

# ALMAで迫る暗黒矮小銀河と ダークマターの正体

井上 開輝

〈近畿大学理工学部理学科 〒577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1〉

e-mail: kinoue@phys.kindai.ac.jp



多くの観測により、冷たいダークマター（CDM）に基づく構造形成シナリオが支持されている。しかし、1 Mpc以下の小スケールでは理論と観測が一致しない問題がいくつかある。その一つが「行方不明の矮小銀河問題」である。天の川銀河ハロー内において予言されているダークサブハローの数が観測されている矮小銀河の数より圧倒的に多い、という問題である。この不一致の原因として、複雑なバリオンの物理過程や温かいダークマター（WDM）の速度分散による密度ゆらぎの減衰などが考えられているが、本当の原因はわかっていない。もし、ダークマターがCDMであれば、宇宙には極めて暗い暗黒矮小銀河が多数存在するはずである。本稿では、ALMAによって観測されたサブミリ波銀河SDP.81やキューサー MG0414+0534の重力レンズ像の解析から判明した最新の結果について紹介する。

## 1. 小スケール問題

現在、宇宙論的スケールのゆらぎの観測から、宇宙定数 $\Lambda$ とCDMを主成分とする平坦な $\Lambda$ CDMモデルが標準的宇宙モデルと考えられている。しかし、1 Mpc以下のスケールでは理論と観測が合わない問題がいくつか知られている。その一つが「行方不明の矮小銀河問題」である。天の川銀河の質量スケールにおいて、 $N$ 体シミュレーションから予言される「ハローに束縛されているより小さな質量のハロー」（サブハロー）の数が観測されている矮小銀河の数よりも圧倒的に多すぎる、という問題である<sup>1)</sup>。宇宙には、見えている矮小銀河よりはるかに多くの暗黒矮小銀河が存在しているかもしれない。その他にも「カस्प-コア問題」がある。 $N$ 体シミュレーションが予言するハローは、一般に中心で質量密度が発散する（カस्प）。ところが、ダークマターがバリオンより圧倒的に多いと考えられるうずまき型矮小銀河や不

規則型矮小銀河でカस्पをもたない場合（コアをもつ）があることが知られている<sup>2)</sup>。さらに最近になって「大きすぎてつぶせない問題」<sup>3)</sup>が指摘されている。これは銀行救済のための資本注入の話ではない。 $N$ 体シミュレーションは観測に比べ、質量中心付近により集中する質量プロファイルをもつサブハローを予言する、という問題である。

これらの「小スケール問題」に対して、大きく分けて二つの解決策が考えられている。一つ目はバリオンの効果である。宇宙再電離時における強い紫外線輻射や超新星によるフィードバックで宇宙初期に星形成を阻害し、サブハロー内のバリオンを減らすことにより、後にサブハローに降着する質量を減らすことが可能である<sup>4)</sup>。二つ目はCDMの代わりに特殊な性質をもつダークマターを考えることである。例えば、温かいダークマター（WDM）を考えると、ダークマター粒子が初期宇宙の熱浴から脱結合するときに光速に近い

速度をもつことで、宇宙の密度ゆらぎをならし、サブハローの数を減らしたり、サブハローを構成する質量の中心集中を阻害したりすることが可能である<sup>5)</sup>。また、ダークマターが自己相互作用をもつ場合も、同様の効果を生み出すことができる<sup>6)</sup>。

これら多くの解決策のうちいったいどれが本当なのだろうか？ その謎を解くキーとなるのが、サブハローの質量関数である。サブハローの中には矮小銀河が潜んでいるに違いない。しかし、矮小銀河の多くが観測にかからないくらい暗ければ、質量関数を電磁波で測るのは難しいだろう。しかし、重力レンズ効果を使えば直接的にサブハローの質量関数を測定することができる。特に後述する四重像レンズの「フラックス比異常」の測定が最も有力な観測手段となりうる。それは、いったいどのような「異常」なのであろうか。

## 2. 重力レンズのフラックス比異常

重力レンズとは、天体の重力によって、その背後に近い光源の発した光の経路が曲げられ、天体がレンズとしてはたらく現象のことを指す。天球上で光源の位置がレンズとなる天体に十分近いと、光源は複数に分裂した多重像として観測される。一つの光源に対し、多重像の数は奇数であることが知られているが、光源に最も近いレンズ像は大抵の場合、非常に暗くなるので、観測される多重像の数は偶数である場合が多い。この多重像の位置と明るさを測定することによって、手前のレンズ天体の質量に関する情報を得ることができる。もちろん像の数が多ければ、それだけ多くの情報を得ることができるが、像の数が6個以上の重力レンズ天体は極めてまれであるので、像が四つある四重像レンズを用いるのが良い(図1)。また、レンズ天体が複数であったり、円盤成分を含んでいるとモデリングが複雑になるので、孤立した比較的大きな質量をもつ楕円銀河が主レンズとなるシステムが良い。楕円銀河ハロー中の暗黒矮小銀河は、小さな副レンズとして光源の明るさ

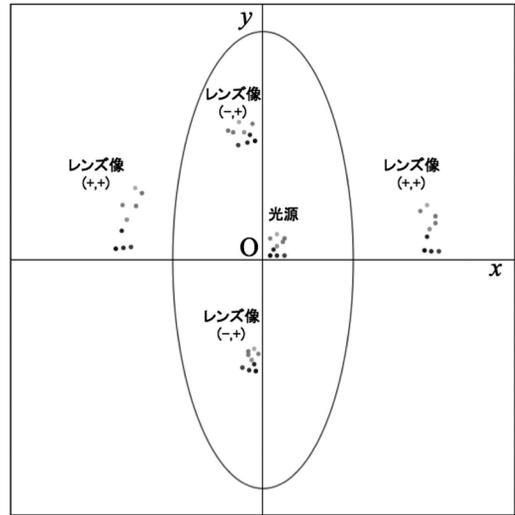


図1 楕円対称な質量分布をもつレンズ銀河(中心で密度発散)による多重像。原点Oはレンズ中心にあり、光源は原点Oに近い「2」の形に並んだ九つの点源から成る。四つのレンズ像のうち、二つは正のパリティ(x,y軸方向共に反転しない)、二つは負のパリティ(x軸方向のみ反転)をもつ。実際はO付近の光源のある場所には何も見えない(中心で密度が有限な場合は光源近傍に暗い「第五番目の像」が現れる)。楕円は拡大率が発散する「臨界曲線」を表す。臨界曲線はレンズ銀河の質量密度が同じ等高線になっている。銀河の半長軸はy軸に沿っている。

や位置を微妙に変化させるだろう。楕円銀河を構成するガスの粒子と楕円銀河ハロー中のダークマター粒子を視線方向に射影したとき、天体の質量分布はおよそ楕円対称となるだろう。このとき、像の相対的な位置は観測とよく合う(≦0.1%)が像の明るさの比が合わない(〜10%)場合を「フラックス比異常」と呼ぶ。ただし、視線方向にある天体による吸収や散乱が無視できる場合である場合に限られる。「フラックス比異常」はレンズ天体の質量分布が局所的もしくは大域的に楕円対称分布からずれるために生じる。もし、楕円銀河ハロー中に暗黒矮小銀河が多数あれば、レンズ天体の質量分布は局所的に楕円対称分布からずれるため、「フラックス比異常」が生じるだ

ろう<sup>7)-11)</sup>。一般相対論によれば、像の位置はレンズ天体の重力、像の位置の空間変化はレンズ天体の潮汐力と密度に対応するが、像の拡大率がもともと大きい場合、後者の効果は増大する。なぜなら、像の拡大率は像の位置の空間変化量が大きいほど大きいからである。したがって、レンズ効果を受けた明るい像のすぐ近くに暗黒矮小銀河があれば、副レンズとしてはたらし、レンズ像の位置をほとんど変化させることなく、拡大率だけ変化させることができる。つまり「フラックス比異常」をうまく説明することができる。

暗黒矮小銀河がレンズとして新たに加われば、レンズの数を増やすことになるので、常にレンズ像は明るくなるのではないかとナイーブには考えられるが、必ずしもそうではない。質量の大きい主レンズによって多重像ができる場合を考えよう。多重像のうち一つを選び、その像の中心を原点とするデカルト座標系 $r=(x, y)$ をレンズが存在するレンズ面上にとる。同様に光源が存在するソース面上にデカルト座標系 $R=(X, Y)$ をとる。像の中心付近では光路の変化は十分小さいため、 $r$ と $R$ の対応は線形変換で近似できる。さて重力レンズ効果によってそれぞれの像の座標の符号が変化する場合を $-$ 、しない場合を $+$ で表すことにする。四重像ができる場合、符号の変化は $(-, +)$  (もしくは $(+, -)$ )と $(+, +)$ の2種類である(図1)。 $(-, +)$ では $x$ の増大する向きが $+$ から $-$ へと反転するが $y$ の増大する向きはそのままであるため像は裏返しになる。ここで光源の $X$ 軸方向の大きさが $\Delta X$ であったとし、光路の近くに小さな副レンズを置いてみよう。すると、図2で示すように主レンズによって像の向きが反転しない場合、その軸方向に像が拡大する( $|\Delta x'| > |\Delta x|$ )が、像の向きが反転する場合は逆に縮小する( $|\Delta x'| < |\Delta x|$ )。重力レンズ効果の有無を問わず、輝度は常に保存されるため、もし縮小する効果が増大する効果より強ければ、結果として像は減光することになる<sup>12)</sup>。まとめると、 $(+, +)$

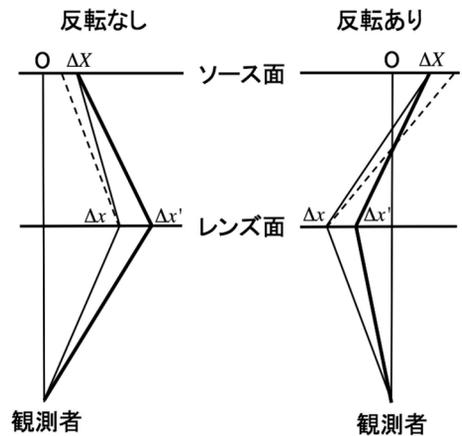


図2 副レンズによる光路の変化。ソース面で $X$ 座標が $\Delta X > 0$ の場所に点光源がある。主レンズのみの場合光は細い実線、さらに光路近くに副レンズを加えた場合、太い実線をたどりながら観測者に到達する。それぞれ、レンズ面上で $\Delta x, \Delta x'$ の位置を通過する。点線は主レンズと副レンズがレンズ面にあった場合、レンズ面上で $\Delta x$ を通過するような光路である。副レンズによって光はより大きく曲がるため、点線は反転なしの場合は原点 $O$ に近づき、反転ありの場合は原点 $O$ から遠ざかる。ソース面上の位置 $(X, Y)$ とレンズ面上の位置 $(x, y)$ は線形変換で移り合うため、同じ $\Delta X$ に対し、レンズ面上で反転なしの場合は $\Delta x' > \Delta x$ 、反転ありの場合は $|\Delta x'| < |\Delta x|$ となる。

(正のパリティ)の場合は必ず増光するが、 $(-, +)$  (負のパリティ)の場合は減光もしくは増光する可能性がある。 $(-, -)$  (正のパリティだが像が180度回転)の場合は必ず減光する。観測されるフラックス比異常がこのような像のパリティから予測される結果と矛盾しなければ、レンズは大きな主レンズと小さな副レンズの組み合わせで表されると考えて良いだろう。つまり、レンズ天体の質量分布は局所的に楕円対称分布からずれていることになる。

### 3. 暗黒矮小銀河の場所

暗黒矮小銀河は主レンズ銀河のハロー内にあるとは限らない。視線方向のどこにあっても良いの

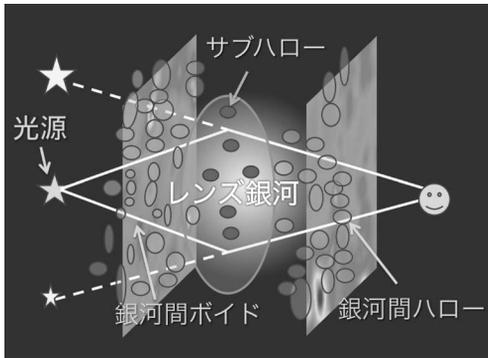


図3 重力レンズ効果の模式図。レンズ銀河（主レンズ）の重力により背後の光源の光路が分裂し、複数の像として観測される。光路上にあるサブハローや銀河間ハローが副レンズとしてはたらき、像のフラックス比に影響を及ぼす。

である。銀河間空間にある暗黒矮小銀河がたまたまレンズ像の近くにあれば、主レンズ銀河のサブハローの場合と同様にフラックス比異常を引き起こすだろう。前述の像のパリティとフラックス比異常の関係も基本的には変わらない。筆者らは知られているキューサー-銀河四重像レンズを詳細に解析し、 $N$ 体シミュレーションの予測と比較した結果、 $\Lambda$ CDMモデルでは「視線方向のハローやポイドによる重力レンズ効果はサブハローの効果を凌駕する」ことを明らかにした<sup>13), 14)</sup>。その割合は光源の赤方偏移 $z_s$ に依存する。 $z_s \sim 0.5$ のとき視線方向の構造とサブハローの射影質量密度の割合は3:2、 $z_s \sim 3$ のときは3:1である<sup>15)</sup>。実際、観測は高い赤方偏移の光源をもつレンズほどフラックス比異常が強いことを示している。もし、サブハローがフラックス比異常の主な原因であれば、このような依存性をうまく説明することができない。レンズ銀河ハローの性質と光源の赤方偏移の間には相関が全くないからである。しかし、視線方向のハローが原因であれば観測をうまく説明することができる。高い赤方偏移ほど光源までの距離が増大し、視線方向のハローが光路を横切る確率が高くなるからである。これらのハローにはガスやダストを含んだ暗黒矮小銀河が潜んでいるか

もしれない。ただし、視線方向のハローによる効果は単一のハローによるものなのか、複数の小さなハローによるものなのかはまだわかっていない。今後研究の進展が期待される。

## 4. ALMAによる観測

サブミリ波は主レンズが楕円銀河である四重像レンズを観測する波長帯として都合が良い。楕円銀河はダストが少ないため、レンズ像のじまになることがなく、レンズ像が視線方向のダストによる吸収をほとんど受けないからである。また、ダスト連続波や分子ガスの輝線が光源である場合、そのサイズが十分大きいいため、レンズ銀河内にある星によるマイクロレンズ効果も無視できる。ただし、高精度のモデリングをサブミリ波の観測結果だけで行うためには、約0.1秒角以下の高い解像度をもつ観測が必要である。2017年時点でALMAはそのような観測を実行できる唯一の観測機器である。光源となる天体としてはサブミリ波銀河やキューサーが良い。前者は明るいためターゲット数が多く、後者はすでに他の波長で多数観測されているためモデリングの精度が高くなるという利点がある。

### 4.1 サブミリ波銀河SDP.81

爆発的な星形成を伴ったサブミリ波銀河SDP.81（別名HATLAS J090311.6+003906）は2014年10月に「長基線試験観測キャンペーン」の一環として国際チーム「ALMA Partnership」によって観測された<sup>16)</sup>。そのデータは2015年2月17日にアルマ望遠鏡データアーカイブで公開され、直ちに世界中の研究者が解析を始めた。SDP.81は、赤方偏移 $z_s=3.042$ にあり、赤方偏移 $z_L=0.2999$ にある楕円銀河の重力レンズ効果によってリング上に引き延ばされているため、大変興味深い。しかも、バンド7（290 GHz）で観測されたダスト連続波光画像（図4左）の解像度は0.02から0.03秒角とサブミリ波では前代未聞の高解像度であり、これを見て驚嘆した研究者は筆

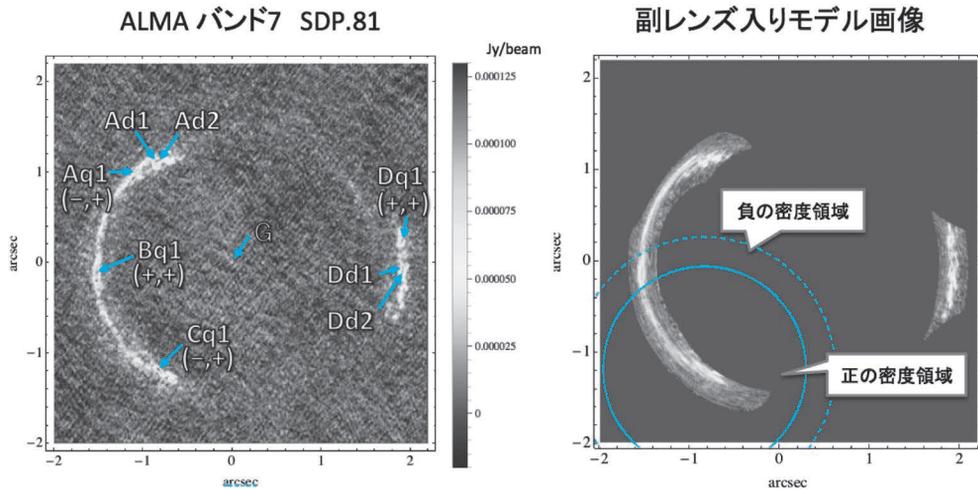


図4 左: ALMAで観測されたサブミリ波銀河SDP.81のダスト連続波長の輝度分布. 波長は約1 mmである. 主レンズである楕円銀河 (Gは楕円銀河中心のAGN) によって重力レンズ効果を受け, 明るい成分q1はAq1, Bq1, Cq1, Dq1の四重像として, また, d1, d2はそれぞれ二重像Ad1, Dd1, Ad2, Dd2, 拡がった成分は弧状に見えている. 右: 主レンズに副レンズを加えて観測を再現したモデル画像. 実線の円内は正の密度, 実線の円と点線の円の間は負の密度をもつ球対称な副レンズが主レンズのレンズ面に置かれている.

者だけではなくただだろう. また, 一酸化炭素や水の輝線のデータも同時に公開された. わずか3週間後にはマックス・プランク研究所のRybak達による最初の解析論文がarXiv上で公開された. 国内でも田村陽一氏らによって, レンズ銀河中心の超大質量ブラックホールの質量の制限<sup>17)</sup> (Ken Wong et al. もほぼ同時期に同様の結果を得た<sup>18)</sup>), 廿日出文洋氏らによって光源であるサブミリ波銀河の分子雲の性質に関する制限<sup>18)</sup> などの研究成果が得られている. 筆者らの興味は, このレンズシステムに「フラックス比異常」が見られるかどうか, もし異常があれば, 暗黒矮小銀河で説明ができるのかどうかということであった. 当然世界的な競争になるので, データ解析は急ピッチで進めなければならなかった.

筆者らはまず, バンド7 (290 GHz) で観測された画像の中で明るくコンパクトな光源成分に注目し, それらの位置情報から主レンズが楕円対称な密度分布をもつレンズモデルを作成した. 光源は非常に複雑な輝度プロファイルをもち, 明るくコンパクトな成分と暗く拡がった成分を分離する

ことが困難であった. そこで, 得られたレンズモデルを用いて観測画像の逆像を四重像ごとにそれぞれ求め, それらをソース面で線形的に足し合わせることで, ソース画像の「平均画像」を作成した. そしてその「平均画像」と観測画像の逆像四つをソース面上で比べることで「フラックス比異常」があるかどうかを確かめた. もし, フラックスがモデル予想より小さいのであれば, ソース面上で観測から求めた逆像は「平均画像」に比べ収縮し, ソース面におけるフラックスが予想値より小さくなる. 計算によると, 主レンズのB像のパリティは正, C像のパリティは負である. したがって, 近くに暗黒矮小銀河が副レンズとして存在すれば, 主レンズのみの場合に比べBは増光, Cは減光するはずである. ALMAバンド7の画像の解析から, コンパクトで明るい成分の四重像A, B, C, Dのうち, BとCが共に減光していることがわかった. 「フラックス比異常」が見つかったのである<sup>18)</sup>.

SDP.81の画像は図1に似ている. Bの像の向きは(+, +)であるため, 正の質量が近くにあれ

ば必ず増光するはずである。しかし、観測では減光している。なぜだろうか。Bの近くに「負の質量」をもつ天体が副レンズとしてはたっていたとしよう。その場合、副レンズは凹レンズとしてはたらし、光をより収束させるため、主レンズによりじゅうぶん増光した光は凹レンズによって少しだけ暗くなるだろう。つまり、観測をうまく説明できるのである。しかし、「負の質量」とはいったいどのようなものなのだろうか。それ自身が負のエネルギーをもつ特異な物質である必然性はない。なぜなら、重力レンズでは視線方向に射影された質量密度の平均値からのずれしか観測できないため、絶対値としての質量ではなく、相対的な値としての質量しか意味をもたないからである。つまり、「負の質量」をもつ領域は、視線方向に射影されたときレンズ近傍の射影質量密度の平均値に比べ密度が少ない領域に対応する。例えば、視線方向に近接した二つの暗黒矮小銀河があればその間の領域は「負の質量」になりうる。また、宇宙の平均密度に比べ密度の小さいボイドが視線方向にあれば、同じように「負の質量」になりうる。空間的にはなれていても視線方向の密度が小さい、つまり氷河の割れ目(クレバス)のようなものであっても同様の効果をうみだすだろう。

筆者は簡単のため、球対称で密度が内側で正、外側で負の一様密度をもつ質量分布をもつ副レンズをレンズ面上で主レンズに加え、観測にもっとも合う位置と大きさを求めた(図4右)。その結果、副レンズの中心はCの中で最も明るい点付近にあり、Bのあたりが「負の質量」、CからBにいたる領域が「正の質量」であることがわかった。つまり、暗黒矮小銀河があるとすれば、CからBに至る領域にあることになる。また、C付近は局所的に射影質量密度が減少していることになる。モデル画像は非常に良い精度で観測画像と合っているだけでなく、0.2秒角程度の解像度をもつ一酸化炭素の輝線(CO(8-7))データにみ

られる異常も同時に説明することができる。視線方向の構造とサブハローの射影質量密度の割合は $z_S \sim 3$ のときは3:1であるから、見つかった「フラックス比異常」は視線方向にある暗黒矮小銀河で説明できる可能性が高いが、視線方向における場所はよくわからない。今後の研究の進展が望まれる。

余談ではあるが、筆者らのグループが世界ではじめて「フラックス比異常」とそれを説明する副レンズに関する論文をarXiv上で公開(2015年10月)した3カ月後、アメリカとカナダの研究機関に属する研究者のグループが同様な論文をarXiv上に公開した<sup>21)</sup>。彼らの解析の手法は筆者らのものと異なるが、その結果はほぼ同じ、すなわち「BとCの間の視線方向に副レンズが存在する」というものであった。もちろん、彼らの解析でも視線方向の場所については何もわからない。しかし、Bのあたりが「負の質量」であるという点に関しては筆者らと彼らのグループとでは見解が分かれている。彼らの解析ではそのような痕跡は見つかっていない。残念なことに、ALMAの公式サイト(<http://alma.mtk.nao.ac.jp/e>)には先に発見した筆者らの功績は全く掲載されず、北米の研究グループの成果のみが掲載された。筆者らは直ちに、結果の解釈の部分に異なる点があるが、本質的には同様の結果である旨をALMA広報室に伝えたところ、筆者らの成果も追記していただけることになった。研究の内容ではなく、広報に関する人脈の強さで勝負が決まることに対しては少し歯がゆい思いがある。

#### 4.2 クェーサー MG0414+0534

赤方偏移 $z_S=2.639$ にあるクェーサー MG0414+0534は赤方偏移 $z_L=0.9584$ にある、楕円銀河Gの重力レンズ効果によってA1, A2, B, Cの四つの像に分裂して見えている。峰崎岳夫氏を中心としたグループがSubaruに搭載された冷却中間赤外線観測装置COMICSを用いて2005年に中間赤外線(波長 $11.7 \mu\text{m}$ )で観測した結果、フラックス

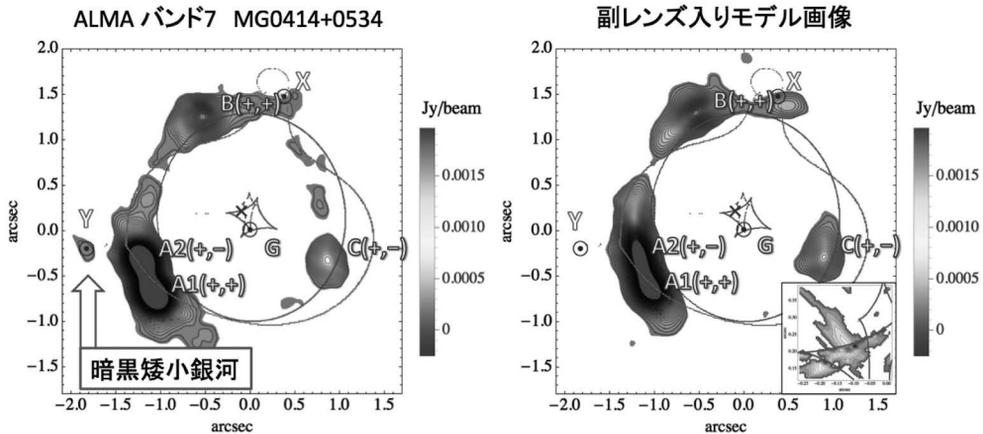


図5 左: ALMAで観測されたクェーサー MG0414+0534のダスト連続波長の輝度分布. 波長は約0.9 mmである. 主レンズである楕円銀河(Gは楕円銀河の中心)によって重力レンズ効果を受け, 明るい成分はA1, A2, B, Cの四重像, 広がった成分は弧状に見えている. ×印はクェーサーの中心位置を表す. Xは可視光や近赤外で見えている伴銀河と考えられる天体の光重心, YはALMAで初めて検出された暗黒矮小銀河起源と考えられるダスト連続波長の重心を表す. 右: 主レンズにX, Yに対応する二つの副レンズを加えて観測を再現したモデル画像. 右下枠内はソース面における光源のモデル輝度分布を表す.

比A2/A1に異常があることが見つかった<sup>22)</sup>. 光源となるクェーサーダストトーラス由来の輻射領域は, 中間赤外では楕円銀河Gの星によるマイクロレンズ効果が無視できるくらい大きい. また, 視線方向のダストによる吸収や散乱の効果は十分小さく, この異常は視線方向にあるハロー, すなわち副レンズによって引き起こされている可能性が高い. A2/A1の値は0.9くらいであり, 副レンズによりA2が減光もしくはA1が増光している可能性がある. 一方, MG0414+0534の可視光や近赤外線の像には著しい赤化が見られることが知られている. おそらく視線方向のダストが原因であろう. 特にA2の赤化が著しく, A1はやや赤化が見られるもののBやCはほとんど見られない. つまり像によって赤化の程度が異なる「微分減光」が見られる. レンズ銀河は楕円銀河であるのでダストは少ないだろう. ダストはいったいどこにあるのだろうか.

筆者らはサイクル2の一環としてALMAバンド7でMG0414+0534のダスト連続光(340 GHz)を2015年6月と8月に観測し(Project ID:

2013.1.01110.S, PI: K. T. Inoue), 「フラックス比異常」の起源を探った. その結果, A2のすぐ近くに0.2から0.3 mJyのフラックス密度をもつ薄い天体Yを発見した<sup>23)</sup>(図5). 統計的有意性は $4\sigma$ 程度である. もし, これが $z \sim z_L$ にある矮小銀河のダストの輻射だと仮定するとその質量は10の6乗から7乗太陽質量程度になる. この天体Y上に楕円対称な密度分布をもつハローを副レンズとしてはたらくように置き, 中間赤外線観測されたフラックス比A2/A1や近赤外におけるクェーサーのレンズ像の位置を再現できるかどうか調べてみた. その結果, 扁平率が十分大きければ観測値を再現できることがわかった. また, 副レンズの赤方偏移を変化させたところ, その範囲が $0.5 \leq z \leq 1$ であれば観測値を再現できることがわかった.

しかし, あまりに大きな扁平率は物理的に考えにくい. 一方, 天体Yのダストによって, A1とA2の赤化を再現できる可能性が考えられる. 小マゼラン雲におけるダスト赤化の波長依存性を仮定し, 可視光や近赤外のレンズ像の減光曲線をフ

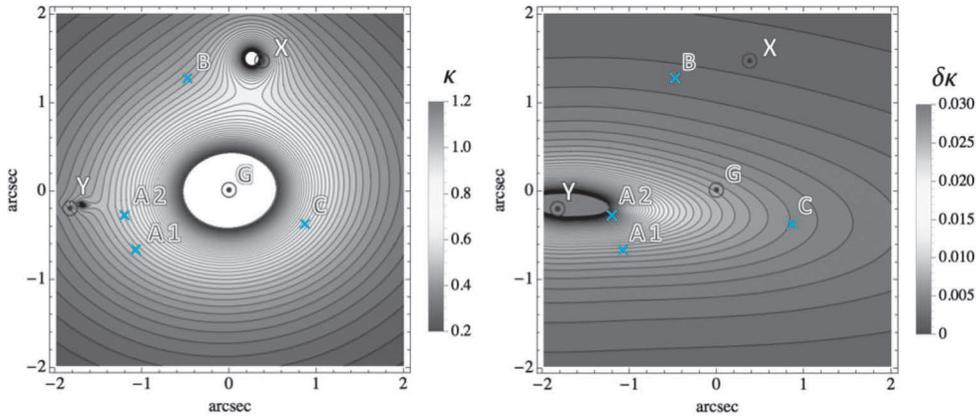


図6 左: MG0414+0534の重力レンズモデルにおける収束 $\kappa$  (質量面密度に対応). モデルは主レンズG, 副レンズX, Yを中心とする三つのレンズから成る. 右: 暗黒矮小銀河Yの収束 $\delta\kappa$ . 赤い楕円内が主レンズの面密度より数倍以上高い高密度領域を表す.

ラックス比A1/BとA2/Bにフィットさせたところ、少なくとも $0.5 \leq z \leq 1$ を満たしていれば観測結果をうまく再現できることがわかった。また、像の視線方向のダスト柱密度が副レンズの射影質量密度に比例すると仮定すると、扁平率は0.7程度であれば良いことがわかった(図6)。もし、ダストがどの場所でも副レンズの射影質量密度に比例するのであれば、A1やA2を含むダストの質量のオーダーは10の7乗太陽質量、つまり、サブミリ波のフラックス密度から求めた値とおおよそ一致する。一方副レンズの質量のオーダーは10の9乗太陽質量である。以上より、天体Yはサブミリ波以外の波長では暗い、ダストに富んだ暗黒矮小銀河である可能性が高い。おそらく大量の中性水素も含んでいるだろう。もしかすると、Yは最近話題になっている超低輝度銀河(UDG)<sup>22)</sup>のような天体かもしれない。果たしてYはサブハロー中にあるのだろうかそれとも銀河間空間にあるのだろうか。Yの正体の解明のため追観測を期待したい。

## 5. まとめと展望

筆者らは重力レンズ効果を受けたサブミリ波銀河SDP.81とキューサーMG0414+0534のALMA

による観測データを用いて、副次的に作用するレンズの有無とその正体について観測的な制限を得た。どちらのデータからも暗黒矮小銀河が存在する強い示唆を得た。特に筆者らの観測によるMG0414+0534のデータからはダスト連続光でのみ輝く暗黒矮小銀河の存在が示唆されており、今後その正体の解明が強く期待される。天体Yには大量のダストとガスが存在するにもかかわらず、どうして星が少ないのか? 謎はますます深まるばかりである。筆者らは2017年度にMG0414+0534をALMAで追観測する予定であり、さらに多くの情報が得られるものと思われる。また、今回は紙面の都合で割愛したが、同じような手法でCDMモデル以外のダークマターを含んだモデルに対しても制限をつけることができる<sup>23)</sup>。その他の重力レンズ効果を受けたサブミリ波銀河やキューサーをALMAで大量に観測すれば、暗黒矮小銀河やダークマターに関し、多くの有益な情報が得られるであろう。また、今後電波干渉計SKAなどを用いて視線方向の天体による21 cm線の輝線や吸収線とのシナジー解析を行えば、バリオンの情報も加わり、暗黒矮小銀河の形成過程に関する理解が深まるに違いない。近い将来、宇宙の小スケール問題に関して飛躍的な進展がある

だろう。

## 謝 辞

これまでの研究でお世話になった皆様，とりわけ共同研究者の松下聡樹氏，峰崎岳夫氏，千葉柎司氏，高橋龍一氏に感謝いたします。また，本稿の執筆の機会を与えてくださいました平松正顕委員に御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Klypin A., et al., 1999, ApJ 522, 82
- 2) Moore B., 1994, Nature 370, 629
- 3) Boylan-Kolchin M., et al., 2011, MNRAS 415, L40
- 4) Sawala T., et al., 2016, MNRAS 457, 1931
- 5) Lovell M. R., et al., 2012, MNRAS 420, 2318
- 6) Vogelsberger M., et al., 2012, MNRAS 423, 3740
- 7) Mao S., Schneider P., 1998, MNRAS 295, 587
- 8) Metcalf R. B., Madau P., 2001, ApJ 563, 9
- 9) Chiba M., 2002, ApJ 565, 17
- 10) Dalal N., Kochanek C. S., 2002, ApJ 572, 25
- 11) 千葉柎司, 2005, 天文月報98, 783
- 12) Inoue K. T., Chiba M., 2005, ApJ 634, 77
- 13) Inoue K. T., Takahashi R., 2012, MNRAS 426, 2978
- 14) Takahashi R., Inoue K. T., 2014, MNRAS 440, 870
- 15) Inoue K. T., 2016, MNRAS 461, 164
- 16) ALMA Partnership, Vlahakis C., et al., 2015, ApJ 808, L4
- 17) Tamura Y., et al., 2015, PASJ 67, 72
- 18) Wong, K. C., et al., 2015, ApJ 811, 115
- 19) Hatsukade B., et al., 2015, PASJ 67, 93
- 20) Inoue K. T., et al., 2016, MNRAS 457, 2936
- 21) Hezaveh, Y. D., et al., 2016, ApJ 823, 37
- 22) Minezaki T., et al., 2009, ApJ 697, 610
- 23) Inoue K. T., et al., 2017, ApJL 835, L23
- 24) van Dokkum P. G., et al., 2015, ApJL 798, L45
- 25) Inoue K. T. et al., 2015, MNRAS 448, 2704

## Probing Dark Dwarf Galaxy and Dark Matter with ALMA

**Kaiki Taro INOUE**

*Faculty of Science and Engineering, Kindai University, 3-4-1 Kowakae, Higashi-Osaka, Osaka 577-8502, Japan*

Abstract: Recently, many observations have pointed to the scenario of structure formation with cold dark matter (CDM). However, on scales  $\leq 1$  Mpc, some discrepancies with observation persist. The 'missing satellite problem' is one of the most serious obstacles: the number of dark subhalos in the Milky Way-sized halo far exceeds the number of dwarf galaxies in the Milky Way. Non-trivial baryonic physics or suppression of matter fluctuations due to free streaming of warm dark matter (WDM) may solve the problem. However, the true origin has not yet been determined. If the dark matter is CDM, then a number of faint dark dwarf galaxies would reside in the universe. In this article, I present recent results on the quadruply lensed submillimeter galaxy SDP.81 and the lensed radio-loud quasar MG0414+0534 observed with ALMA.