

矮小楕円体銀河のダークハロー構造 —ダークマター理論の検証



林 航 平

〈東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構・日本学術振興会特別研究員

〒277-8583 千葉県柏市柏の葉5-1-5〉

e-mail: kohei.hayashi@ipmu.jp

銀河系やアンドロメダ銀河に付随する矮小楕円体銀河は、ダークマターが支配的な系であることから、ダークマターの基本的な性質を知るうえで理想的な天体として注目されている。ダークハロー構造を調べるには恒星系の視線速度分散分布の解析に基づく動力学的方法が用いられているが、その解析は恒星系やダークハロー分布を球対称と仮定した簡単なモデルのみであった。本研究では、軸対称質量分布モデルを構築し12個の矮小楕円体銀河に対してダークマターの空間構造について力学解析を行った。その結果、矮小楕円体銀河のダークハロー構造は非常につぶれた形をしており、それは現在のダークマター理論では再現できないことがわかった。またこの解析結果を用いて、ダークマター理論への制限に対する新たな手法を見つけ出した。これは今後、より暗い銀河のデータが増えていくことで確実な検証方法となるだろう。

1. 冷たい暗黒物質モデルとその問題点

冷たい暗黒物質 (cold dark matter; CDM) モデルに基づく宇宙の構造形成論は、1 Mpc以上の大きな空間スケールでの観測結果 (例えば、宇宙背景放射の温度揺らぎ¹⁾ や宇宙の大規模構造など²⁾) を非常によく再現しており、宇宙を記述する理論的パラダイムとなっている。一方で銀河や矮小銀河などのより小さな空間スケールの形成論は、非線形な構造形成が支配的となるため N 体シミュレーションによるところが大きい。近年のコンピュータ科学の発展により非常に高解像度な N 体シミュレーションが可能となり、より小さなスケールでの詳細な構造が明らかになってきた³⁾。しかしそれらの理論的予言は実際の観測結果と大きく異なり、CDM理論の大きな問題点として物

議を呼んでいる。

その問題の一つとして「カस्प-コア問題」をここでは例に挙げる。CDM理論に基づく N 体シミュレーションによると、さまざまな質量スケールのダークハローの密度プロファイルは中心部で発散する構造 (カस्प構造^{*1)}) をもつと予言している。その一方で、ダークマターが支配的な銀河である矮小楕円体銀河を用いたダークハロー構造の研究では、中心部で密度が一定になるコア構造を支持している。この理論と観測の不一致がカस्प-コア問題である。

この問題に対して、大きく分けて二通りの解決方法が提案されている。一つは、標準的なCDM理論に取って代わる暗黒物質の理論、例えば温かい暗黒物質 (warm dark matter; WDM) モデルによる解決である⁴⁾。WDMモデルは、ダークマ

*1 シミュレーションから予想されるダークハロー中心密度のスロープは $-1 \sim -1.5$ である。

ター粒子に自由運動（フリーストリーミングモード）を持たせ、そのストリーミングスケール以内の構造形成を抑制することで、ダークハローの中心部でより高密度な構造を作りにくくする効果をもつ。もう一つは、CDM理論の枠組みは変えずにバリオンの効果によってダークハローの密度構造が変化することで解決を試みるものである⁵⁾。銀河の形成と進化において起こりうる超新星爆発のエネルギーフィードバックによって駆動されるバリオンの重力場変動により、ダークハロー中心の密度構造がカスプからコアへ変遷する。どちらにおいてもカスプ-コア問題を解決する可能性をもち（近年では後者が有力視されているように感じられるが）CDM理論の小スケール側での正否は今後も議論の争点となるだろう。

1.1 カスプ-コア問題は本当に存在するのか？— 力学解析の問題点

上述のようにカスプ-コア問題に対する理論的アプローチはある程度の道筋が見えている。その一方で、実際の矮小楕円体銀河ダークハローがカスプかコアかは混沌としている現状にある。その理由として、「観測データの不十分さ」と「力学解析の不十分さ」の2点が挙げられる。ここでは、後者について少し詳しく述べていきたい。

矮小楕円体銀河の恒星系を用いたダークハローの密度分布に対する制限には、星の視線速度分散分布の解析に基づくのが一般的である。恒星系が、(1) 力学平衡状態にある、(2) ダークハローの重力ポテンシャルに従って運動する、(3) 無衝突系であるという仮定において、ジーンズ方程式を用いて星の視線速度分散分布を再現する。その際にダークハローの密度分布をパラメータとしてフィッティングを行うことで、矮小楕円体銀河ダークハローに制限を与えている。この手法を用いて、Gerard Gilmoreらは矮小楕円体銀河ダークハローはコア構造をもつという論文を2007年に発表した⁶⁾。その後、データ数の増加とともにジーンズ方程式だけでなくSchwarzschild

法やテンソルビリアル定理などのさまざまな力学解析が行われ、ある解析ではコア構造、異なる解析ではカスプ構造を支持する論文が次々と発表されるようになった。したがって、矮小楕円体銀河ダークハローの内部構造については全く結論づけられていないのである。

そもそも、これらの力学解析の多くは上記三つの仮定だけでなくもう一つ重要な仮定をおいている。それは恒星系とダークハローが球対称に分布しているという仮定である。この仮定は力学解析が最も容易という利点があるが、一方で観測される矮小楕円体銀河の星分布やシミュレーションから示唆されるダークハローの形状は球対称ではなく軸比を持った潰れた形をしている。さらに球対称ダークハローの密度分布と恒星系の運動の速度非等方性には縮退関係が存在し、カスプ-コアが決定できない一つの要因となっている⁷⁾。したがって、矮小楕円体銀河ダークハローのプロファイルの正しい理解を得るには球対称の仮定は不十分であり、上記の観測事実などを考慮したより現実的な質量モデルが必要である。

このような背景においてわれわれは、非球対称モデルを構築し矮小楕円体銀河ダークハローへのより現実的な制限を試みた⁸⁾。以下の章からはその解析方法と結果、そして結果から示唆されるダークマター理論への新たな制限について述べていく。

2. 軸対称質量分布モデル

非球対称モデルの第一段階として、われわれは軸対称ジーンズ方程式に基づく軸対称質量モデルを構築し力学解析を行った。具体的には恒星系およびダークハローの密度分布を軸対称とし、軸対称ジーンズ方程式を介して視線速度分散分布との比較を行う（式などのより詳細についてはわれわれの論文^{8),9)}を参照されたい）。このモデルの特徴は、撮像観測から得られる恒星分布の見かけの形状（見かけの軸比）をモデルに取り入れられる

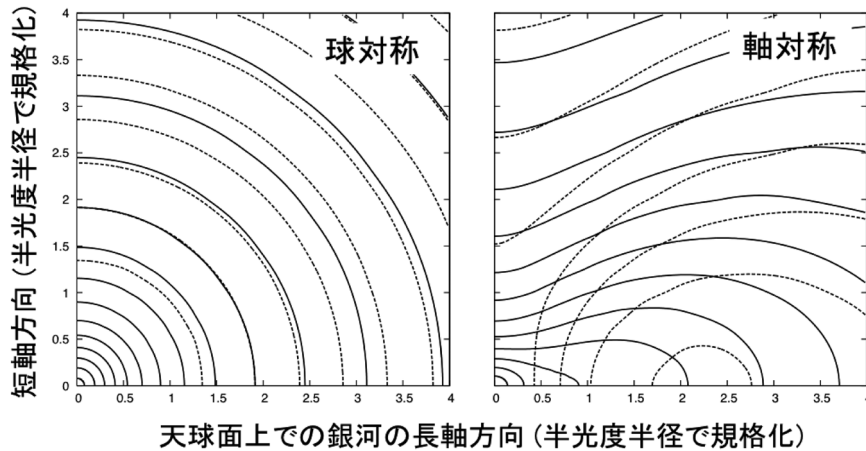


図1 2次元視線速度分散のコンタマップ。軸対称の仮定から第一象限での振る舞いを示す。実線はダークハローがカusp構造、破線はコア構造の場合。左図は恒星系およびダークハローが球対称の場合。右図は軸対称の場合で軸比はどちらも0.8としている。

こと、そしてダークハローの形状（軸比）について議論ができることである。これらは球対称分布の解析では考慮されなかった物理量である。さらに球対称での解析との大きな違いが、視線速度分散分布に現れる。

図1をご覧ください。ダークハローがカusp（実線）とコア（破線）での視線速度分散マップを示している。球対称の場合、長軸・短軸方向という区別はないので円弧上の分布をもち、カuspもコアも同じような視線速度分散分布の振る舞いをするのがわかる。一方、軸対称の場合、長軸方向と短軸方向で視線速度分散分布の振る舞いが大きく異なり、さらにカuspとコアでもその違いは大きいことがわかる。したがって、軸対称のような非球対称質量分布モデルは矮小楕円体銀河ダークハローの密度分布を決定する重要な手がかりとなる可能性をもつ。

軸対称モデルの利点としてダークハローの軸比に対して議論できることを挙げたが、これを観測から決める際に厄介な縮退関係があることを述べておく。ダークハローの軸比^{*2}（以下ではQと示

す）は星の速度分散の非等方性 $\beta_z = 1 - \frac{\overline{v_z^2}}{\overline{v_R^2}}$ （ $\overline{v_z^2}$ と $\overline{v_R^2}$ は、円筒座標系におけるz方向とR方向の速度分散）と強い縮退関係をもつ¹⁰⁾。R方向に速度分散の非等方性が強い場合（ $\beta_z > 1$ ）とダークハローが扁平につぶれている（ $Q < 1$ ）場合とでは、視線速度分散分布が似たような振る舞いをもつためである。この縮退を解く鍵となるのが、矮小楕円体銀河の「より外側の」速度データである。視線速度分散分布が似たような振る舞いをもつのは銀河のより内側の範囲であり、外側ではその振る舞いが β_z とQの間で異なることが明らかになったからだ。したがって、矮小楕円体銀河のより外側の視線速度データを得ることでこの縮退関係は解くことが可能になる。

3. 矮小楕円体銀河のダークハロー構造

軸対称質量分布モデルの主な振る舞いを抑えたいうえで、ここからは実際の観測データの比較を行っていく。今回、われわれが用いた天体は七つの銀河系矮小楕円体銀河（Carina, Fornax, Sculp-

^{*2} ダークハロー軸比は、（恒星系の長軸に垂直な軸の長さ）÷（恒星系の長軸に平行な軸の長さ）と定義している（図2を参照）。

表1 用いた矮小楕円体銀河のデータ数, フィッティングの結果得られたダークハローの軸比(Q), Σv_{\max}

天体	サンプル数	Q	Σv_{\max} ($M_{\odot} \text{pc}^{-2}$)
Milky Way			
Carina	776	0.33±0.02	31.7±3.31
Fornax	2,523	0.38±0.03	33.9±2.11
Sculptor	1,360	0.45±0.03	42.6±4.27
Sextans	445	0.53±0.06	12.5±11.69
Draco	185	0.40±0.05	64.2±14.55
Leo I	328	0.86±0.10	29.0±5.82
Leo II	200	0.91±0.16	21.8±4.96
Andromeda			
And I	51	2.41 ^{+0.49} _{-0.39}	15.0±6.34
And II	488	0.57±0.04	10.3±1.66
And III	62	0.16±0.04	48.5±18.01
And V	85	4.75 ^{+1.54} _{-1.71}	17.4±5.16
And VII	136	1.60±0.39	20.5±5.31

tor, Sextans, Draco, Leo I, Leo II) と五つのアンドロメダ矮小楕円体銀河 (Andromeda I, II, III, V, VII) の計12天体である. 表1に12天体のデータサンプル数をまとめる. この数は分光観測によって視線速度データが得られているメンバー星の数である. 銀河系矮小楕円体銀河は, マゼラン望遠鏡のMichigan/MIKE Fiber System (MMFS) を用いた Matthew G. Walker らの分光観測などによりサンプル数が増えてきている^{11), 12)}. 一方, アンドロメダ矮小楕円体銀河は And II がケック望遠鏡を用いた観測によって500個程度の分光データを得ることができた¹³⁾ が, 他の天体は SPLASH サーベイ¹⁴⁾ で得られたより明るい赤色巨星の分光データである. 後述するが, アンドロメダ矮小楕円体銀河のフォローアップ観測はもちろん重要であるが, 銀河系矮小楕円体銀河についても実は銀河全体の分光観測が十分されていない天体が多く, 今後さらに深い観測が必要であることに留意したい.

以下では, これらの観測データを用いて得られた矮小楕円体銀河ダークハローの主な性質について述べていく.



図2 ダークハロー軸比Qとオブレイト・プロレイトの対応について. 恒星系分布(青)の長軸方向を基準としており, $Q < 1$ をオブレイト, $Q > 1$ をプロレイトとしている.

3.1 ダークハローの形状

表1を見ると, 観測データを再現するようなダークハローの軸比Qは, 銀河ごとに大きく異なる値をもつ結果となった. 例えばより明るい矮小楕円体銀河である Fornax や Sculptor ではそれぞれ $Q = 0.38, 0.45$ と, 大きく扁平した形(オブレイト)をしており, Leo I, II を除く銀河系矮小楕円体銀河のダークハローは強くひしゃげた形状をしていることがわかった. 一方, アンドロメダ矮小楕円体銀河では And I や And VII が $Q = 2.41, 1.60$ と軸比が1を超えるような, 恒星系の分布に対して強く偏長した(プロレイト)ダークハローをもち, 銀河系矮小楕円体銀河とは異なる特徴が見られた. したがって, 銀河系およびアンドロメダ銀河の矮小楕円体銀河はオブレイトからプロレイトまでさまざまな軸比のダークハローをもつという解析結果を得ることになった. しかし, 第2章で述べた縮退関係を考慮すると, サンプル数の少ないアンドロメダ矮小楕円体銀河の結果は注意する必要がある. それは図3を見ると歴然である. 横軸の値を注意して見ると, Fornax の結果はどちらのパラメーターにも良い制限が付いているが, 他の2天体は明らかに縮退関係がありダークハローの軸比に対してほとんど制限が付いていない. これは Fornax などのサンプル数の差だけでなく, 銀河における外側の視線速度データの欠如が大きな要因となっている. より詳しく調べてみ

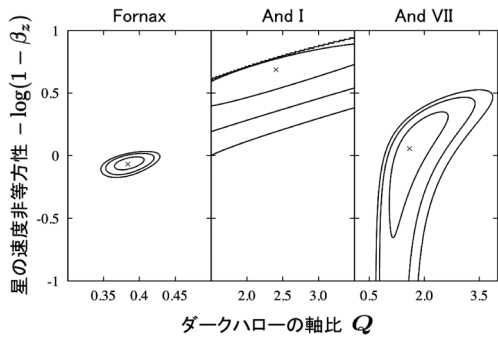


図3 ダークハロー軸比Qと星の速度分散の非等方性 β_z の confidence map. ×印がベストフィット値で内側から68%, 95%, 99%の信頼度を示す。

ると、矮小銀河の半光度半径^{*3}より外側の観測データが不足しているとダークハローの軸比に有意な制限を与えられないことがわかった。よって、アンドロメダ矮小楕円体銀河のより深い・広視野の撮像および分光観測はそのダークハロー構造に対してより強い制限を与えるうえで必要不可欠である。

軸対称質量分布モデルを用いたことで初めて矮小楕円体銀河ダークハローの形状に対して制限を与えることができたが、CDM理論に基づくN体シミュレーションから示唆されるダークハローの形状と同様の結果を得られているだろうか。Carlos A. Vera-Ciroらは高解像度N体シミュレーションであるアクエリアスシミュレーションを用いて、矮小楕円体銀河ダークハローに対応するサブハローの形状に対して統計的な議論を行っている¹⁵⁾。彼らの結果によれば、サブハローは3軸不等性が弱く軸対称に近い形をしているが、あまり強くつぶれてはおらず、その軸比は小さいもので0.6程度であるとしている。一方でわれわれの結果はどうだろう。アンドロメダ矮小楕円体銀河の結果を除いたとしても、ほとんどのダークハローの軸比は0.6を下回る値となっており、理論予測と大きく異なっている。もちろん3軸不等形と軸

対称との違いによる不定性は考慮しなければならないが、今回の解析においてCDM理論に基づく構造形成シミュレーションでは再現できない新たな問題点が浮上してきた。

この矛盾点を解決するメカニズムとして考えられるのは、バリオン効果を考慮したホストダークハローとサブハローとの相互作用による効果である。銀河系サイズのホストハローには多くのバリオンが含まれており、特に中心部では $10^{10} M_{\odot}$ ほどの銀河が存在している。したがって、ホストハローのポテンシャルはこのバリオンによるポテンシャルによってダークマターのみポテンシャルよりさらに深いポテンシャルになるだろうと考えられる。そのポテンシャル中を通過していくサブハローは、ダークマターのみポテンシャルよりも強い潮汐効果を受けることになる。この効果によって、よりつぶれた形のサブハローができると予想される。これはまだ可能性の段階であるが、今後バリオンを含めたシミュレーションによって検証していきたいメカニズムの一つである。

3.2 ダークハロー中心の密度

さて、ダークハローのごく中心部の密度プロファイルについてはどうか。今回の解析からは、ほとんどの矮小楕円体銀河がコア構造もしくはシミュレーションの予言よりも傾きがかなり弱いダークハローをもつが、Draco, Leo I, And IIIそしてAnd Vの4天体はカusp構造をもつという結果が得られた。よって、コア構造をもつ銀河、カusp構造をもつ銀河どちらも存在していることを示唆したことになる。

それぞれのダークハローをもつ銀河の違いはなんだろうか。もしダークハローの内部構造が超新星爆発などのバリオンフィードバックによって変化しているのであれば、恒星系の進化（例えば、星形成史や化学進化史）と何らかの関連があるかもしれない。われわれはこの可能性をさまざま調

*3 銀河全体の光度の半分に相当する光度をもつ半径。

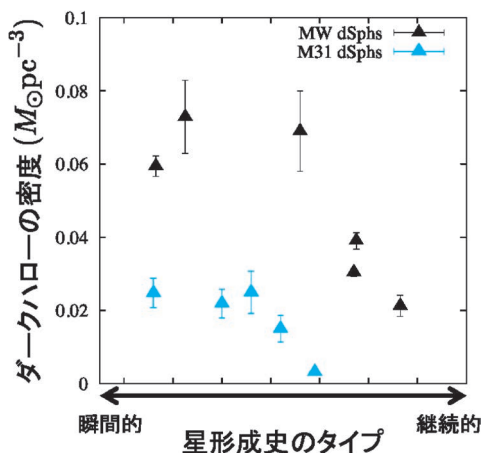


図4 矮小楕円体銀河ダークハローの密度と星形成史の関係。星形成史は、ハッブル望遠鏡を用いた各矮小銀河の深い測光観測¹⁷⁾から得られた色等級図から計算したもの。

べてみたが、ダークハローのごく中心部の密度プロファイル（カスプかコアかの違い）と恒星系の進化史の関係性を見いだすことはできなかった。考えられる理由として、ダークハローのごく中心部の密度は超新星爆発だけでなく他の力学的な作用によって変化している可能性が挙げられる。例えば、星形成前のガスクランプが力学摩擦によって中心部に落ちてくるとダークマター粒子への角運動量輸送が生じ、密度分布が変化するというメカニズムが提案されている¹⁶⁾。

しかしわれわれはダークハローのごく中心部の密度プロファイルの代わりに、「ダークハローのスケール長さにおける密度」と星形成史に関係性があることを発見した。「ダークハローのスケール長さにおける密度」は、先に議論した「ダークハローのごく中心部の密度プロファイル」よりも大きな範囲でのダークハロー密度の振る舞いを表しており、中心部がカスプかコアかというプロファイルの違いではなく、その範囲の密度の高さを指標としている。図4にはその関係性を図示し

ている。1-2回だけ星形成を行ったような瞬間的な星形成史をもつ銀河はダークハローの密度が高いのに対し、数回の星形成を繰り返した継続的な星形成史をもつ銀河のそれは低い。これは超新星爆発のエネルギーフィードバックを何度も受けたことで徐々にダークハローの中心密度が減少したためと解釈でき、ダークハローの進化と恒星系の進化に密接な関連性がある可能性を示唆した。また、銀河系とアンドロメダ銀河に系統的な違いが見られる。これは、矮小銀河を含んでいる親ダークハローの違いによる周辺環境効果の違いが現れている可能性がある。しかしすべての矮小銀河について調べられていないため、観測的バイアスの可能性も考えられ、今後の観測データの向上によるダークハロー構造へのさらなる制限やシミュレーションからの示唆などに期待したい。

4. ダークマター理論に対する新たな制限

第1章で述べたように、カスプ-コア問題などの矮小銀河スケールでのCDM理論の問題点に対する解決方法として、WDMモデルの適用を挙げた。WDMモデルではダークマター粒子の自由運動の大きさを粒子質量で表すが、この運動が大きすぎ（粒子が軽すぎ）たり小さすぎ（粒子が重すぎ^{*4)}たりすると観測結果と矛盾が生じてしまう。これを逆手に取って、観測結果と合うWDM粒子の質量を制限するというアイデアがいくつか提案されてきた^{18), 19)}。しかしこの方法を用いた制限にはある大きな不定性がある。それは矮小銀河を含んでいる親ダークハロー、すなわち銀河系ダークハローの質量の不定性である。このハローの質量の違いによって、それに含まれるサブハローの性質（個数分布など）も異なってくる。現状では銀河系ダークハローの質量は $\sim 0.8 \times 10^{12} M_{\odot}$ から $\sim 2 \times 10^{12} M_{\odot}$ の範囲の不定性をも

*4 WDM粒子が重い場合、CDM粒子と振る舞いがあまり変わらなくなる。

ち^{20), 21)}, WDM粒子の質量を制限するうえでは無視できない大きさである。

そこでわれわれは、今回の力学解析によって得られた矮小楕円体銀河のダークハロー構造からWDM粒子質量への制限に対して新たな手法を考案した²²⁾。この新しい制限を行うために、

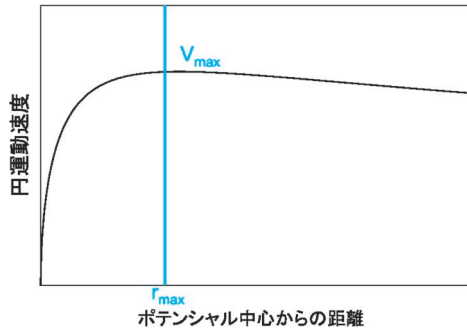


図5 最大円運動速度 (V_{\max}) とそれに対応する半径 (r_{\max})。

「最大円運動速度 (V_{\max}) に対応する半径 (r_{\max}) 以内の平均面密度 ($\Sigma_{V_{\max}}$)」という物理量を新たに定義した。(文章にすると長くわかりづらいので) もう少しかみ砕いて説明していく。あるポテンシャル中をテスト粒子が円運動すると仮定した際、その速度を円運動速度と呼び $V_{\text{circ}} = \sqrt{GM(<r)/r}$ と表される^{*5}。その速度の最大値を V_{\max} と呼び、その速度になる半径を r_{\max} としている (図5を参照)。この半径以内の質量を円面積で割ったもの、すなわち

$$\Sigma_{V_{\max}} = \frac{M(r_{\max})}{\pi r_{\max}^2}$$

が今回定義した物理量である。

この物理量を用いて、矮小楕円体銀河だけでなく低輝度スパイラル銀河や矮小不規則銀河、楕円銀河などさまざまな銀河のダークハローの $\Sigma_{V_{\max}}$ を計算した。その結果が図6である。横軸に V_{\max}

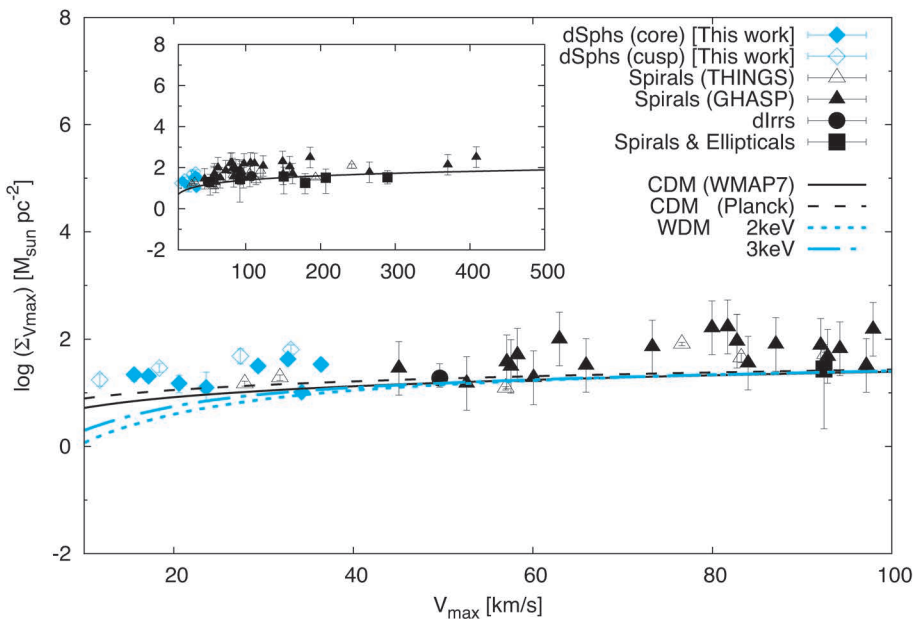


図6 V_{\max} に対する $\Sigma_{V_{\max}}$. エラーバー付きの点は各銀河サンプルを示している。差し込み図はすべてのサンプルをプロットしたもので、メインの図は $V_{\max} \leq 100 \text{ km s}^{-1}$ の低質量側の方に焦点を当てている。黒線と青線はそれぞれCDM理論とWDM理論から計算されたものである。

*5 G は重力定数、 $M(<r)$ はある半径 r 以内の質量である。

をとっているが、これはおおまかに言えば銀河のダークハロー質量を反映しているとみなして良い。この図からわかるように、 V_{\max} が10から400 km s⁻¹に及ぶ広い質量範囲で $\Sigma_{V_{\max}}$ は一定の値をとることがわかった。

さらに $\Sigma_{V_{\max}}$ という物理量は、ダークマター理論から直接計算できるという利点がある。導出の詳細については筆者の論文²²⁾を参照していただくとして、その計算結果を図6に示す。黒の実線と破線で描かれた線がCDM理論から導かれる $\Sigma_{V_{\max}}-V_{\max}$ 関係で、この二つの違いは宇宙論パラメータ(WMAP7とPlanck)の違いである。 V_{\max} や r_{\max} は、宇宙論パラメータ、特に σ_8 ($8 h^{-1}$ Mpcの球内における密度揺らぎの振幅)と n_s (原始密度揺らぎのスペクトル指数)に依存するため、WMAP7とPlanckとで若干の違いが現れている。青の点線と点破線で描かれた線はWDM理論から導出したもので、WDM粒子の質量が2 keVと3 keVの場合の結果を示している。 V_{\max} が大きい、重いダークハロー質量側において、これらのダークマター理論は観測を自然に再現できていることがわかる。驚くべきことに、観測データとのフィッティングなどは一切していないにもかかわらずである。

一方で矮小楕円体銀河に対応する軽いダークハロー質量側に目を向けると、CDMとWDMとで振る舞いが大きく異なっているのがわかる。この違いは、低質量ダークハローの中心集中度の違いが主な原因である。CDM理論の場合、宇宙の平均密度が高い宇宙初期に小さなダークハローが形成されるため、小質量ダークハローほど中心集中度は高い。しかしWDM理論の場合、粒子の自由運動によって小さなスケールの構造が成長しにくくなるため、小質量ダークハローの形成時期が遅れてしまう。形成時期の遅れはWDM粒子の質量が軽いほど大きくなる。この効果によって小質量側で中心集中度が大きく下がり、その影響が $\Sigma_{V_{\max}}$ に現れている。さらにWDM理論の結果は

観測結果と大きくずれているのがわかる。データの 3σ エラー以内を観測結果を再現できる許容範囲だと思えば、WDM粒子の質量は3 keVより重くなければならぬことがわかった。

このダークマター理論に対する新たな制限手法において、鍵となる質量範囲は矮小楕円体銀河のダークハロー質量である。近年発見されている超低輝度矮小楕円体銀河 (ultra faint dwarf; UFD) はより低質量のダークハローをもつと考えられる。よって、この銀河のダークハロー構造を明らかにすることで、ダークマター理論に対してさらに有益な制限を与えることができるだろう。

5. 将来の展望

このように、矮小楕円体銀河は小さな空間スケールにおけるダークマターの振る舞いを調べるうえで非常に重要な天体であり、この天体のダークハロー構造をより正しく理解することは、ダークマターの基本的な性質を知ることにもつながっている。そのためには、より現実的な力学モデルの構築とより多くの星の速度データが必要となる。第3章の始めに述べたように、アンドロメダ銀河の矮小楕円体銀河の分光観測はまだ未開であると言って良い。さらにUFDについては、超低輝度であるゆえに、十分な星数の分光観測がさらに難しくなる。一方で明るい銀河系矮小楕円体銀河については十分観測されているかと思えるが、実際は銀河の中心部付近の明るい赤色巨星を集散的に分光観測したものが多く、潮汐半径に及ぶ広い範囲での観測はなされていないのが現状である。

現在稼働中のすばる望遠鏡超広視野カメラHSCは、このような銀河の深く広い撮像観測が可能であり、矮小楕円体銀河のより外側のより暗い星をより多く同定することが可能である。また、2017年から稼働予定のすばる望遠鏡広視野分光器PFSのmedium resolution mode ($R=5,000$)を用いることで、HSCで捉えられた暗い星の大

量の視線速度データを得ることができる²³⁾。すばるHSCおよびPFSから得られる豊富なデータは、矮小楕円体銀河ダークハローの構造により強い制限を与えるために必要不可欠であり、ダークマターの根源を探るうえで強力なツールとなるだろう。そしてThirty Meter Telescopeの時代にはその集光力を用いた非常に暗い星の高分散分光観測が可能になる。これらの次世代望遠鏡・観測装置の登場によってダークマターの基本的性質の理解が大幅に進むことを期待したい。

謝 辞

本稿は筆者の博士論文およびわれわれが発表した投稿論文（近々投稿予定のものも含む）に基づいています。研究をまとめるにあたり、博士課程で指導教官だった千葉征司氏と、編集を担当してくださった富永望氏には深く感謝いたします。なお本研究は日本学術振興会特別研究員（DC2）として行ったものです。

参考文献

- 1) Komatsu E., Smith K. M., Dunkley J., et al., 2011, ApJ 192, 18
- 2) Tegmark M., Blanton M. R., Strauss M. A., et al., 2004, ApJ 606, 702
- 3) Ishiyama T., 2014, ApJ 788, 27
- 4) Macciò A. V., Paduroiu S., Anderhalden D., et al., 2012, MNRAS 424, 1105
- 5) Sawala T., Frenk C. S., Fattahi A., et al., 2014, ArXiv e-prints, arXiv: 1412.2748
- 6) Gilmore G., Wilkinson M. I., Wyse R. F. G., et al., 2007, ApJ 663, 948
- 7) Walker M. G., Mateo M., Olszewski E. W., et al., 2009a, ApJ 704, 1274
- 8) 林航平, 2015, 博士論文（東北大学）
- 9) Hayashi K., Chiba M., 2012, ApJ 755, 145
- 10) Cappellari M., 2008, MNRAS 390, 71
- 11) Walker M. G., Mateo M., Olszewski E. W., 2009b, AJ 137, 3100
- 12) Mateo M., Olszewski E. W., Walker M. G., 2008, ApJ 675, 201
- 13) Ho N., Geha M., Munoz R. R., et al., 2012, ApJ 758, 124
- 14) Tollerud E. J., Beaton R. L., Geha M. C., et al., 2012, ApJ 752, 45
- 15) Vera-Ciro C. A., Sales L. V., Helmi A., Navarro J. F., 2014, MNRAS 439, 2863
- 16) Nipoti C., Binney J., 2015, MNRAS 446, 1820
- 17) Weisz D. R., Dolphin A. E., Skillman E. D., et al., 2014, ApJ 789, 147
- 18) Polinsky E., Ricotti M., 2014, MNRAS 437, 2922
- 19) Lovell M. R., Frenk C. S., Eke V. R., et al., 2014, MNRAS 439, 300
- 20) Sakamoto T., Chiba M., Beers T. C., 2003, A&A 397, 899
- 21) Kafle P. R., Sharma S., Lewis G. F., Bland-Hawthorn J., 2014, ApJ 794, 59
- 22) Hayashi K., Chiba M., 2015, ApJ 803 L11
- 23) Takada M., Ellis R. S., Chiba M., et al., 2014, PASJ 66, 1

Structures of Dark Halos in the Milky Way and Andromeda—A New Astrophysical Test on the Nature of Dark Matter

Kohei HAYASHI

Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwa-no-ha, Kashiwa, Chiba 277-8583, Japan

Abstract: Dwarf spheroidal (dSph) galaxies associated with the Milky Way and Andromeda are ideal sites for studying the fundamental properties of dark matter. In our work, we constructed axisymmetric mass models for dSphs to obtain realistic limits on the non-spherical structure of their dark halos, and applied our models to the line-of-sight velocity dispersion maps for the twelve dSphs. We found that most of the dSphs have systematically more flattened dark halos than N -body predictions based on cold dark matter models. Moreover, we proposed a new astrophysical test on the nature of dark matter. This test will be the powerful tool for constraining the particle mass of warm dark matter, if we can obtain severer limits on dark halo structures in faint dwarf galaxies.