中心とした共同研究者の方々がたいへん注意深いキャリブレーションを行った成果である。個々のレンズ像をさらに詳しく解析してみると、PG1115+080においてA2とA1の間中間赤外線フラックス比は $A2/A1=0.93\pm 0.06$ という値を取り、可視域や近赤外線域でのフラックス比(≈ 0.65)と有意に違うことが判明した。B1422+231では、像A、B、Cの間中間赤外線フラックス比は、 $A/B=0.94\pm 0.05$ 、 $C/B=0.57\pm 0.06$ となり、他の波長域において得られているフラックス比とほぼ同等であった。また、今回の観測で得られた11.7ミクロン帯における全フラックス(それぞれ17.5 mJy, 19.2 mJy)を、他の波長域におけるフラックスと比べてスペクトル全体の形を見たものが図4である。今回の中間赤外線域(静止系で近赤外線域)でフラックスの超過(「infrared bump」)が見られることから、ダスト起源の熱放射であることが確認できる。

5. レンズに対する制限

今回観測された中間赤外線における放射領域(静止系で近赤外線放射領域)の大きさは、次のような議論から評価できる。マグナム望遠鏡の観測から、ダストトーラスの静止Kバンドでの放射領域内径が中心核のVバンド絶対光度の平方根に比例することが確立されている¹⁰⁾。この関係を今回のターゲットに適用すると、PG1115+080とB1422+231におけるダストトーラスの内径は、それぞれ1パーセックと2.7パーセック程度になると考えられる。これは角度にして、0.1ミリ秒と0.37ミリ秒になる。トーラス全体の大きさはよくわからないが、典型的には内径サイズと同程度かそれ以上と考える。一方、このトーラスが囲んでいるクエーサー中心部(紫外光から可視光の放射領域)、すなわちクエーサー中心核のサイズは、降着円盤のモデルを介してそれぞれ0.7マイクロ秒と3マイクロ秒と見積もることができる。

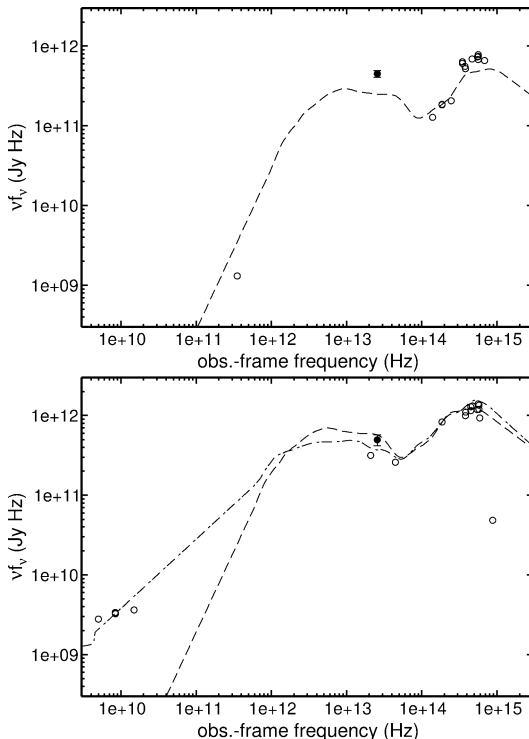


図4 PG1115+080とB1422+231のフラックス分布。黒丸は今回得られたフラックス、白丸は他の文献から採用したフラックスを示す。破線、一点鎖線は、radio-quiet QSOsとradio-loud QSOsの平均的なスペクトルを示す。

このような光源のサイズに対して、レンズ天体のアインシュタイン半径がどの程度になるかが鍵となる。すなわち、後者が十分大きいと光源は重力レンズ効果によって増光・減光を受けるが、逆に光源のサイズの方が大きいと重力レンズ効果が弱くなり、アインシュタイン半径よりも桁で大きくなると、増光・減光が全く見られなくなる。ここで、アインシュタイン半径内に含まれるレンズ天体の質量を M とすると、光源の場所におけるアインシュタイン半径に対応する角度は M の平方根に比例し、0.1 太陽質量（典型的な恒星の質量）においては、おおよそ 0.8 マイクロ秒となる。したがって、恒星によるレンズ現象では、そのアインシュタイン半径がダストトラスの大きさ（0.1 ミリ秒または 0.37 ミリ秒）と比較して無視できるほど小さいので、中間赤外線フラックスに全く影響を与えないことになる。

では、今回の観測結果はどのようなことを示唆するであろうか。PG1115+080 における A2 と A1 イメージの中間赤外線フラックス比を見ると、十分 1 に近くスムーズな重力レンズモデルの予測とほぼ一致することがわかる。これに対して、可視域や近赤外域におけるフラックス比は 0.65 という値を取り大きく食い違う。したがって、このようなフラックス比異常の原因は、通常の CDM サブハローではなくて、恒星によるものと思われる。より正確には、 M は 16 倍太陽質量以下と見積もられる。仮に、サブハローの内部が等温球的な密度分布をしていると仮定すれば、100 パーセント以内の質量 (M_{100}) は太陽質量の 1 万倍以下となる。一方、B1422+231 における A, B, C の間のフラックス比を見ると、中間赤外線では $A/B=0.94$, $C/B=0.57$ に対して、スムーズなレンズモデルの予言は $A/B=0.76$, $C/B=0.50$ となり、イメージ A において大きく食い違っていることがわかる。このフラックス比の違いがおおよそ 20% であることを用いて、 M は 200 倍太陽質量以上、等温球の仮定をした場合での M_{100} は 7 万

倍太陽質量以上、といった下限値が求まる。したがって、フラックス比異常の原因は恒星ではあり得なく、おそらく CDM サブハローによるレンズ効果であると思われる。（解析結果のさらなる詳細は、参考文献 12 に述べてある。）

6. 次の段階へ

このように、本研究テーマにおいて中間赤外線の観測がたいへん重要になることが示された。また、すばる望遠鏡の利点である高い空間分解能と集光力も重要となる。ただし、フラックス比異常を示す四重クエーサーの中で、中間赤外線によって観測されたのは今回の 2 例のみである。また、そもそも多重像クエーサーの中で中間赤外線の観測が行われたものは、ほかに 1 例しか存在しない。したがって、今後さらに系統的に観測を進めて、フラックス比異常の成因を明確にし、CDM サブハローの存在頻度を決める必要がある。

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を紹介したが、もっと直接的に CDM サブハローの物理量を決めたいところである。それには、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できればよい。なぜなら、レンズ位置に CDM サブハローがいくつかあると、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できるかもしれない。こういった可能性を井上開輝氏と一緒に議論していたが、既存の装置ではその「影」を明確に検出できるほど空間分解能がないものの、彼は ALMA を用いれば「影」の検出は可能になるということを見だし、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

明示してくれた¹³⁾。同様な原理で、現在計画中の VSOP-2 の空間解像度を利用すれば、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もわかり¹⁴⁾、今後の展開がおもしろくなりそうである。

本研究は、たいへん強力な共同研究者（峰崎氏、柏川氏、片堅氏、井上氏）とともに行われており、本稿はその意味で彼らの貢献なしではありえない。彼らに感謝したい。

参考文献

- 1) Klypin A., Kravtsov A. V., Valenzuela O., Prada F., 1999, ApJ 522, 82
- 2) Moore B., Ghigna S., Governato F., Lake G., Quinn T., Stadel J., 1999, ApJ 524, L19
- 3) Mao S., Schneider P., 1998, MNRAS 295, 587
- 4) Chiba M., 2002, ApJ 565, 17
- 5) Iwamuro F., et al., 2000, PASJ 52, 25
- 6) Dalal N., Kochanek C. S., 2002, ApJ 572, 25
- 7) Kochanek C. S., Dalal N., 2004, ApJ 610, 69
- 8) Schechter P., Wambsganss J., 2002, ApJ 580, 685
- 9) Kobayashi Y., et al., 1993, ApJ 404, 94
- 10) Minezaki T., et al., 2004, ApJ 600, L35
- 11) 片堅宏一, 2004, 天文月報 97, 210
- 12) Chiba M., Minezaki T., Kashikawa N., Kataza H., Inoue K. T., 2005, ApJ 627, 53
- 13) Inoue K. T., Chiba M., 2005, ApJ, in press
- 14) Inoue K. T., Chiba M., 2003, ApJ 591, L83

Deciphering Cold Dark Matter Substructure with Subaru

Masashi CHIBA

Astronomical Institute, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan

Abstract: Although the Cold Dark Matter scenario has been a widely accepted theoretical paradigm for structure formation in the Universe, it confronts serious discrepancies with observations on small scales, i.e., galactic and sub-galactic scales. We report here on our recent observational studies of the issue using the Subaru Telescope.