

光度関数と後退速度から求めた銀河団 Abell 2666 までの距離

柴崎 遼¹、中島 和弥¹、原 正¹

1) 埼玉県立豊岡高等学校

The distance of galaxy cluster Abell 2666 measured by luminosity function and recession velocity

Ryo SHIBASAKI¹, Kazuya NAKASHIMA¹, and Tadashi HARA¹,

1) *Toyooka High School, 1-15-1 Toyooka, Iruma-city, Saitama, 358-0003, Japan*

E-mail: tdshara@kg8.so-net.ne.jp

(Received 2015 November 30)

概要

我々は 2011 年 8 月 1 日に、東京大学木曾観測所の 105 cm シュミット望遠鏡に搭載された 2kCCD カメラで、銀河団 Abell 2666 の可視撮像観測を行った。また、2014 年 7 月 28 日と 29 日に、西はりま天文台 2.0 m なゆた望遠鏡に同架された MALLS 分光器を使い Abell 2666 のメンバー銀河 PGC 72600 を分光観測した。我々は Abell 2666 の銀河光度関数を B バンドの撮像データを用いて作成し、この特徴的光度を持つ銀河の絶対等級や実サイズを天の川銀河と同じと仮定することで、距離を 112 Mpc および 114 Mpc と推定した。さらに、MALLS 分光器での分光観測から得られた PGC 72600 の後退速度を用いて、ハッブルの法則から、距離を 122 Mpc と測定した。なお、ハッブル定数は 67.15 km/s/Mpc とした。我々は距離についての結果を考察した。

Abstract

We obtained optical images of galaxy cluster Abell 2666 on the 1st of August 2011 with the 2kCCD camera installed to the 105 cm Schmidt telescope at the Kiso Observatory, Institute of Astronomy, the University of Tokyo. We also had a spectroscopic observation of a galaxy PGC 72600, a member of Abell 2666, on the 28th and 29th of July 2014 with the spectrograph MALLS mounted on the 2.0m Nayuta telescope at the Nishi-Harima Astronomical Observatory. We made a galaxy luminosity function of Abell 2666 using the B -band image, and measured the distances, one is 112 Mpc and the other is 114 Mpc assuming that an absolute magnitude and a true size of the galaxies with the characteristic luminosity are as same as those of the Milky way. Also, we obtained the distance of 122 Mpc using Hubble's law and recession velocity that was learned from spectroscopic observations with the MALLS assuming that the Hubble Constant is 67.15 km/s/Mpc . We discussed and agreed on these results of this distance.

Key words: galaxies : luminosity function - galaxies : distances and redshifts - galaxies: clusters : individual (Abell 2666) - galaxies:individual : PGC72600

1. はじめに

以前に本校天文部は、東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター木曾観測所（以下、木曾観測所）の 105 cm シュミット望遠鏡と 2kCCD カメラを使って得た銀河団 Abell 2666 の撮像データを用いて、この銀河団までの距離を 161 Mpc と測定した（影山ほか 2012）。しかしその後、このとき用いた画像に、解析ミスによると思われる同じ銀河が複数写っていることが分かった。そこで我々は、画像解析を一次処理からやり直し、新たに 2 つの方法で Abell 2666 までの距離を推定した。また、後日、兵庫県立大学自然・環境科学研究所天文科学センター（以下、西はりま天文台）で Abell 2666 のメンバーと思われる銀河 PGC 72600 の分光観測を行い、 $H\alpha$ 輝線の赤方偏移から後退速度を求めた。そして、これらの方法で測定された Abell 2666 までの距離について考察した。

2. 観測

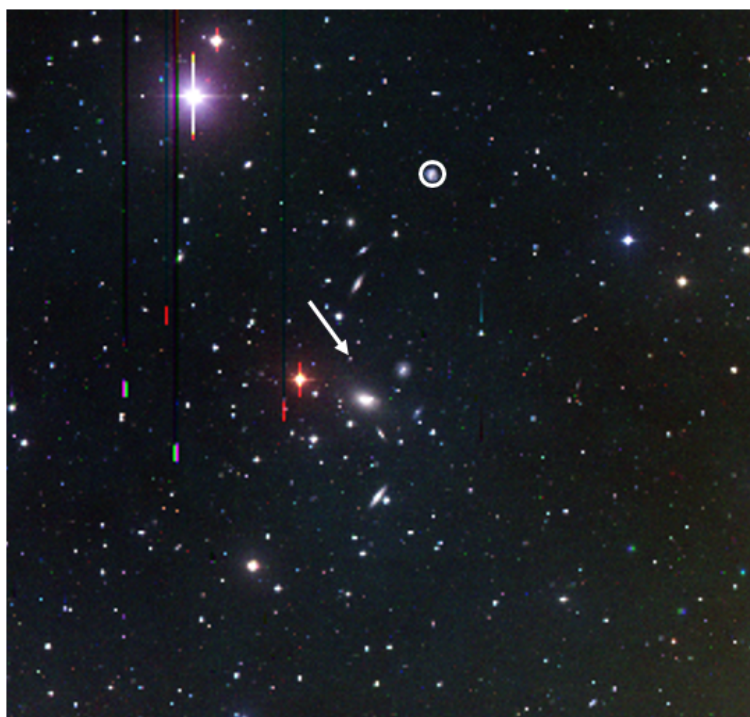


Fig. 1. Abell 2666 の画像。矢印が等級較正に用いた比較星。丸が PGC 72600。視野は約 1 度角四方。上が東、左が北。

2011 年 8 月 1 日に、木曾観測所の 105 cm シュミット望遠鏡と 2kCCD カメラ（視野 51.2 分角四方、ピクセル分解能 1.5 秒角/pixel）を使って、可視光帯 B バンドで露光時間 300 秒 \times 3 枚、 V バンドで 300 秒 \times 3 枚、 Rc バンドで 180 秒 \times 3 枚の撮像観測を行った。観測時の天候は薄曇り、シーイング・サイズは約 3 秒角であった。バイアスとドーム・フラットは、同夜に取得した。

また、2014 年 7 月 28 日から 29 日、西はりま天文台なゆた望遠鏡（口径 2 m）、MALLS 分光器（スリット長 5.0 分角、スリット幅 1.2 秒角）、FLI 230-BI CCD カメラ（2048 pixel \times 2048 pixel）で、Abell 2666 のメンバーと思われる銀河 PGC 72600 の分光観測を、300 本/mm グレーティング ($R \sim 1200$) を用いて、中心波

長 656.3 nm、波長範囲 250 nm、露光時間 1200 秒 ×3 枚で行った。観測時の天候は快晴から薄曇りであった。同夜にバイアスとドーム・フラット、そして、波長較正用にコンパリソン光源を取得した。

3. 撮像データ

3-1. 撮像データ画像処理と等級較正

木曽観測所の 105 cm シュミット望遠鏡と 2kCCD カメラで観測した Abell 2666 の B 、 V 、 Rc バンドの撮像データの一次処理を、画像解析ソフト「マカリ」で、典型的な手法 (バイアスの合成、バイアスの差し引き、感度むら補正、各バンド画像 3 枚の合成) によって行った。さらに、銀河を色合いから判別しやすくするために、アストローツ製の画像解析ソフト「ステライメージ (ver.6.0)」を用いて、擬似カラー画像を作成した (Figure 1)。

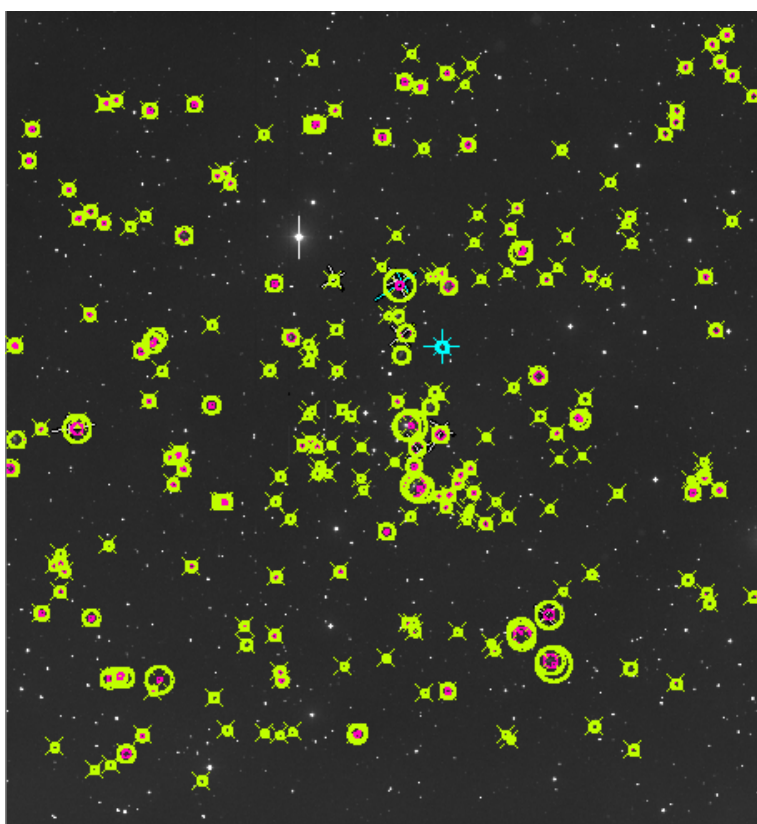


Fig. 2. マカリによる Abell 2666 の開口測光の様子。測光した天体にマークが付される。

等級較正には、Abell 2666 と同じ観測視野に存在する恒星 SDSS J235101.19+271021.0 を使った。この恒星は、既にスローン・デジタル・スカイサーベイによって、 u 、 g 、 r 、 i 、 z バンド等級が測定・公開されており、このカタログ値 $g = 15.969$ 等、 $r = 15.598$ 等と Lupton (2005) の変換式を用いて、 B バンドでの等級 $B = 16.318$ 等を求めた。Figure 1 中に、SDSS J235101.19+271021.0 の位置を矢印で示した。

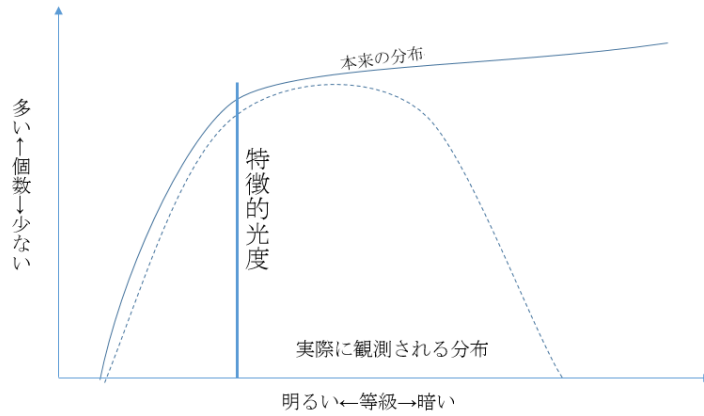


Fig. 3. 銀河光度関数の模式図。銀河の個数は、実線のように、明るい側で急激に増加した後、緩やかになる。この境目にあたる光度を特徴的光度という。実際には、暗い銀河は検出され難いため、暗い側での銀河の数は、点線のように、見かけ上減少する。

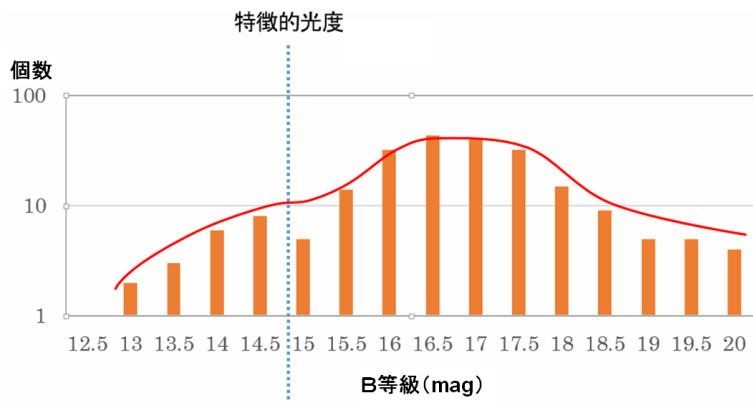


Fig. 4. Abell 2666 の銀河光度関数。実線は Abell 2666 銀河光度関数の概形。

3-2. 銀河の検出・測光と光度関数の作成

マカリを用いて、眼視で銀河と判断できる天体約 200 個の開口測光を行い、見かけの B バンド等級を求めた (Figure 2)。恒星と違い、淡い広がりを持った天体を銀河とし、測光には B バンド画像を用いた。

銀河の光度関数には、経験的に折れ曲がる場所があることが知られており、この光度を特徴的光度という (Figure 3)。一般に特徴的光度の銀河は天の川銀河と大きさ、明るさが近いと言われている (例えば、富田 2010 など)。そこで、Abell 2666 領域の等級ごとの銀河数を調べて光度関数を作った (Figure 4)。そして、Figure 4 と典型的な銀河団であるおとめ座銀河団の銀河光度関数 (岡村定矩, 1999, p179) とを比較することで、Abell 2666 の特徴的光度 $B=14.75$ 等を得た。

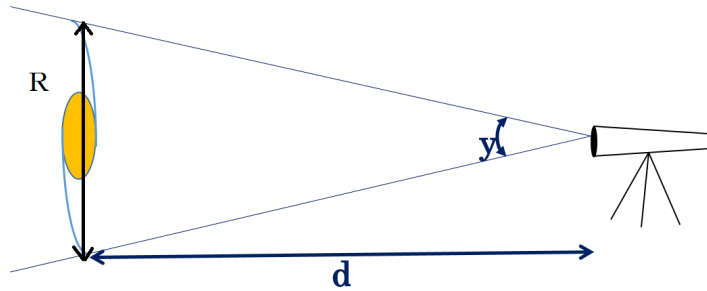


Fig. 5. 天体までの距離 d 、実サイズ R と視角 y の関係。

3-3. 特徴的光度を用いた距離の測定

Abell 2666 の銀河光度関数の特徴的光度 14.75 等を用いて Abell 2666 までの距離を求めた。見かけ等級が m (等級)、距離が D (pc) である天体の絶対等級 M (等級) は、

$$M = m + 5\log(10/D) \quad (1)$$

で表される。ここで、特徴的光度の銀河の絶対等級を天の川銀河と同等の -20.5 等 (富田 2010, p86) と仮定すると、式 (1) から Abell 2666 までの距離として 112 Mpc を得る。

3-4. 銀河の見かけの大きさをを用いた距離の測定

銀河光度関数の特徴的光度を担う銀河の大きさから、Abell 2666 までの距離を求めた。実サイズ R (pc) である天体までの距離 d (pc) とそれを見込む角 (視角) y 秒角の間には、視角 y が極めて小さい場合に、

$$R = d \cdot \frac{2\pi}{360 \times 60 \times 60} \cdot y \quad (2)$$

が成り立つ (Figure 5)。

そこで、銀河光度関数の特徴的光度を担う 6 個の銀河の見かけの直径をマカリのグラフ機能を用いて測り、その平均値 45.1 秒角 (= 30.1 pixels) を得た (Figure 6)。

特徴的光度の銀河の実際の大きさを天の川銀河と同等の 25.0 kpc (富田 2010, p. 104) と仮定し、式 (2) を用いて Abell 2666 までの距離を計算し、114 Mpc を得た。

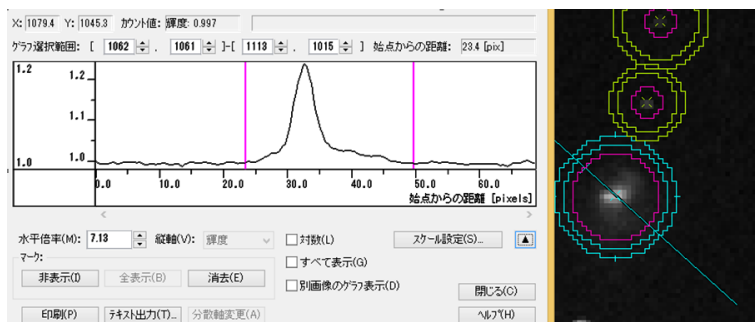


Fig. 6. マカリによる銀河の見かけの直径の測定。右図の最も内側の円は開口サイズ、外部の二重円はスカイの測定範囲を示す。左図は、右図の実線に沿った銀河の輝度プロファイルであり、これを元に見かけの直径を求めた。

4. 分光データ

4-1. 分光データの画像処理

西はりま天文台なゆた望遠鏡と MALLS で得られた Abell 2666 のメンバー銀河 PGC72600 のスペクトルデータの一次処理を、マカリを用いて典型的な手法（バイアスの合成、バイアスの差し引き、感度むら補正、画像の合成）で行った（Figure 7）。その後、コンパソン画像を用いて波長較正を行なった。

4-2. 後退速度の算出およびその補正

マカリを用いて、PGC 72600 のスペクトルから $H\alpha$ 輝線（静止系での波長 656.3 nm）のピーク波長 673.6 nm を読み取った。速度 v (km/s) で我々から遠ざかる銀河のスペクトルでは、静止系で波長 λ の光は、ドップラー効果による赤方偏移によって、波長 λ' で観測される。この時、光の速度を c (km/s) とすると、

$$v = \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda} \times c \quad (3)$$

となる。スペクトルから得られた $H\alpha$ 輝線の波長 673.6 nm と式 3 から、PGC 72600 の後退速度 7908 km/s が得られる。

しかし、我々が住む太陽系は天の川銀河中心に対して回転運動をしており、さらに、天の川銀河は局部銀河群内で運動しているので、観測で得られた後退速度を、局所銀河群中心に対する後退速度に補正した。補正には式 4 を用いた（岡村定矩 1999, p. 101）。

$$\Delta v = -79\cos l \cos b + 296\sin l \cos b - 36\sin b \quad (4)$$

ここで Δv は後退速度の補正量、 l 、 b は銀河の銀経と銀緯を示し、PGC 72600 では、 $l = 106.71^\circ$ 、 $b = -33.67^\circ$ である。算出された後退速度の補正量は $\Delta v = 275$ km/s であり、補正後の後退速度 $V (= v + \Delta v)$ は $V = 8183$ km/s となった。

4-3. ハッブルの法則を用いた距離の算出

銀河の後退速度 V (km/s) と距離 d (Mpc) の間には、ハッブル定数 H_0 を用いて、

$$V = H_0 \times d \quad (5)$$

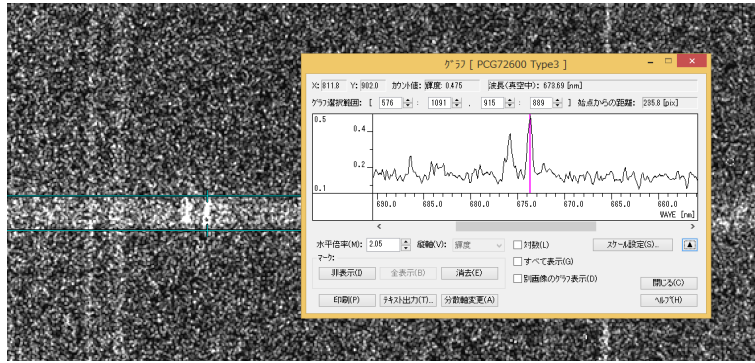


Fig. 7. マカリによる PGC72600 のスペクトル測定。背景は実際の観測画像で、これから読み取られた スペクトルが内側のウィンドウに表示されている。スペクトル中の縦線が H α 線を表す。

という関係が知られている (ハッブルの法則)。そこで、分光観測から得られた後退速度 8183 km/s と、欧州宇宙機関 (ESA) の宇宙マイクロ波背景放射観測衛星 PLANK のデータから算出されたハッブル定数 67.15 km/s/Mpc を用いて PGC 72600 までの距離を算出した (PLANCK 公式ページ [http : //www.nasa.gov/mission_pages/planck/news/planck20130321.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/planck/news/planck20130321.html))。これより、 $d = 122$ Mpc が得られた。

5. 結果および考察

銀河団 Abell 2666 について、 B バンドの銀河光度関数の特徴的光度 $B = 14.75$ 等から求めた距離は、112 (+14, -12) Mpc である。誤差は、光度関数の等級幅 0.5 等 (Figure 4) による特徴的光度の読み取り誤差に基づく値である。また、特徴的光度を担う銀河の見かけの直径を用いて測定した距離は、 114 ± 28 Mpc であり、誤差は測定に用いた銀河の見かけの直径の分散に起因する値である。一方、後退速度から算出した距離は、 122 ± 2 Mpc であり、この誤差は仮定した PLANCK によるハッブル定数の誤差 ± 1.2 km/s/Mpc によるものである。撮像観測から得られた二つの距離の値は、誤差が多少大きいものの、良い一致を見せている。また、後退速度から得られた距離とも矛盾しない値と言える。

影山ほか (2012) で算出された距離 161 Mpc に対し、今回の研究で得られた距離は約 30 % 小さくなっており、かつ、最新のハッブル定数から求めた距離により近いものになっている。影山ほか (2012) では、画像解析にミスがあったこともあるが、天の川銀河の実際の直径を 30 kpc と仮定し、本研究よりも大きい値を用いていた。そのため、本研究よりも遠い値が算出された可能性が考えられる。

ハッブルの法則を用いて得られた距離 122 Mpc に対しては、PGC 72600 のみによる値であるため、銀河団内のメンバー銀河の運動速度の分散を考慮できなかった。

6. 今後の課題

本研究では、光度関数の特徴的光度から Abell 2666 までの距離を求める際に、銀河系内の星間物質による吸収を補正していない。この補正により、距離の値が大きくなり、後退速度から得られた距離に近づくことが期待される。また、Abell 2666 の他のメンバー銀河の分光観測を行うことで、より精度の高い後退速度を得ることが期待される。これらを今後の課題としたい。

謝辞

本研究遂行にあたって、東京学芸大学自然科学系宇宙地球科学分野講師の西浦慎悟先生のご指導、撮像データの取得に関して東京大学木曾観測所所員の皆様、分光データの取得に関して西はりま天文台の協力と新井彰研究員のサポートに感謝いたします。また、本研究は、独立行政法人科学技術振興機構による「中高生の科学部振興プログラム」(101033,130839)の支援を受けて行いました。感謝いたします。

《参考文献》

影山ほか (2012), 光度関数を用いた銀河団の距離, 日本天文学会第 14 回ジュニアセッション, セッション 5, 講演 29 (予稿集, p.140-141)

富田晃彦著 (2010), 活きている銀河たち-銀河天文学入門, 恒星社厚生閣

岡村定矩 (1999), 銀河系と銀河宇宙, 東京大学出版会

Lupton (2005), SDSS 公式ホームページ <http://www.sdss3.org/dr8/algorithms/sdssUBVRITransform.php>