

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01942

研究課題名(和文) 冷たい暗黒物質モデルにおけるMissing Satellite問題の統計的検証

研究課題名(英文) A statistical test of the missing satellite problem in the CDM model

研究代表者

田中 賢幸 (Masayuki, Tanaka)

国立天文台・ハワイ観測所・准教授

研究者番号：50589207

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、標準宇宙モデルのほつれの一つと指摘されるmissing satellite問題(モデルが予測する衛星銀河の数と、観測される数が合わない問題)を統計的に検証するものである。すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Camを用いて観測した9つの近傍銀河の周囲にある衛星銀河を検出し、天の川銀河の衛星銀河の数と比べると、両者は整合的であることがわかった。しかしながら、その空間分布は大きく異なり、天の川銀河の衛星銀河が中心に偏った特異な分布をしていることがわかった。この特異分布の起源はわからないが、天の川銀河は典型的な銀河ではないことを示唆しており、さらなる研究の対象となるべき発見である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

標準宇宙モデルのほつれの一つと指摘されるmissing satellite問題(モデルが予測する衛星銀河の数と、観測される数が合わない問題)をすばる望遠鏡を用いて統計的に検証したところ、天の川銀河の周囲を回る衛星銀河の数は、他の銀河の衛星銀河の数と整合的であることがわかった。しかしながら、その空間分布は大きく異なり、天の川銀河の衛星銀河が中心に偏った特異な分布をしていることがわかった。これは天の川銀河は宇宙の中で平均的な銀河ではないことを示唆していて、この特異分布の起源を理解するため、天の川銀河の形成史のさらなる研究が必要となる。

研究成果の概要(英文)：The missing satellite problem (inconsistency between the predicted number of satellite galaxies and that of observed ones) is one of the challenges to the standard cosmological model. We address this problem with a statistical sample of nearby galaxies observed with Hyper Suprime-Cam installed at the Subaru Telescope. We identify satellite galaxies around these nearby galaxies and compare their luminosity function with that of the Milky Way satellites. We find that the luminosity functions are consistent with each other. However, the Milky Way satellites tend to be located close to the Milky Way Galaxy, while external satellites are more uniformly distributed. This peculiar spatial distribution is one of the biggest results from our work. We do not know the origin of the peculiar distribution at this point and further work is needed here.

研究分野：銀河天文学

キーワード：観測的宇宙論 近傍銀河

1. 研究開始当初の背景

現在、暗黒エネルギーが卓越した冷たいダークマターモデル(Λ CDM)が標準宇宙論モデルとなっている。これは宇宙における大局的な物質分布を非常によく再現し、多くの観測テストに「合格」している。しかしながら、1Mpc を切るような小さなスケールでは、いくつかの観測との不整合があることが指摘されている。例えばダークマター(DM)サブハローの密度プロファイルのモデル予測が観測よりも急であること(cusp-core 問題)や、比較的大きな矮小銀河の中心密度がモデル予測よりも高いこと(too-big-to-fail 問題:Boylan-Kolchin et al 2011, MNRAS, 415, L40)、そして観測されている矮小銀河の数がモデル予測よりも圧倒的に少ないという missing satellite 問題(Moore et al. 1999ApJ, 524, L19)が挙げられる。これらの問題には未だ決定的な解が見つかっておらず、CDM でなく温かい DM モデルや自己相互作用する DM モデルなど、別のモデルの必要性を示唆している可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では(1)天の川銀河が典型的な銀河であるという大きな仮定を捨て、(2)初めて統計的な銀河サンプルを用いることで、この missing satellite 問題を検証することに焦点を当てる。この問題は 1999 年に DM だけを用いた N 体計算によって指摘された問題であるが、それ以降、ガスの物理を入れた大規模な銀河形成の流体力学計算が大きく発展した。最近のシミュレーションによると、星形成や超新星のエネルギーフィードバックといったバリオン物理を考慮することで、多くの小質量サブハローは銀河を持たなくなり、天の川銀河やアンドロメダ銀河周囲で観測されている矮小銀河の数をかなりよく再現できることがわかってきた(Sawala et al. 2016, MNRAS, 456, 85)。バリオン物理がこの問題を解決する一つの非常に自然な方法であることは明らかであるが、これらのシミュレーションはそもそも局所銀河群を再現するように tuning されたものである。fine-tuning の結果なのか、それともバリオン物理が本当にこの問題を解決したのか、実は不明なのである。仮に fine-tuning でないとしても、この問題を解決している複数のモデルで採用されているバリオン物理はそれぞれ異なり、どの物理が重要なかはわからない。それらを明らかにするには、シミュレーションの tuning で使われていない独立なサンプルで検証する必要がある。さらに、こういった宇宙論テストは統計的に行うことが必要で、局所銀河群だけの検証は極めて危険である。局所銀河群が宇宙の中で典型的である保障がないからである(実際、天の川銀河は典型的でないという指摘もある;Rodriguez-Puebla et al. 2013, ApJ, 773, 172)。missing satellite 問題は、cusp-core 問題のようなより高次の問題に挑むために必要な最初の一步であることもあり、本研究ではこれを以下に述べる手法で徹底的に解明したい。

3. 研究の方法

我々は現在の状況を打破するために、局所銀河群の外の銀河(~ 15 Mpc)を用いて、missing satellite 問題を検証する観測プロジェクトを始めた。近年すばる望遠鏡に搭載された Hyper Suprime-Cam(HSC)という超広視野カメラにより、近傍銀河のビリアル半径を一度に観測することができるようになり、本研究が初めて可能になった。さらに、矮小銀河は非常に淡く広がっていて面輝度が低い天体である(~ 27 mag/arcsec²)。すばる望遠鏡のような 8m 望遠鏡が必須になる。現状ではこの「すばる+HSC」がこの missing satellite 問題を局所銀河群の外で検証することができる強力な組み合わせであろう。局所銀河群の外の銀河をターゲットとした同様の研究も世界でされ始めているが(Geha et al. 2017, ApJ, 847, 4)、SDSS や DES という非常に浅いサーベイのデータを基にしていて、暗い矮小銀河まで数え上げるのは非常に難しいと思われる。本研究では、すばる望遠鏡で好条件の下で観測し、多色データのそろっている 9 つの銀河に着目する(データの揃っていない銀河はまだ複数あり、それらは今後追観測を試みたい)。

4. 研究成果

矮小銀河の最たる特徴はその淡い面輝度にある。まずはそれを用いて矮小銀河候補を検出する。HSC の画像一枚には数十万天体が写るが、探すべき矮小銀河はたかだか 10 個程度である。非常に効率の良い検出方法を用いる必要がある。本研究では多段階のスクリーニングを行い、矮小銀河を絞り込んでいくことにした。

まずは比較的高速で天体の明るさや大きさを大まかに測定する SourceExtractor というコードを用いて、候補天体をまず大きく絞り、次に galfit という計算時間はかかるがより丁寧に天体の測定をするコードを走らせるという 2 段階の測定を走らせた。そこで測られた天体の面輝度や大きさ、楕円率等を用いて天体をスクリーニングした(図 1)。

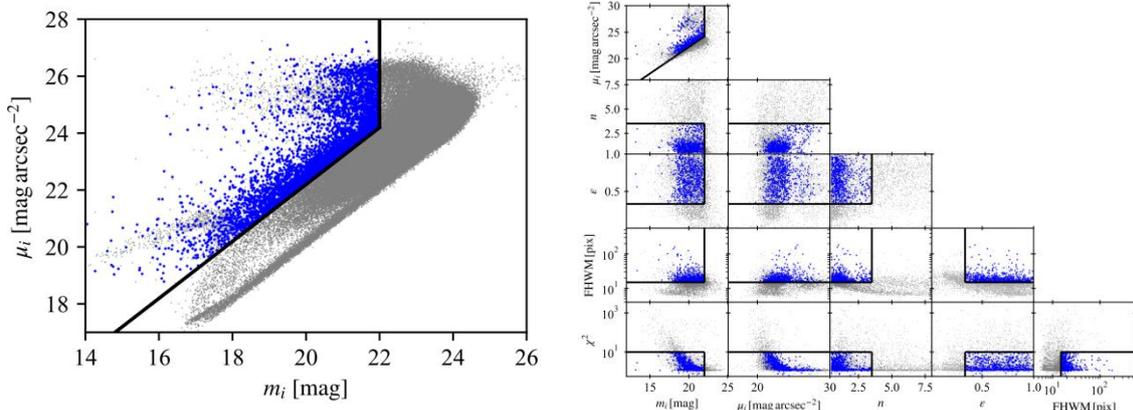


図1: (左) SourceExtractor による面輝度と明るさの測定。点が検出された天体で青が矮小銀河候補として選ばれた天体。(右) galfit による様々なパラメタの詳細な測定。左図と同様に、青がそれぞれのパラメタで選ばれた天体である。

ここまでで候補天体はかなり絞れているが、さらに天体の面輝度ゆらぎを用いた距離推定 (surface brightness fluctuation distance) を行い、明らかな背景銀河を除いた。最後に目視によるスクリーニングを行い、明らかにゴミと思えるものを除去し、矮小銀河候補を secure と possible の2つのカテゴリに分けて分類した。このようにして得られた矮小銀河候補を図2に示す。

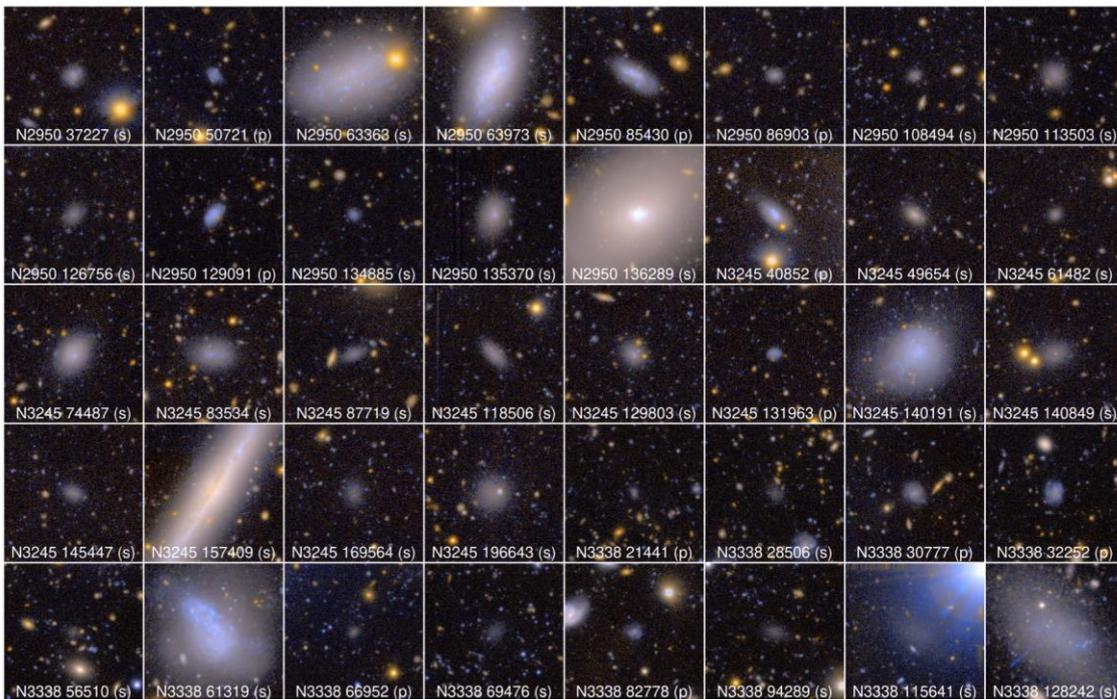


図2: 矮小銀河候補の一部。淡く広がった銀河を選んでいることが一目瞭然である。

この矮小銀河のカタログを用いて、missing satellite 問題を検証すべく光度関数を求めた (図3左)。我々の測定結果を黒 (secure な矮小銀河のみ、possible も含めたのが灰色) で表し、天の川の衛星銀河の光度関数を赤で示す。誤差棒はホスト銀河の間に見られる分散である。ここから、天の川銀河の光度関数は今回の我々のサンプルとよく一致することがわかった。他にも矮小銀河の様々な性質を調べたが、測光的性質はとても良くにている。しかしながら、矮小銀河の空間分布が大きく異なることがわかった。図3(右)でホスト銀河から矮小銀河までの距離分布を表している。我々の結果 (実線と点線) は比較的一様に矮小銀河が分布しているこ

とを示しており、それは近年のシミュレーション (Illustris simulation) とよく一致する。しかし、緑で表した天の川の衛星銀河は宿主銀河 (=天の川銀河) に近いところに偏って分布しており、明らかに特異な分布と言える。現時点では、この中心集中した分布の原因は理解できておらず、シミュレーションとのさらなる比較も含めて、より詳細な研究が必要である。

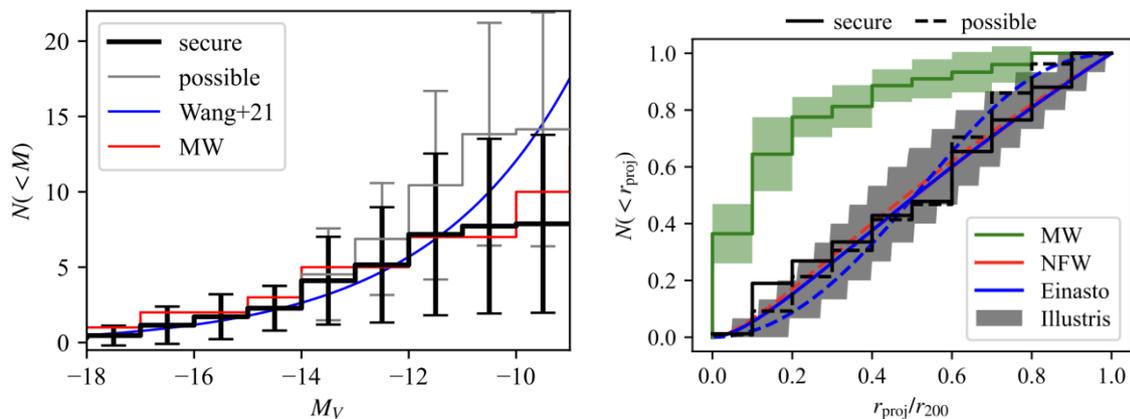


図 3: (左) 衛星銀河の光度関数。黒と灰色が我々の測定で、赤が天の川銀河。青で先行研究をの例を示す。(右) 衛星銀河の動径方向の分布。半径はビリアル半径で規格化してある。曲線が我々の測定で、灰色が Illustris simulation の結果、緑が天の川銀河の衛星銀河の分布。

以上の研究結果は、Nashimoto, Tanaka, et al. として *Astrophysical Journal* に 2022 年 4 月に投稿している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 梨本真志、田中賢幸
2. 発表標題 局所銀河群外におけるミッシングサテライト問題への統計的検証
3. 学会等名 天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梨本真志、田中賢幸
2. 発表標題 局所銀河群外におけるミッシングサテライト問題への統計的検証
3. 学会等名 第10回観測的宇宙論ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masashi Nashimoto, Masayuki Tanaka
2. 発表標題 Statistical Verification of the Missing Satellites Problem Outside of the Local Group with Subaru/HSC
3. 学会等名 Subaru Users' Meeting FY2021
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masashi Nashimoto, Masayuki Tanaka
2. 発表標題 Statistical Verification of the Missing Satellites Problem Outside of the Local Group with Subaru/HSC
3. 学会等名 Galaxy Evolution Workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------