

銀河のダークハロー構造の多様性： 銀河系矮小楕円体銀河の観点から

林 航 平

〈東北大学大学院理学研究科天文学専攻 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3〉
e-mail: k.hayasi@astr.tohoku.ac.jp



銀河のダークハロー構造の詳細を知ることは、ダークマターの性質を知る上で重要である。特に銀河系矮小楕円体銀河は、その星の詳細な動力学解析からダークハロー構造を調べることができる。筆者らは独自に構築した動力学解析手法を用いて矮小楕円体銀河のダークハロー構造、特に中心部の密度分布を調べ、銀河によってその振る舞いが異なる、つまりダークハロー構造の多様性を発見した。本稿では小質量銀河でのダークハロー構造を調べる重要性を述べた上で、筆者らの研究成果について紹介し、この多様性を説明する理論メカニズム（の一部）について議論する。またすばる望遠鏡を用いた矮小楕円体銀河の将来観測について述べ、ダークマター研究の今後の展開を紹介する。

1. ダークマターの存在

電磁波では観測できない未知の物質の存在を最初に示唆したのは、今から88年前の1933年、カリフォルニア工科大学の研究者であったFritz Zwickyである。彼はかみのけ座銀河団に所属する銀河の速度に対してビリアル定理を適用し、それぞれの銀河を銀河団内に保持するために必要な銀河団の総質量を見積もった。その結果、その総質量は銀河団内にある銀河を足し合わせた質量の400倍も重く、彼は「かみのけ座銀河団には目に見えない物質があり、その見えない物質に支配されている」と未知なる物質の存在を指摘した [1]。その後、様々な天文観測から正体不明の物質の存在が示唆されてきた。中でも1970年代終わりから80年代にかけて、Vera Rubinらによる円盤銀

河の回転速度の観測から、銀河の回転曲線が円盤の外側までほぼ一定であることが明らかになった [2]。これは銀河円盤の光度分布から予測される回転曲線とは大きく矛盾し、未知の物質が存在する確かな観測的証拠となった*1。

この未知の物質は「ダークマター」と呼ばれるようになり、WMAP衛星 [3, 4] や Planck衛星 [5] による精密観測の宇宙論の進展により、宇宙の物質の8割以上を占める重要な物質であることが明らかになっている。しかし重要な物質であるにもかかわらず、ダークマターの正体は今でも謎に包まれており、この正体を解明することは現代物理学の極めて重要な課題であると言える。

2. CDM理論とその問題点

無衝突ダークマターである冷たいダークマター

*1 これらの功績が讃えられ、2020年、現在建設中の大型シノプティック・サーベイ望遠鏡（Large Synoptic Survey Telescope: LSST）を運用する天文台はVera Rubin天文台と名付けられた。

(Cold Dark Matter; CDM) 理論は、ダークマターの正体を直接示す理論ではないが^{*2}、この理論に基づいた宇宙の構造形成論は様々な大規模構造の観測事実を物の見事に説明でき、現代天文学の理論的パラダイムとなっている。CDM理論では、宇宙の極初期においてダークマター粒子の速度分散が光速に比べて十分小さい（力学的に冷たい）ため、宇宙初期の小さな空間スケールにおける物質密度ゆらぎが残り、小さなダークマターの塊（ダークハロー）がまず形成される。その後ダークハローが合体・集積を繰り返して大きなダークハローを形成するというボトムアップ的な構造形成シナリオを支持する。このシナリオでは、ダークハローにはそれより小さなダークハロー（サブハロー）が多数付随することを予言している。またダークハローの密度分布は、中心部ほどその密度が高くなるカスプ構造を持つことがシミュレーションから予言されている。銀河団スケールでは、これらの予言と観測結果が良く一致していることがわかっている。

一方で銀河系や矮小銀河などの小さな空間スケールでは、CDM理論の予言では説明できない観測事実がいくつか見つかっている。この矛盾を総称して「CDM理論の小スケール問題」と呼ぶ。ここでは、その問題の1つとして「コア-カスプ問題」に着目する^{*3}。前述のようにCDM理論が予言するダークハロー密度分布は中心部でカスプ構造を持つ[7, 8]。一方、ガスリッチな矮小銀河（低表面輝度銀河や矮小不規則銀河）や銀河系の衛星銀河である矮小銀河（矮小楕円体銀河）の観測から示唆されるダークハローは、中心部の密度

が一定になるコア構造を持つ[9, 10]。この理論と観測の不一致がコア-カスプ問題である。

この問題の解決策として、(i) CDM以外のダークマター理論、例えば自己相互作用するダークマターや超軽量ダークマターによってカスプ構造を作りにくくする^{*4}、(ii) CDM理論の枠組み内で超新星爆発などのバリオンフィードバックによって周囲のガスの放出が起こり、その結果の重力場変動によりカスプからコア構造に遷移する、という2つのメカニズムが提案されている。どちらがこの問題解決に本質的な役割を果たしているのかは未だ決着がつかない。しかし近年、この問題はその解決も含めて、様相が変化している。

3. コア-カスプ問題から多様性問題へ

コア-カスプ問題の状況が変わってきたのは、筆者の記憶が正しければ2015年に発表されたKyle. A. Omanらの論文[11]からである。彼らはTHINGS surveyなどで得られたガスリッチ矮小銀河の回転曲線について、CDMとバリオンフィードバックを取り入れた数値シミュレーションを用いて比較した。しかし、銀河の回転曲線は様々な形をしており、バリオンフィードバックを考慮しても再現できないほど回転曲線には多様性があることが発見された。つまり銀河によってカスプを持ったりコアを持ったりと、ダークハロー構造に多様性があることがわかったのである。その後SPARC surveyによって100個以上の銀河の回転曲線が得られ[12]、この多様性問題は確かな

^{*2} 冷たいダークマターの候補は、未知の新粒子としてWeakly interacting massive particles (WIMPs) やAxion (またはAxion like particles; ALPs) などが、一方で原始ブラックホールもその候補として挙げられている。

^{*3} 他の小スケール問題として、「Missing Satellite問題」、「Too-big-to-fail問題」、「Satellite Plane問題」が挙げられるが、その詳細については文献[6]を参照していただきたい。

^{*4} 自己相互作用するダークマターはダークマター粒子同士の弾性散乱によってハロー中心の粒子が力学的に温められコア構造を形成する。一方、超軽量ダークマターはその質量が 10^{-22} 電子ボルト程度であり、ド・ブROI波長が天文スケール（ ~ 1 kpc）になる。よってそのスケール以下の構造形成を抑制し、コア構造を作る。

ものになっている。このようにコア-カスプ問題は「観測におけるダークハロー構造の多様性をどのようなモデルで説明するか」という問題に焦点が切り替わった。

この多様性を説明できるモデルとして注目されているのが自己相互作用するダークマター (Self-interacting dark matter; SIDM) である [13]。このモデルの注目すべき点は、SIDM 自体は (自己相互作用の散乱断面積 $\sigma/m = O(1) \text{ cm}^2/\text{g}$ (つまりオーダーで $1 \text{ cm}^2/\text{g}$) で) コアを持つダークハロー構造を自然に形成する。もちろんこれでは多様性を説明できない*5。しかし SIDM ハローの重力ポテンシャルにバリオン (銀河円盤やバルジ) の重力ポテンシャルを加味することで、バリオン分布の多様性から観測結果を説明したところにある。このモデルの詳細や、どのようにして多様性問題にアプローチしたのかについては次稿を熟読していただきたい。

1つ注意したいのは、この結果によって CDM + バリオンフィードバックのシナリオが棄却されたわけではないことである。この問題はダークハローのより中心部に注目しているため、特に矮小銀河のような小さな質量スケールではより高解像度のシミュレーションが要求される。しかし計算コストが非常に高くなるため、 $O(0.1) \text{ kpc}$ の分解能が現状のリミットである。また、超新星爆発などのバリオン物理はまだ完全に理解されたわけではない。将来、より高解像度のシミュレーションとバリオン物理への理解が進展することで、上記の結果は大きく変わる可能性があることをここで述べておく。

さて、ここからが本題である。多様性問題が発

見されたのはガスリッチ矮小銀河の回転曲線からであった。そして銀河のバリオン分布の多様性 + SIDM 理論から、ダークハロー構造の多様性を説明できた (次稿)。では、矮小楕円体銀河ではどうだろうか。矮小楕円体銀河は、多様性が発見されたガスリッチ矮小銀河よりも質量が軽く、ガスを持たない星のみで構成された系である。つまり円盤やバルジなどの特徴的な分布を持たず、バリオンの重力ポテンシャルには銀河毎の違いはほとんど無いと言って良いだろう。さらに半光度半径内の力学的質量と星質量との比が $10 \sim 100$ と大きく*6、ダークマターによる重力ポテンシャルがより支配的な系である。

このような銀河にもダークハロー構造の多様性があるのだろうか。もし多様性があるのであれば、それはどのようなモデルで説明できるのだろうか。次章からは、筆者らの最新の研究成果 [14] を交えながら、これらの問いに対して現状での答えを述べていきたい。

4. 矮小楕円体銀河のダークハロー構造

4.1 解析手法

先に述べたように、矮小楕円体銀河はガスを持たず星のみで構成された系である。さらに回転運動ではなくランダムな運動によって支えられた系である。よって、回転曲線を用いることはできない。その代わりに星の速度分散分布を用いたダークハロー構造推定を行う。その手法は様々だが*7、我々はジーンズ方程式と呼ばれる系の重力ポテンシャルと星の速度分散との関係を示す方程式を用いた。特に我々は軸対称系のジーンズ方程

*5 自己相互作用の散乱断面積は速度依存性を持つため、その意味ではダークハロー構造の多様性を持つが、今回注目する銀河はほぼ同じ質量スケールにあるため、速度依存性による多様性の説明は難しい。

*6 ガスリッチ矮小銀河の質量-光度比は $1 \sim 10$ 程度で、矮小楕円体銀河よりもバリオンによる重力ポテンシャルの寄与は大きい。

*7 Schwarzschild 法やピリアル定理を使った方法など様々なアプローチがあるが、より詳しくは文献 [15] のレビューを参照していただきたい。

式を用いた矮小楕円体銀河の動力学解析手法を構築した。軸対称系での動力学解析の利点として、矮小楕円体銀河という名前の通り、この銀河の恒星分布は球対称ではなくひしゃげた形状を持つ。よって観測を考慮した軸対称は、球対称よりも現実的な解析となっている。また2次元視線速度分散分布を取り扱えることで、球対称解析で問題となっていたダークハロー構造（特に中心部のダークマター密度分布）と星の速度分散非等方性との間にある強い縮退関係を緩和できる。このモデルの詳細については、筆者の前回の記事 [16] や我々の論文 [14] を参照していただきたい。

ジーンズ方程式から星の速度分散分布を得るには、ダークハローの密度分布の情報が必要である。もちろん我々には密度分布の形状はわからないので、ダークハローの内側と外側で異なる密度の冪を許した double power law を仮定し、冪の大きさや中心密度の大きさなどは全てパラメータとして観測とのフィッティングから推定する。具体的には以下のようなダークマター密度分布を仮定した：

$$\rho_{DM}(r) = \rho_0 \left(\frac{r}{r_s}\right)^{-\gamma} \left[1 + \left(\frac{r}{r_s}\right)^\alpha\right]^{-\frac{\beta-\gamma}{\alpha}},$$

$$r^2 = R^2 + z^2/Q^2.$$

($Q, \rho_0, r_s, \alpha, \beta, \gamma$) はこの密度分布のパラメータで、それぞれ、ダークハローの軸比、スケール密度、密度冪の折れ曲がる半径、密度冪の折れ曲がりの曲率、外側の冪、内側の冪を示す。「コアカスプ」に重要なパラメータは γ で、コアの場合 $\gamma=0$ 、カスプの場合 $\gamma>0$ となる。特に N 体シミュレーションからは $\gamma \geq 1$ が予言されている。

仮定したダークマター密度分布から、各パラメータを設定しジーンズ方程式を解くことで速度分散分布を得ることができたが、観測結果と比較するにはもう1段階計算が必要になる。なぜなら、我々が観測から得られる情報は視線方向のみ、つまり天球面上の恒星系の空間分布と視線速度分布の情報しかないからである*8。これと比較するにはジーンズ方程式から得られた3次元速度分散を視線方向に投影する必要がある*9。この計算をした上で、観測データとのパラメータフィッティングを行う。

銀河系に付随する矮小楕円体銀河は、現在までに50個程度発見されているが [18, 19]、この研究では視線速度データが比較的豊富に観測されている明るい矮小楕円体銀河 (V-band 等級で $M_V < -8.7$ 、もしくは V-band 光度で $L_V > 2.5 \times 10^5 L_\odot$) に着目してダークハロー構造の推定を行う。対象となる銀河は Draco (竜座), Ursa Minor (小熊座), Carina (竜骨座), Sextans (六分儀座), Leo I (獅子座), Leo II, Sculptor (彫刻室座), そして Fornax (炉座) 矮小楕円体銀河である。この銀河たちの (公表されている中で) 最新データを用いて動力学解析を行った。次節からこの解析結果について紹介していく。

4.2 ダークハロー構造の多様性

図1は、我々が構築した動力学解析から得られた矮小楕円体銀河のダークマター密度分布である。この結果から注目すべき点は3つある。

- (i) Draco 矮小楕円体銀河のダークハローは不定性を考慮したとしても、高い可能性でカスプ構造を持つ。
- (ii) Ursa Minor, Leo I, Leo II は、密度分布の不

*8 ハッブル宇宙望遠鏡や Gaia 衛星によって位置天文学が大きく進展したことで、矮小楕円体銀河の星の固有運動が測定され始めた [17]。しかし統計的な不定性が非常に大きく、現状では視線速度の情報以上に有益なデータにはなっていない。今後、広視野近赤外線サーベイ宇宙望遠鏡 (WFIRST) や 30 m 望遠鏡 (TMT), GaiaNIR などの次世代望遠鏡の登場によって大きく進展することを期待したい。

*9 その際、系の短軸方向 (z 方向) と視線方向とのなす角もパラメータとなり、現状の解析では決めることができないパラメータであるが、ダークマター密度分布には大きく影響しないことは確かめられている。

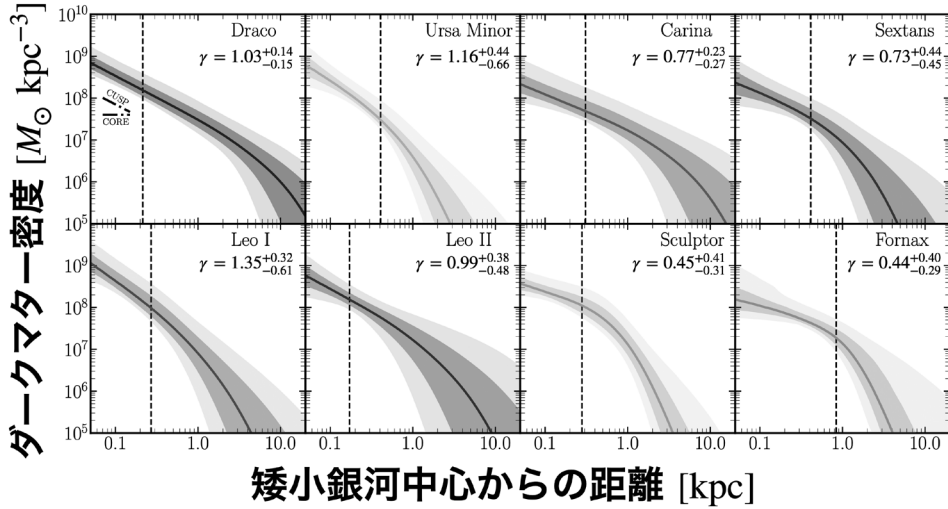


図1 動力学解析から得られた各矮小楕円体銀河のダークマター密度分布. 各パネルの実線は中央値, 濃い色塗り領域は68%, 薄い領域は95%信頼区間を示す. 縦の破線は各矮小楕円体銀河の半光度半径を示している. また, 解析から得られた中心密度の冪 (γ) の中央値と1 σ の値も各パネルに示す. Dracoのパネル上にはコア ($\gamma=0$) とカusp ($\gamma=1$) でのダークマター密度の冪を示した.

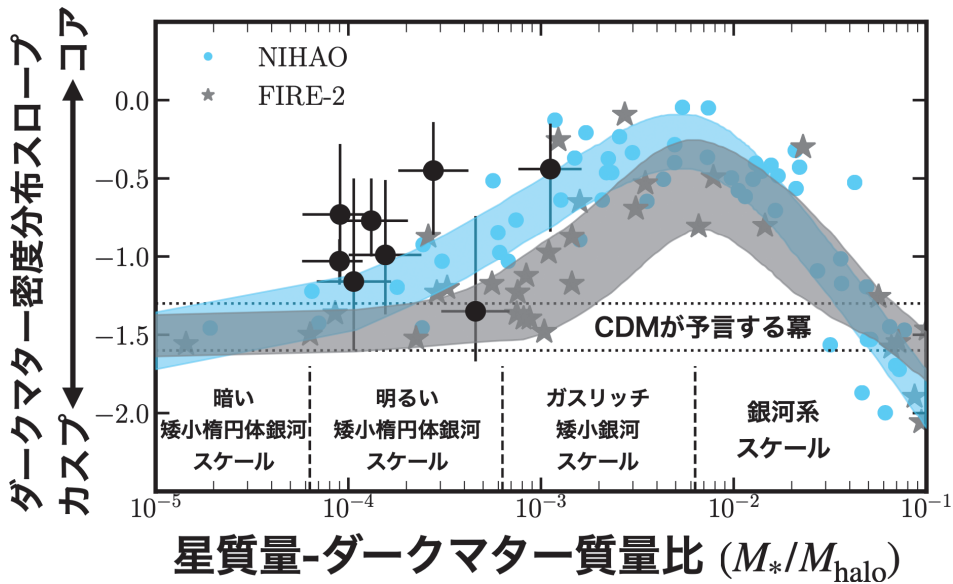


図2 ダークマター密度分布の中心部の冪と星質量-ダークハロー質量比との関係. 縦軸の値が小さいほど強いカuspを示す. エラーバー付きの黒丸は我々の解析結果. ダークハローのピリアル半径に対して1.5%に対応する半径での密度の冪を計算している. また異なる研究グループのCDM+流体シミュレーションの結果も示しており, 丸がNIHAO[20], 星がFIRE-2シミュレーション [21]の個々のダークハローの結果を示している. 色付きの帯は各シミュレーション結果 (丸と星) から得られる中心部の冪と星質量-ダークハロー質量比の関係である. 2つの点線の間は, ダークマターだけのシミュレーションから得られるダークマター中心密度の冪を示す.

定性が大きい、Dracoと比べて急な ($\gamma > 1$) 密度の冪を持つ。一方で他の銀河 (Carina, Sextans, Sculptor, Fornax) は弱い冪 ($0 < \gamma < 1$) を持ち、不定性の範囲内でコア構造も許容される。

- (iii) ダークマター密度分布の不定性 (特に外側での大きな不定性) の原因の1つは、観測データの量と範囲に起因している。明るい矮小楕円体銀河は見かけの広がり差が1度以上あり、現在運用されている望遠鏡の分光観測装置では銀河の外側まで十分観測できていない。これは後で紹介する観測装置によって大幅な改善が期待される。

以上の結果から、観測的不定性はまだ残っているが、多くの矮小楕円体銀河においてカスプ構造を支持することがわかった。さらにダークマター密度分布の中心部の冪は銀河によって異なることが明らかになり、矮小楕円体銀河においてもダークハロー構造の多様性があることを示すことができたのである。この多様性はダークマターのみシミュレーションからは再現することが難しい。ではこの多様性をどのように説明できるのか。次節ではこの多様性の起源について議論する。

4.3 ダークハロー構造多様性の起源

4.3.1 CDM理論+バリオンフィードバック

2章で述べたように、超新星爆発などのフィードバックによってカスプからコアに遷移するメカニズムが提案されている。近年、高解像度のCDM+流体シミュレーションによって、ダークハローの中心密度分布は星質量 (または星質量とダークハロー質量の比) によって異なることがわかってきた。

図2は、ダークマター密度分布の中心部の冪と星質量-ダークハロー質量比との関係を示している。横軸は銀河の質量スケールに対応している。

青と灰色の点と帯は、異なる研究グループによるCDM+流体シミュレーションの結果を示す。この結果から、フィードバックによるコア形成はガスリッチ矮小銀河スケールでピークを持ち、星質量が軽くなるにしたがってその効果は弱くなり、 $M_*/M_{\text{halo}} \lesssim 10^{-4}$ の銀河スケールではフィードバックの効果は無視できるほど小さくなる傾向がある^{*10}。つまり、バリオンフィードバックによってダークハロー構造の多様性を説明できる可能性があることを示している。ただし、青と灰色の帯が異なる振る舞いを表していることからわかるように、バリオンフィードバックをシミュレーションにどのように組み込むかによって結果が変わってしまうことに留意したい。

一方で我々の動力学解析から得られた結果を見ると、不定性はやはり小さくはないが、傾向としてはシミュレーションの結果と概ね一致しているように見える。最小二乗法を用いたフィッティングからも γ と M_*/M_{halo} の間に弱い逆相関関係が確認できた。したがって、矮小楕円体銀河ダークハロー構造の多様性の起源は、現在のところCDM理論の枠組みの中で超新星爆発などのバリオンフィードバックによってある程度説明可能であるのかもしれない。

4.3.2 SIDM理論

ガスリッチ矮小銀河ダークハローの多様性を説明できたSIDM理論ではどうだろうか。ガスリッチ矮小銀河の場合、SIDMダークハローに加えてバリオンによる重力ポテンシャルの多様性から回転曲線の観測結果を再現することができた。一方矮小楕円体銀河は円盤などの特徴的な分布を持たず、バリオンによる重力ポテンシャルの多様性は期待できない。またダークマターが支配的な系であるため、バリオンの重力ポテンシャルがダークマターの重力ポテンシャルに与える影響は雀の涙

10 ちなみに $10^{-2} \lesssim M_/M_{\text{halo}}$ の大質量銀河スケールではガスの断熱収縮などの効果によって中心の密度が上がり、強いカスプ構造になる。

ほどである。したがって、この理論では矮小楕円体銀河ダークハローの多様性を説明することが難しいと考えられる。

しかし、ダークマターの自己相互作用で生じる重力熱力学的コア崩壊 (gravo-thermal core collapse) によってSIDMハローの中心密度が高くなるのがわかってきた [22]。さらに潮汐力によるダークハロー外縁部の剥ぎ取りが強いほど重力熱力学的コア崩壊が加速し、より高密度になることが理論的に期待されている [23]。このメカニズムによって矮小楕円体銀河ダークハローの多様性を説明できる可能性がある。実際に銀河系矮小楕円体銀河のダークハロー中心密度と各銀河の銀河系ハロー中の軌道運動 (特に近銀点) には逆相関があり、このメカニズムを支持する観測結果も出ている [24]。しかし、矮小楕円体銀河の軌道進化や潮汐力の影響には大きな不定性が残されていることから、今後の理論と観測の進展に注目していきたい。

5. まとめと将来への展望

CDM理論の小スケール問題の1つであったコア-カスプ問題は、ガスリッチ矮小銀河の回転曲線の観測から「ダークハロー構造の多様性をどのようなモデルで説明するか」という問題に変化し、現在もその解決方法について議論されている状況にある。本稿では、銀河系の矮小楕円体銀河の動力学解析を通してコア-カスプ問題の再検討、ダークハロー構造の多様性が存在するののかについて議論した。結果として、矮小楕円体銀河にもダークハロー構造の多様性が存在することが示唆された。そしてCDM理論+バリオンフィードバックのシミュレーション結果と同様の傾向が見えた。一方で回転曲線の多様性を説明したSIDM理論も、重力熱力学的コア崩壊というメカニズムを通して矮小楕円体銀河ダークハローの多様性を説明できる可能性がある。本稿ではSIDM理論に着目したが、もちろん超軽量ダークマターなどの

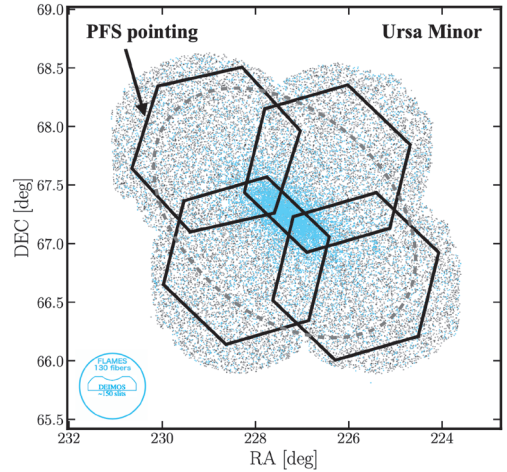


図3 すばるPFSによる銀河系矮小楕円体銀河観測の例。Ursa Minorに対して4 PFS pointingsでの観測を計画している。青と黒の点はすばるHSCの観測で得られたUrsa Minor周辺の恒星で、青が色等級図から選ばれた矮小銀河メンバー候補星、黒が銀河系円盤やハローにある星の候補である。破線楕円は潮汐半径を示す。左下は現行の分光装置であるVLT/FLAMESとKeck/DEIMOSのField of Viewである。

ダークマター理論も可能性として十分残っている。したがってダークハロー構造の多様性問題を説明するためには、より詳細なシミュレーションや新たなアイデアが必要となっている。現状ではどのメカニズムが問題解決に本質的な役割を果たしているのかは決着がつかず、今後も宇宙物理学・素粒子物理学の両観点から議論されていくだろう。

我々の結果から明らかなように、矮小楕円体銀河ダークハロー構造の推定はまだまだ不定性が大きい。それはこの銀河の分光観測が不十分であることにも起因している。特に4.2節でも述べたように矮小楕円体銀河は広天域に広がっており、現在稼働中の分光装置では外側まで十分な観測ができていないのが現状である。現在稼働中のすばるHyper Suprime Cam (HSC)によって、銀河矮小楕円体銀河の深く・広い測光データが得られている。さらにHSCで観測された多くの星に対し

て、2023年から稼働予定のすばる Prime Focus Spectrograph (PFS) による矮小楕円体銀河の広天域観測がすばる戦略枠プログラムで計画されている。

図3は、PFSによるUrsa Minor矮小楕円体銀河の観測計画例を示す。PFSは現行の分光観測装置 (VLT/FLAMES, Keck/DEIMOS^{*11}) に比べて直径1.3度という非常に広い視野と、約2,400本の分光ファイバーを兼ね備えており、一度の観測で多数の天体を観測可能である。Ursa Minorに対しては4 pointingでの観測を計画しており、筆者が行っている観測シミュレーションによると、約5,000個の矮小銀河メンバー星を取得することができる。現在の分光データが300個程度であることを考えるとデータ量は約17倍(!!!)にもなり、統計量の大きな飛躍が期待される。このように、すばる望遠鏡主焦点の能力を最大限に活かしたHSCとPFSによって矮小楕円体銀河の豊富なデータが得られ、ダークハロー構造そしてダークマター理論に重要な制限を与えることができると期待している。

一方で、より暗い矮小楕円体銀河 (ultra-faint dwarf galaxy; UFD) は、ダークマターの本質的な性質を知る上での新たなフロンティアとして注目されている。なぜなら、図2からもわかるようにUFDはバリオン物理の影響をほとんど受けない恒星系であり、ダークマターの性質を反映した密度分布を保持していると考えられるからである。実際にこの銀河を用いたダークハロー構造の研究が行われており、いくつかのUFDでカスプ構造を示唆する結果 [25] や重力熱力学的コア崩壊を考慮しないSIDMに限って言えば散乱断面積に非常に厳しい上限 ($\sigma/m \lesssim O(0.01) \text{ cm}^2/\text{g}$) が付けられている [26]^{*12}。しかし非常に暗い銀河である

ため、 $O(10)$ 個程度の星の分光データしか得られていない。PFSよりは遠い将来になるが、30 m望遠鏡 (Thirty meter telescope; TMT) に搭載される Wide-Field Optical Spectrometer (WFOS) [27] はこの観測を十分可能にする。

次世代の大型望遠鏡・観測装置の到来によって矮小銀河のダークハロー構造、そしてダークマターへの理解が大きく進展することを期待し、そのデータを用いた研究を第一線で行えるように筆者自身、日々邁進していきたい。

6. さいごに

ダークマターという正体不明の物質は一体何者なのか。最初の発見から約90年経った今でもその問いには答えられてはいない。しかし、理論研究、加速器実験や直接探索実験、間接探索実験、そして天文観測が相補的な役割を果たしながら、ダークマター研究はこの90年で大きく進展してきたことは間違いない。今後この学際的研究がさらに進展し、この大きな問いに答えられる日はそう遠くないことを期待しつつ、本稿の締めとする。

謝辞

本稿は、東北大学の千葉柁司氏、千葉大学の石山智明氏と行った共同研究の内容に基づいています。本稿を執筆するにあたり、共同での執筆を誘っていただいた基礎科学研究院の鎌田歩樹氏と編集を担当して下さった広島大学の岡部信広氏に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Zwicky, F., 1933, Helvetica Physica Acta, 6, 110
- [2] Rubin, V. C., et al., 1980, ApJ, 238, 471
- [3] Komatsu, E., et al., 2011, ApJS, 192, 18

^{*11} Very Large Telescope/Fibre Large Array Multi Element Spectrograph, Keck Telescope/DEep Imaging Multi- Object Spectrograph

^{*12} この研究についてもSIDM理論に対する興味深い制限になったのでぜひ紹介したかったが、それは別の機会としたい。

[4] 小松英一郎, 2003, 天文月報, 96, 482
 [5] Aghanim, N., et al., arXiv:1807.06209
 [6] Bullock, J. S., & Boylan-Kolchin, M., 2017, ARA&A, 55, 343
 [7] Navarro, J. F., et al., 1996, ApJ, 462, 563
 [8] Fukushige, T., & Makino, J., 1997, ApJ, 477, L9
 [9] Moore, B., 1994, Nature, 370, 629
 [10] Gilmore, G., et al., 2007, ApJ, 663, 948
 [11] Oman, K. A., et al., 2015, MNRAS, 452, 3650
 [12] Li, P., et al., 2020, ApJS, 247, 31
 [13] Kamada, A., et al., 2017, Phys. Rev. Lett. 119, 111102
 [14] Hayashi, K., et al., arXiv:2007.13780
 [15] Battaglia, G., et al., 2013, New Astron. Rev. 57, 52
 [16] 林航平, 2015, 天文月報, 108, 405
 [17] Massari, D., et al., 2018, Nature Astron. 2, 156
 [18] 千葉柁司, 2019, 天文月報, 112, 220
 [19] Drlica-Wagner, A., et al., 2020, ApJ, 893, 1
 [20] Tollet, E., et al., 2016, MNRAS, 456, 3542
 [21] Lazar, A., et al., 2020, MNRAS, 497, 2393
 [22] Correa, C. A., 2020, arXiv e-prints, arXiv:2007.02958
 [23] Kahlhoefer, F., et al., 2019, JCAP, 12, 010
 [24] Kaplinghat, M., et al., 2019, MNRAS, 490, 231
 [25] Errani, R., et al., 2018, MNRAS, 481, 5073
 [26] Hayashi, K., et al., arXiv:2008.02529
 [27] 尾崎忍夫, 2014, 天文月報, 107, 689

The Diversity of Dark Matter Density profiles in the Milky Way Dwarf Spheroidal Galaxies

Kohei HAYASHI

Astronomical Institute, Tohoku University, 6-3 Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8578, Japan

Abstract: Understanding dark matter distributions in galaxies play an important role in studying the properties of dark matter itself. In particular, the Galactic dwarf spheroidal galaxies (dSphs) enable us to inspect their dark matter distributions through dynamical analysis for the stellar kinematic data. In this work, applying our constructed dynamical models to the kinematic data of the dSphs, we found the diversity of the inner slopes in their dark matter halos. Here, I clarify the importance of study for dark matter distributions in less massive galaxies. Then, I introduce our main results in this study and discuss how to explain the origin of the diversity of dark matter inner slopes. I also show the future spectroscopic survey for the Galactic dSphs using Subaru telescope and future prospects of dark matter studies through the dSphs.