

すばる望遠鏡 HSC で探る天の川銀河周辺の矮小銀河

本間 大輔 (東北大学大学院天文学専攻)

Abstract

Λ CDM 理論は宇宙の構造形成を上手く説明できるが、銀河系サイズの小規模構造で観測との矛盾が見られる。その一つが、銀河系の衛星銀河の数が理論で予測される数に比べて圧倒的に少ないという Missing Satellite 問題である。そこで、すばる望遠鏡の Hyper Suprime Cam(HSC) の観測データを用いて、天の川銀河周辺の新しい衛星銀河としての矮小銀河の発見を試みる。特に表面輝度が暗いものや 400kpc 付近の遠方のもののように、SDSS では発見されなかったものをターゲットにしている。本発表では、矮小銀河を発見するための簡単なアルゴリズムを紹介する。もし未発見の矮小銀河が多数発見されれば、Missing Satellite 問題の解決や、矮小銀河の分布が銀極方向に集中しているという特徴の真否を確かめることができる。

1 Introduction

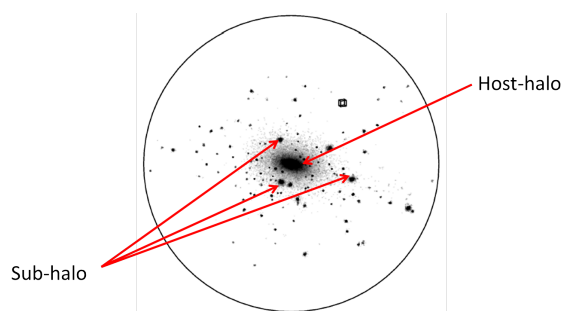


図 1: シミュレーションによって得られた、天の川銀河サイズのダークハロー中の小さなハロー（サブハロー）(Klypin et al.1999)

Λ CDM 理論は現在の宇宙構成理論の標準モデルである。 Λ CDM 理論に基づくシミュレーションによると、天の川銀河サイズの銀河が持つサブハローの数は数百個以上と予測される（図 1 参照）。それらのサブハローで矮小銀河サイズの銀河が形成されるとすると、衛星銀河として矮小銀河も数百個存在することになる。すると、矮小銀河はダークマターの直接的なトレーサーとなり、矮小銀河の光度関数や空間分布を調べることで Λ CDM 理論の統一的な理解につながる。しかし、天の川銀河のサブハローが数百個以上存在すると予測されているのに対して、実際に発見されている天の川銀河周辺の矮小銀河は 30 個程度（図 2 参照）と、桁で少ない。これが、いわ

ゆる「Missing Satellite 問題」であり、数百個のダークマターサブハローが本当に存在するのかわかは、銀河形成を理解する上で重要な問題である。

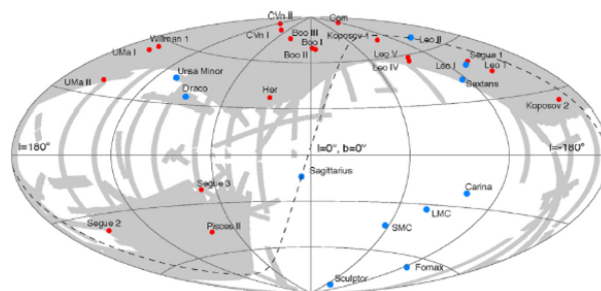


図 2: 矮小銀河の空間分布。青の丸は classical な矮小銀河で、赤の丸は SDSS によって発見された暗い矮小銀河（ultra faint dwarf galaxies : UFDs）。

この問題の解決策として、大きく分けて以下の 3 つが挙げられる。(1) 暗黒物質がそもそも冷たい暗黒物質 (Cold Dark Matter) ではなく、一定の速度分散を持つような性質の別な粒子 (熱い暗黒物質: Hot Dark Matter など) で、その結果質量の小さなサブハローは形成されない。(2) 冷たい暗黒物質であるが、超新星爆発などによるフィードバックで星形成が抑制されて、星を持たないサブハローが多くあってダークサテライトとして存在している。(3) 観測がまだ不十分で、遠方に存在したり表面輝度の暗い矮小銀河がまだ検出されていない。今回の発表は、(3) に焦点をあてる。

(3) の、暗い矮小銀河の多くがまだ見つかっていない可能性は十分にある。Sloan Digital Sky Survey (SDSS) により多くの矮小銀河が発見されたが、それでも等級限界が r バンドでおよそ 22 等で、サーベイが行われた領域は全天の 5 分の 1 に過ぎない (図 2 の影の部分)。よって、暗いものや遠方にある矮小銀河はまだ観測されていない。そこで、すばる望遠鏡の広視野を最大限に生かした新しい超大型主焦点カメラ「Hyper Suprime Cam(HSC)」の観測データを用いて、非常に暗い矮小銀河 (ultra-faint dwarf galaxies:UFDs) の発見を試みる。

2 Data

今回使用するデータは HSC SSP Wide の g, r バンドの測光データ。関係各所のご協力で、星と銀河の選別はなされてカタログ化されており、星のみのデータを使用する。特に、 $r < 24\text{mag}$ で星と銀河の区別の信頼性が高いので、 r バンドで 24 等よりも明るい星のデータを使用する。現在観測されている領域は、

WIDE(XMM):
(RA,Dec)=(35°, -5°) (l, b)=(170°, -59°)

WIDE(GAMA09):

(RA,Dec)=(131°, +1°) (l, b)=(225°, 25°)

WIDE(VVDS):

(RA,Dec)=(334°, 0°) (l, b)=(62°, -43°)

の 3 つである。この 3 つの領域はすでに SDSS で観測されている場所なので、これらの領域に新しい矮小銀河が見つかるのであれば、SDSS では検出されなかった遠方にある UFDs であると予測される。

3 Methods

本研究で用いる矮小銀河発見アルゴリズムは、Walsh et al.(+2009) を参考にしている。アルゴリズムの流れは以下の通りである。まず、矮小銀河を構成する星種族は一般的に古くて金属量が少ないので、色-等級図上に矮小銀河の星を分布させると、赤色巨星分枝や水平分枝が存在する。その特徴を利用して、矮小銀河を構成する星を選別するようなフィルターを色-等級図上に作る。色は星までの距離に

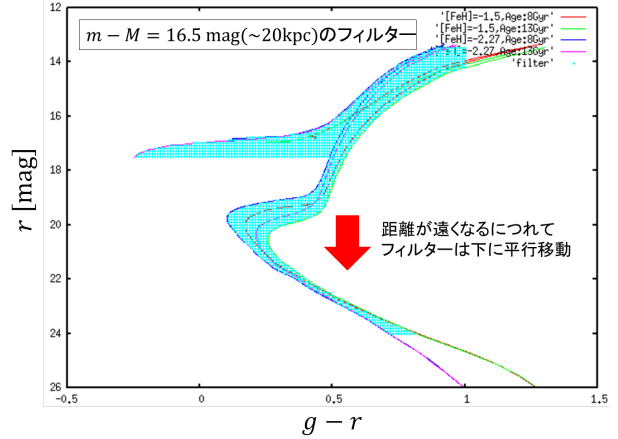


図 3: 20kpc に存在する矮小銀河の星を抽出するフィルター

依存しないが、(実視) 等級は距離に依存するので、このフィルターは距離に応じて複数作ることになる。次に、そのフィルターの中に入った星の 2 次元空間分布を調べる。その 2 次元空間を細かい格子に区切り、各格子の星の数密度を求める。そして、disk やハローの星の foreground noise を軽減させるために、ガウス関数を用いてコンボリューションし、スムージングする。以上の操作をして、ある程度の密度超過を示した格子があれば、その格子の位置に矮小銀河の候補が存在するということである (そのときの矮小銀河までの距離は通したフィルターの距離に対応する)。それが本当に矮小銀河かどうか判断する方法は、実際にその格子付近の星の色-等級図を描いてみて明確な赤色巨星分枝や水平分枝が存在するかどうか確認する。また、古い恒星系として、矮小銀河ではなく球状星団である可能性もあるので、half light radius を求めて確認する必要もある。以下に、各手順の具体的な方法を記載する。

3.1 フィルターの作成

金属量が $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.27, -1.5$ の 2 種類、年齢が 8, 13Gyr の 2 種類、合わせて 4 種類の理論的な isochrone を用いてフィルターを作成する。isochrone は Girardi et al.(2004) を用いている。フィルターの距離は、実視等級と絶対等級の差 $m - M = 16.5\text{mag}$ から 0.5mag 刻みで $m - M = 24.0\text{mag}$ で 16 種類

のフィルターを作る。このとき距離は、20kpc から 630kpc までの範囲になる。また、星と銀河の区別をしっかりとるために $r < 24$ 、赤色巨星への主系列 M 型矮星のコンタミネーションを除去するために、 $g-r < 1.0$ という条件もつける。このようにして作ったフィルターの中に入る星は矮小銀河を構成する星の可能性が高いということになる。例として、20kpc に存在する矮小銀河の星を抽出するフィルターが図 3 である。

3.2 (Ra,Dec) 空間を格子に分ける

フィルターの中に入った星を (Ra,Dec) 空間にプロットする。その空間を $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ の格子に分けて、各格子に入った星の数をカウントする。そして、その格子の星の数密度を $A_{i,j}[\text{個}/\text{deg}^2]$ とする。また、調べている領域全体の平均の星の数密度を $\bar{A}[\text{個}/\text{deg}^2]$ 、分散を $A_\sigma[\text{個}/\text{deg}^2]$ とする。
※いま格子の一边の長さは 0.1° にしたが、これは適宜変えてみる必要あり。

3.3 スムージング (spatial smoothing)

それぞれの格子をガウス関数でコンボリューションする。このときのカーネル長は 4.5 分角で、スムージングする。スムージング後の $A_{i,j}$ を $A'_{i,j}$ とする。
※このカーネル長も適宜変えてみる必要あり。

3.4 格子の密度超過を定量化

各格子に対して

$$S_{i,j} = \frac{A'_{i,j} - \bar{A}}{A_\sigma}$$

を求める。 $S_{i,j}$ の値が 5 より大きい場合、それは統計的な揺らぎによる密度超過ではなく、何かしらの天体（矮小銀河や球状星団）が存在しての密度超過と判断することにする。

4 Results

以上の簡単なアルゴリズムを、HSC の Early Data である上記の 3 つの領域に適用して、矮小銀河候補が存在しないかどうか確かめてみた。結果、2 つの有意なシグナルを検出した。1 つは、カタログ化する前の段階の解析ミスが原因の artificial な構造であった。もう 1 つは、skymap で確認したところ、明るい楕円銀河周りの球状星団の集まりであった（これらの球状星団は、カタログ上では星のデータとして分類されていた）。前者は、システムティックなミスが原因なので、発見アルゴリズムが間違っているわけではない。むしろ、後者について、球状星団のような古い種族の恒星系をしっかりと検出できたので、発見アルゴリズムは機能しているといえる。
残念ながら、新しい矮小銀河といえるような天体はいまのところ検出できていない。しかし、現在リリースされている領域は 50 平方度くらいでまだまだ狭い。次のリリースに期待する。

5 Discussion

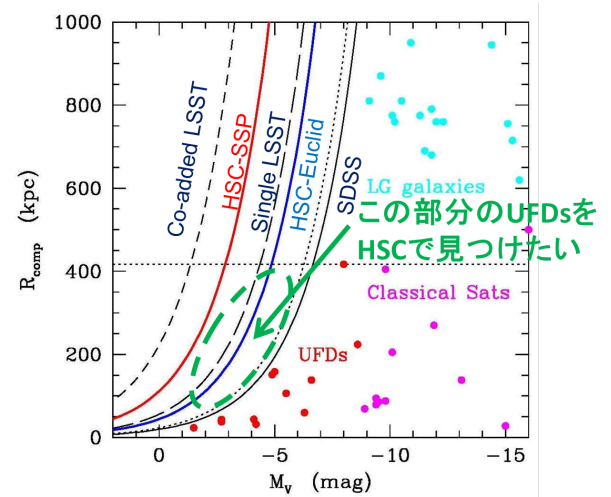


図 4: 様々な広域サーベイによる矮小銀河の検出限界。HSC の現出限界は SDSS と比べて格段に広いことが分かる。破線は LSST(Large Synoptic Survey Telescope) という南半球に建設予定の望遠鏡の検出限界。

HSC によって、新しい矮小銀河 (UFDs) は本当に見つかるであろうか。図 4 は様々な広域サーベイによる矮小銀河の検出限界である。この図を見て分かる通り、SDSS の等級限界 ($r = 22.2\text{mag}$) では、絶対等級が比較的明るくかつ距離が近い矮小銀河だけが発見され、もっと暗くて距離が遠い UFDs は検出できていない。実際、天の川銀河のダークハローは半径 $300\text{kpc} \sim 400\text{kpc}$ に渡って広がっていることが示唆されているので、HSC によって、ハロー外側の空間領域を開拓して、遠方の UFDs を発見できるはずである。では、ハロー外側にはどのくらいの UFDs が存在するだろうか。図 5 は SDSS で得られた UFDs の光度関数から実際の真の光度関数がどうなるかを評価したものである。この図から、絶対等級 $M_V < -3$ より明るい矮小銀河が数百個あることが示唆される。そして、それらのほとんどにおいて、観測がまだ行われていないのである。図 4 と図 5 の結果から、HSC はハローの端まで (400kpc 付近) 観測できるとすると、単純計算で、100 平方度あたり 1 個の矮小銀河 (UFDs) を発見できると期待できる。したがって、HSC によって新しい矮小銀河 (UFDs) は十分見つかる可能性はあるといえる。今後に期待である。

謝辞

2015 年度夏の学校 (研究会番号: YITP-W-15-04) において、京都大学基礎物理学研究所及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

- 千葉証司『銀河考古学 (新天文学ライブラリー 第二巻)』, 日本評論社, 2015
- Girardi et al 2004, A&A, 422, 205
- Klypin et al 1999, ApJ, 522, 82K
- Tollerud et al 2008, ApJ, 688, 277
- Walsh et al +2009, ApJ, 137, 450W

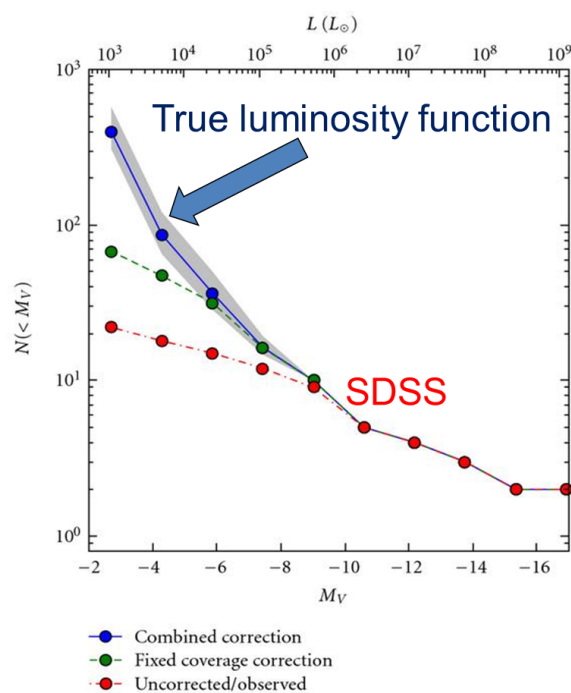


図 5: SDSS の観測によって得られた矮小銀河の累積光度関数 (赤)。これに、SDSS 観測が全天の 5 分の 1 程度であることから全天を見たとしたときに期待される累積光度関数 (緑)。さらに、銀河ハローの端まで観測できたとしたときに期待される累積光度関数 (青)。(Tollerud et al.(2008))