法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-01-15

すばる望遠鏡/Suprime-Cam, FOCASを用いた かみのけ座銀河団の星形成率の推定

OHTA, Hayato / 太田, 隼

(出版者 / Publisher) 法政大学大学院理工学研究科 (雑誌名 / Journal or Publication Title) 法政大学大学院紀要.理工学研究科編 (巻 / Volume) 65 (開始ページ / Start Page) 1 (終了ページ / End Page) 8 (発行年 / Year) 2024-03-24 (URL) https://doi.org/10.15002/00030767

すばる望遠鏡/Suprime-Cam, FOCAS を用いた かみのけ座銀河団の星形成率の推定

ESTIMATION OF STAR FORMATION RATE OF THE COMA CLUSTER USING SUBARU/SUPRIME-CAM AND FOCAS

太田隼

Hayato OHTA

指導教員 田中幹人,小宮山裕,八木雅文

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻博士前期課程

We estimated the H α luminosity function of galaxies in the central region of the Coma cluster using imaging and spectroscopic data from Subaru/Suprime-Cam and Subaru/FOCAS. No faint Coma H α emitters were found in the spectroscopic data, and most of them were found to be background galaxies. Therefore, we selected the Coma member galaxies using the two-color diagram. The H α luminosity function reached the luminosity level of $L(H\alpha) = 10^{37}$ erg/s, which is about 100 times fainter than the previous study and showed a gradual increase at the faint end. The major difference compared to the previous study was that the number of galaxies at the brighter end was relatively small. We estimated that star formation rate per unit volume in the central region of the Coma is $0.210 \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$, which is one order of magnitude smaller than that in the previous study, and the star formation rate contribution from $10^{37} < L(H\alpha) < 10^{39} \text{ erg/s}$ galaxies is 3.5% of the total. We also find that the star formation activity in the Coma is dominated by to star formation is mainly from massive galaxies with $M \gtrsim 10^9 \text{ M}_{\odot}$. These differences are suggested to be due to selection effects of Coma H α emitters and environmental effects of the cluster.

Key Words : galaxies: star formation - galaxies: luminosity function - galaxies: clusters - galaxies: dwarf

1. 背景と目的

現在の宇宙における銀河に関する観測的事実として、 活発に星形成している銀河は低質量銀河 (矮小銀河) が主 であり、大質量銀河の大部分はほとんど星形成を行なっ ていないということが知られている。また、大質量銀河の 数密度は赤方偏移z~2でピークを迎え、それ以降現在にか けて数密度がほとんど変化しないのに対し、低質量銀河 の数密度は赤方偏移が低くなるにつれて(現在にかけて) 大きくなっていることが分かっている。星形成活動が活 発な銀河は星質量の増加率も高いということを考慮する と、これらの事実は大質量銀河ほど昔に星形成が終了し たことを示唆する。これはダウンサイジングシナリオ[1] と呼ばれる。ダウンサイジングシナリオに従うと、矮小銀 河の数が大質量銀河の数を上回っている銀河団環境にお いて、星形成をしている矮小銀河が多数存在し、その矮小 銀河が銀河団全体の星形成に大きく寄与することが期待 される。特に、星形成活動がほぼ止まっていると考えられ ている進化した近傍銀河団は、銀河団内の星形成活動に おいて矮小銀河がどれほど寄与するのかを調査するため

の最良の天体である。

銀河団の 1 つであるかみのけ座銀河団(Coma cluster; Coma)は約 100 Mpc (赤方偏移 z=0.023)という近傍に位置 しているため、暗い矮小銀河の観測に適している。また、 Coma は近傍では質量の大きい銀河団であり、銀河数が多 いものの一つである。このため、矮小銀河が銀河団全体の 星形成にどれほど影響を与えるのかを研究する上で Coma は重要な天体である。

星形成を定量的に記述する物理量の1つとして、単位 時間あたりに形成される星質量で表される星形成率 $[M_{\odot} yr^{-1}]$ が一般的によく用いられる。そして、この銀河 の星形成の指標の1つとして、水素原子の遷移線の一つ であるHa輝線を観測することで得られるHa光度が挙げ られる。これは、主に生まれたばかりの大質量星から放射 される紫外線によって電離した水素ガスを見ているため である。このHa光度は星形成率に変換でき[2]、銀河団全 体の星形成率は銀河団銀河の全Ha光度から求めることが できる。本研究では、その全Ha光度を推定するために、 あるHa光度の銀河がどれだけの数で存在するかを表す関 数であるHα光度関数を用いる。図1は、先行研究である Iglesias-Páramo et al. (2002)[3]による Coma のHα光度関数 である。この先行研究では、Comaの単位体積あたりの星 形成率は約1.36 M_☉yr⁻¹Mpc⁻³と導かれた(先行研究で用 いている宇宙論パラメータh = 0.5から本研究で使用して いる宇宙論パラメータh=0.71に変換すると約 1.57 M_☉yr⁻¹Mpc⁻³になる)。しかし、この結果は口径 2.5m のアイザックニュートン望遠鏡の広視野カメラの観測結 果から得られていて、Ha光度が $L(H\alpha) = 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ 未満 の銀河がない。Lee et al. (2009)[4]によると、星形成をし ている矮小銀河はL(Hα) < 10³⁸ erg s⁻¹にも多く存在して いるため、このような銀河のデータを得るためには、より 深い撮像観測が必要である。また、Coma のHα光度関数を 求めている先行研究は Iglesias-Páramo et al. (2002)[3]以外 存在しない。

そこで、本研究では、口径8.2mのすばる望遠鏡/Suprime-Cam による撮像観測から、先行研究よりも約 100 倍暗い 光度レベル(L(Hα)~10³⁷ erg/s)まで星形成している可能 性のある銀河を取得し、すばる望遠鏡/FOCAS による分光 観測からその銀河の赤方偏移を測定することで、Comaの 銀河の特定及び背景銀河の除去を行い、より正確なHα光 度関数を作成する。そして、このHα光度関数を用いて Coma の星形成率を求めることで、矮小銀河が銀河団全体 の星形成にどれほど寄与するのかを調べる。



図1: Coma のHa光度関数(点線)。横軸はHa光度、縦軸 は銀河個数密度を示す。データ点があるのが銀河団、デー タ点がない線がフィールド銀河を表している。(Iglesias-Páramo et al. 2002[3])

2. 方法と結果

(1) 撮像データ

2006-2009年にすばる望遠鏡/Suprime-Cam で Coma の中 心領域(約1150.7 arcmin²)が、NB671(Ha)、B、R、i バンド で観測された。NB671 とは Coma の赤方偏移におけるHα を透過する狭帯域フィルターである。NB671 の透過率曲 線を図2に示す。一次処理及び絶対較正された撮像デー タに対して、天体検出・測光ソフトウェアである SExtractor[5]を用いてカタログが作成され[6]、このカタ ログを用いて解析を行った。測光では、上記のバンドに加

え、NB671 の範囲における銀河の連続スペクトルのフラ ックス(Continuum)が B、R、i バンドのフラックスから推 定されている。



図 2:NB671 の透過率曲線。赤線が NB671、緑線が Rバ ンドの感度曲線である。各フィルターの透過率は、大気の 透過率、主鏡の反射率、CCD の量子効率などの効果を考 慮したものである。黒線は SDSS から得た Coma の星形成 銀河のスペクトルの一例である。Coma の赤方偏移で NB671 がHα輝線を捉えている。

このカタログから、星形成している可能性がある銀河 を選択する。Hα輝線の大部分は星形成領域から出ている ため、Hα輝線が出ている銀河を星形成している銀河と仮 定し、Coma の赤方偏移におけるHα輝線を捉える NB671 と Continuum の等級差を考えることで、NB excess (Continuum に対して、NB671 が超過しているという意味) を選択する。選択条件は以下とした。

Continuum – NB671 > 0.07	(1)
$Continuum - NB671 > 3\sigma$	(2)
NB671 < 24.5	(3)

(3)

SExtractor flag ≤ 3 (4)

SExtractor class_star ≤ 0.8 (5)

ただし、σはNB671 – Continuumの0より小さい側の中央 絶対偏差(median of absolute deviation; MAD)を、標準偏差 oに変換したものである(σ = MAD × 1.48)。また、式(4)は SExtractor 上での警告を示し、重なった天体を分離した後 の値は許容し、他の問題の可能性がある測光結果は除去 している。式(5)は星らしさ(stellarity index)を示し、1 に近 づくほどその天体は Coma の銀河ではなく、前景星(銀河 系の星)の可能性が高くなる。これらの条件から、817 個 の NB excess を検出した(図 3)。これらの NB excess が Coma でHaを放出している銀河、つまり星形成している 可能性がある銀河である。しかし、NB671には、z=0.35に おける[OIII]4959,5007 輝線やHβ輝線と z=0.8 における [OII]3726,3729 輝線が赤方偏移して入り込むため、NB excess が全て Coma の銀河というわけではない。そこで、 分光データによる分離を行う。



図 3:NB excess の選択。横軸は NB671 の等級、縦軸は Continuum – NB671の等級。黒点が NB excess、青点が測 光された全ての天体を示す。赤線は条件式(1)、(2)、(3)を 示している。

(2) 分光データ

2019 年 4 月 16 日(協定世界時)にすばる望遠鏡/FOCAS の MOS モードで Coma 中心領域の銀河が分光観測され た。表 2 に観測の詳細、図 4 に観測領域を示す。

領域	観測日	フィルター / グリズム	積分時間
Mask1	2019/04/16	SY-47 / 300B	4×900 秒
Mask2	2019/04/16	SY-47 / 300B	4×900 秒
Mask3	2019/04/16	SY-47 / 300B	4×900 秒
Mask4	2019/04/16	SY-47 / 300B	4×900 秒
Mask6	2019/04/16	SY-47 / 300B	4×900 秒
Mask7	2019/04/16	SY-47 / 300B	5×900 秒

表2:分光観測の詳細

観測された分光データを、IRAF を用いて一次処理し、 赤方偏移を測定した。その結果、分光された NB excess 116 個に対し赤方偏移測定できたものが 35 個となり、この 35 個の中に、Coma のH α 輝線銀河(Coma H α emitter)は存在 しなかった。



図 4: FOCAS の観測領域(青色の丸)。青色の丸の中の 緑色のプロットが分光する銀河を示す。背景の撮像デー タは NB671 で観測された Coma 中心領域である。

分光データを増やすため、過去に観測された分光デー タをNB excess とクロスマッチし、SDSS DR17から11個、 DESI EDR から 23 個のデータを取得した。また、共同研 究者が別研究で使用していた分光赤方偏移情報を MMT/Hectospec から 17 個、Keck/LRIS から 10 個、 Subaru/FOCAS から 1 個追加した。これらも含め最終的に Coma の赤方偏移範囲でH α 輝線が確認できた Coma H α emitter は 3 個となり、Coma H α emitter でない分光デー タは 94 個となった。ただし、H α 尾(銀河内の星形成に付 随していないH α 輝線)と視線上で重なった銀河の分光デ ータは、星形成由来ではないH α だと考えられるため除外 している。また、未確定の NB excess は 720 個となった。

一方で、本研究の FOCAS データにおいて、輝線が1本 だけでその輝線がHαかどうか確定できない銀河(single emission galaxy)が NB excess 116 個の中で 28 個あった。 この輝線は z=0.8 の銀河の[OII]輝線の可能性もある。これ らの single emission galaxy が Coma Ha emitter であるかど うか判断するために、DECaLS DR10のrバンドとzバン ドの等級を利用した。これは、z=0.8の銀河において4000Å ブレイクをrバンドとzバンドで挟めることから、この等 級差を利用して z=0.023 の Coma の銀河と分離するため である。DECaLS のカタログとクロスマッチした single emission galaxy、本研究で解析した FOCAS の分光データ、 過去の分光データ(SDSS DR17、Keck/LRIS、Subaru/FOCAS、 MMT/Hectospec)を色等級図上に示し、Coma の Red Sequence との位置関係を確認した(図 5)。図 5 より、最小 二乗法を用いて Coma Red Sequence の直線式(r-z)= -0.039r + 1.165 (黒い実線)を求め、さらにその Coma Red Sequence 上での 0.015 < z < 0.030 の銀河の分布のばらつき $i\sigma = 0.054$ であったことから、Coma Red Sequence の 3σ

の線を、(r-z) = -0.039r + 1.326 (黒い破線)と求めた。 Coma H α emitter (マゼンタの白抜き)は Coma Red Sequence よりも青い側(r-zが小さい側)に存在すること から、本研究では、single emission galaxy が Red Sequence よりも3 σ 以上赤い側(r-zが大きい側)に位置する場合、 その single emission galaxy は Coma H α emitter ではない銀 河と判定することにした。その結果、18 個の single emission galaxy が Coma H α emitter ではないと判定され た。



図 5: DECaLS のカタログとクロスマッチした single emission galaxy の色等級図 (DECaLS の等級を使用してい る)。緑色の誤差棒がついている白抜きのシンボルが single emission galaxy を示す。青色、シアン、オレンジ色の塗り つぶされている点は、赤方偏移別 (それぞれ 0.015 < z < 0.035、0.30 < z < 0.40、0.75 < z < 0.85 に対応している)の 分光データを示す。青点に重なったマゼンタの丸は Coma H α emitter だと分かった銀河である。黒い実線は Coma (0.015 < z < 0.035) Red Sequence を示し、その分布の 3 σ の線を黒い破線で表している。黒い誤差棒付きの白抜 きプロットは、Red Sequence よりも3 σ 以上赤い側(r - zが 大きい側)に位置する single emission galaxy、つまり Coma H α emitter ではない銀河を示す。

さらに、次節での解析に用いるため、SDSS で分光され ている銀河の中で、NB excess とはマッチしないがH α を 放出している可能性がある(H α のフラックスがその誤差 よりも5倍卓越している) Coma の赤方偏移範囲の銀河を 観測領域より外側まで広げた直径4度円内から取得した。 その中から目視でH α 輝線がある銀河を選び、BPT 図[7] (Baldwin, Phillips, & Terlevich diagram)を用いて星形成銀河 と活動銀河核(AGN)を区別した。図6にH α 輝線を持つ銀 河 171 個の BPT 図を示す。星形成銀河とAGN の区別の 式は、Kauffmann et al. (2003)[8]による SDSS 観測から得 られた経験式

$$\log\left(\frac{[\text{OIII}]5007}{\text{H}\beta}\right) > \frac{0.61}{\log\left(\frac{[\text{NII}]6584}{\text{H}\alpha}\right) - 0.05} + 1.3 \quad (6)$$

を用いた。その結果、最終的に 140 個の星形成銀河を取 得した。これらの銀河の Suprime-AB 等級(B、R、i バンド) を求めるために、各銀河のスペクトルに大気の透過率、主 鏡の反射率、CCD の量子効率などの効果を考慮した各フ ィルターの感度曲線を掛け合わせて積分するという解析 を行なった。



図 6: SDSS から取得したHa輝線を持つ銀河の BPT 図。 灰色の点が星形成銀河、黒い三角が AGN を示す。赤線は Kauffmann et al. (2003)[8]による星形成銀河と AGN の分 離線を示す。

(3) 二色図

2.(1)と 2.(2)節で説明したように NB excess が全て Coma の銀河というわけではなく、その全ての NB excess を分光 できているわけではない。そこで、Hα光度関数を作成す るために、二色図から Coma H α emitter を選択すること にする。赤方偏移未確定のNB excess 720 個、赤方偏移確 定の(分光データとマッチした) NB excess 97 個、Coma Ha emitter ではないと分かった single emission galaxy 18 個、 SDSS から得られた星形成銀河(SDSS Coma SFGs) 140 個 の分布を、横軸 R-i 縦軸 B-R の二色図上で確認した(図7)。 青、シアン、オレンジの線は Bruzual & Charlot (2003)[9] (BC03) で計算された星形成銀河のモデル銀河を示す。モ デル銀河の設定として、スペクトルエネルギー分布(SED) のパッケージは cb07/Update version 2016 を使用した。ま た、等時曲線は BaZeL、初期質量関数は Kroupa、金属量 は 0.004 (0.2Z₀)、星形成率(SFR)は Simple Stellar Population、 年齢は 0.001-10 Gyr とした。色の計算方法は、これらの設 定で得られた銀河の SED に対して、z=0.023、0.35、0.8 だけそれぞれ赤方偏移させ、SDSS Coma SFGs の色の導出 方法と同様に、大気の透過率、主鏡の反射率、CCD の量

子効率などの効果を考慮した各フィルターの感度曲線を 掛け合わせ積分している。これらの分光データとモデル 銀河をもとに、二色図上での Coma の領域を

$$\begin{cases}
(B-R) \le 3(R-i) + 0.5 \\
(B-R) \ge 3(R-i) - 0.25 \\
(B-R) \le -(R-i) + 1.75 \\
(B-R) \le -(R-i) + 0.25
\end{cases}$$
(7)

のように決定した(図7の四角形)。

この領域内の赤方偏移未確定の NB excess 92 個を Coma H α emitter に追加した。以上より、分光されている Coma H α emitter 3 個と合わせて、最終的に 95 個の Coma H α emitter が選択された。このように、本研究では Coma ではない銀河(背景銀河)の情報が大幅に増えたこと により、二色図上での Coma H α emitter の選択が可能と なった。



図 7: NB excess と分光データの二色図。灰色の点は NB excess、黒いクロスは Coma H α emitter ではないと分かった single emission galaxy、各種色付きのシンボルは分光データ(赤方偏移のカラーバーに対応)、ピンク色の逆三角形は SDSS Coma SFGs、赤色の白抜き円は Coma H α emitter と分かった分光データを示す。また、青、シアン、オレンジの線は BC03 で計算されたモデル銀河を表している。 黒い矢印は、 $A_V = 1$ の赤化量を示す。また、二色図における Coma H α emitter の領域選択は黒い四角形で示され、この領域の中に分布する赤方偏移未確定の NB excess 92 個を Coma H α emitter に追加した。

(4) Ha光度関数と星形成率

95 個の Coma H α emitter のH α 光度を求め、H α 光度関数 を作成した(図 8)。エラーバーはポアソンエラーを仮定し ていて、各ビンの中にある単位体積当たりの銀河の個数 をNとして、エラーバーの上端が $\log_{10}(N + \sqrt{N})$ 、下端が $\log_{10}(N - \sqrt{N})$ となっている。図8より、暗い端において Coma Ha emitter のHa光度関数は緩やかな上昇を示した。 一方、先行研究[3]と比較すると、明るい端では銀河数が 比較的少ないという違いが見られた。



図 8: Ha光度関数。横軸はHaの光度、縦軸は銀河数密度 (どちらとも常用対数を取っている)。赤いシンボルは NB excess 全て、マゼンタのシンボルは本研究で得られた Coma Ha emitter、青いシンボルは先行研究^[3]の光度関数 を示す。

星形成率を求めるためには、観測領域における全Hα光 度が必要である。つまり、Coma Hα emitter 全てのHα光度 の和を取ることで観測された全Hα光度を求めることがで きる。しかし、Hα光度が暗いことにより検出できていな いだけで、わずかに星形成している銀河は存在すると考 えられる。そのようなHα光度が暗い銀河の個数の見積も り及び観測領域における全Hα光度への寄与を調べるため、 銀河の光度関数のモデルとしてよく用いられるシェヒタ ー関数[10]

$$\phi(L)dL = \phi^* \left(\frac{L}{L^*}\right)^{\alpha} \exp\left(-\frac{L}{L^*}\right) d\left(\frac{L}{L^*}\right)$$
(8)

を用いた。ここで、 ϕ *は特徴的密度、L*は特徴的光度、 α は傾きと呼ばれるパラメータであり、観測結果に最も合 うようにこれらのパラメータを決める。本研究では、観測 結果に対してシェヒター関数でフィッティングするため に累積光度関数を作成した(微分形ではビン幅の設定に任 意性があることと、各ビンに十分な数が入るようにビン 幅を設定しないと誤差の方が大きくなってしまうことか ら、これを避けるために累積形にしている)。また、累積 光度関数に対してフィッティングするため、シェヒター 関数の両辺を積分し、 $T = \log_{10}(L/L^*)$ の変数変換をした。 その結果、光度が無限大からLまでの累積個数 $\Phi(L)$ は、

$$\Phi(L) = \phi^* \int_{\log_{10} L}^{\infty} 10^{(\alpha+1)T} e^{-10^T} dT$$
(9)

となった。観測結果に対してこの式をフィッティングす るため、観測結果との一致度を評価するカイ二乗値[11] が最小になるように、パラメータα、 L^* 、 ϕ^* を求めた。図 9にフィッティング結果を示す。このとき、ベストフィッ ティングパラメータは、 $\alpha = -1.90$ 、 $\log(L^* [erg/s]) =$ 44.04、 $\log(\phi^* [Mpc^{-3}]) = -4.22$ となった。また、Ha光度 関数の暗い側を議論するうえで重要なシェヒター関数パ ラメータαの誤差は、最小二乗法の際に得られる分散共分 散行列のパラメータαに対する対角成分から求められて、 最終的に、 $\alpha = -1.90 \pm 0.09$ と得られた。



図 9: 累積Ha光度関数。横軸はHa光度(常用対数)、縦軸は 光度が明るい側から足していった累積個数を示す。マゼ ンタのシンボルは Coma Ha emitter の結果を示し、黒い 実線はベストフィッティングパラメータ $\alpha = -1.90$ 、 $\log(L^* [erg/s]) = 44.04 \ \log(\phi^* [Mpc^{-3}]) = -4.22 \ OR 混$ $個数<math>\Phi(L)$ を示す。フィッティングは $\log L(H\alpha) < 38.5$ の範 囲で行なった。

本研究における観測領域の全Ha光度の計算は、観測さ れた全 Coma Ha emitter のHa光度の合計と、観測データ がない暗い側(log $L(H\alpha) \leq 37.1$)のベストフィッティング パラメータのシェヒター関数に光度を掛けて積分した結 果の和とした。その結果、観測領域の全Ha光度 $L(H\alpha)_{total}$ は、 $L(H\alpha)_{total} = 1.68^{+4.35}_{-0.11} \times 10^{41} \text{ erg s}^{-1}$ となった。全Ha 光度 $L(H\alpha)_{total}$ から星形成率 SFR への変換は、先行研究^[3] と比較するため、Gallego et al. (1995)[12]の

$$L(H\alpha)_{total} = 9.40 \times 10^{40} \frac{SFR}{M_{\odot} \text{ yr}^{-1}} \text{ erg s}^{-1}$$
(10)

を用いた。そして、Coma の単位体積あたりの星形成率 SFR は、SFR = $0.210^{+0.543}_{-0.014}$ M_{\odot} yr⁻¹ Mpc⁻³となった。ただ し、Coma の体積は本研究で解析した範囲から8.52 Mpc³ とした。先行研究^[3]の*SFR*にハッブル定数の補正をした値 *SFR* = 1.931 M_☉ yr⁻¹ Mpc⁻³と比較すると、1 桁小さい値 となった。また、先行研究より約 100 倍暗い部分である 37 < log *L*(H α) < 39の星形成率の寄与は全体の 3.5%とな り、光度関数がシェヒター関数に従うと仮定して外挿し たlog *L*(H α) < 37の星形成率の寄与は全体の 7.8%だとい うことが分かった。

3. 考察

(1) 星質量推定

本研究では、ダウンサイジングシナリオから示唆され た銀河団内の矮小銀河の星形成活動の寄与を調査するた め、先行研究より約 100 倍暗い部分である37 < $\log L(H\alpha) < 39$ の星形成率を推定した。そして、その寄与 は全体の 3.5%だということが分かった。ここで、Coma H α emitter においてどの程度の星質量を持つ銀河が全体 の星形成率に寄与するのか確認するため、銀河の星質量 推定を行った。Bell et al. (2003)[13]では質量光度比(*M/L*) を色の関数で表した。本研究では、その変換式

$$\log_{10}\left(\frac{M}{L}\right)_{i-\text{band}} = -0.152 + 0.518(g-i) - 0.15 \quad (11)$$

を使用した。ただし、Suprime-Cam の等級から SDSS の等 級への変換係数の導出は、2.(2)節で説明した SDSS Coma SFGs 140 個を用いて行われた。得られた銀河の星質量を 横軸に、質量が大きい側から足していった銀河の累積星 形成率(単位体積あたりではないことに注意)を縦軸にと った星質量関数を図10に示す。観測領域内で得られた全 星形成率は1.79 M_☉ yr⁻¹であり(図 10 の水平線)、一方、 図 10 の右側に分布するM≥10⁹ M_☉の大質量銀河 4 個の 星形成率の合計は1.57M_☉ yr⁻¹であることから、大質量銀 河4個の全体への寄与は約88%となり、観測領域におい て、星形成に寄与しているのは主にM≥10⁹ M_☉の大質量 銀河(4個)であることが分かった。実際に、本研究で用い た分光データの中で、Coma Ha emitter だと分かった NB excess は計3個で、内訳は MMT/Hectospec が2個、SDSS が1個である。これらはどれもlog L(Ha) ≈ 40,41であり、 本研究で目指していたゴールlog L(Hα) ≈ 37,38の銀河で はなかった。そして、これらの銀河の星質量は、M= (6~9)×10⁹ M_☉であった。

一般的に、星形成銀河は銀河団の外から銀河団に落ち ていき、ram pressure によりガスが剥ぎ取られることで、 銀河団の中で星形成を止めることが知られている。また、 近くに位置する銀河との潮汐相互作用によって、銀河の 星やガスが剥ぎ取られることもある。この他にも銀河団 環境において星形成活動を止める要因は多岐にわたる。 そして、ガスを引き止める重力が小さい軽い銀河では、 ram pressure や潮汐相互作用などの剥ぎ取り機構の影響が 大きくなる。以上を踏まえると、軽い銀河つまり暗い銀河 は銀河団中心付近に到達するまでにガスが剥ぎ取られる (星形成が停止する)可能性が高いと考えられる。したがっ て、銀河団中心では暗い Coma Hα emitter が少ないとい う今回の結果から、ダウンサイジングシナリオから示唆 された矮小銀河による銀河団の星形成率への寄与よりも、 銀河団中心部分(高密度領域)の環境効果を受けた矮小銀 河の星形成率低下の程度が大きいと推測できる。



図 10: 星質量関数。横軸は銀河の星質量(常用対数)、縦軸 は銀河の累積星形成率(単位体積あたりではないことに注 意)を示す。黒い実線は観測領域内で得られた全星形成率 $SFR = 1.79 M_{\odot} yr^{-1}$ (体積で割る前)の値に対応する水平 線を示す。

(2) 先行研究との比較

本研究で得られた星形成率は、先行研究[3]よりも1桁 小さい結果となった。先行研究との違いは、望遠鏡の口径 の違いによる限界等級の違い以外に、本研究における Coma Hα emitter の選択による効果と先行研究の過大評 価、観測領域の違いによる環境効果が挙げられる。

Coma H α emitter を選択するため、本研究では、二色図 を用いて Coma の領域を決めることで、その領域内の NB excess を Coma H α emitter とした。しかし、Iglesias-Páramo et al. (2002)[3]が使用した銀河 22 個のうち本研究の観測 領域に含まれていた銀河 5 個の中で、NB excess とマッチ したのは 2 個だった(両者とも本研究で Coma H α emitter と判定された)。つまり、2.(1)節で行なった NB excess の 選択で、先行研究で使用していた銀河を取得できなかっ た。このため、星形成率は小さく見積もられてしまった。 一方で、その NB excess の選択で取得できなかった先行研 究の銀河 3 個のうち、1 つは NED で AGN と判断されて いて、1 つは輝線比が[NII]/H α > 1で([NII]/H α が 1 を超え ると、図 6 の BPT 図において、AGN と判定される)、SDSS-MaNGA による面分光において AGN に特有の銀河中心部 だけのHα放出が確認できた。実際に、Iglesias-Páramo et al. (2002)[3]は銀河のHαの検出の際に AGN の影響を無視し ているため、先行研究は星形成率を過大評価している可 能性がある。一方で、本研究では Coma Hα emitter の銀 河内ダストによるHαの減光を考慮していないため、比較 のために Iglesias-Páramo et al. (2002)[3]の減光補正と同様 に補正したとすると、本研究における銀河のHαは 2~3 倍 ほど明るくなり、星形成率も高くなる。

先行研究との違いは観測領域の違いによる環境効果も 考えられる。本研究では銀河団中心付近を観測している が、Iglesias-Páramo et al. (2002)[3]では本研究より銀河団 外側まで見ている(図 11)。実際に、Iglesias-Páramo et al. (2002)[3]がH α 光度関数作成に使用したlog $L(H\alpha) > 39$ の 銀河 22 個のうち17 個は本研究の観測領域の外側にある。 これらの銀河が、最近銀河団に落ちてきた大きい星形成 銀河だとすると、外側で明るい Coma H α emitter が多い ことが期待できる。このことから、本研究で得られたH α 光度関数や星形成率の先行研究との違いは、環境効果を 見ている可能性もある。



図 11:本研究の観測領域と、先行研究[3]の観測領域。天体画像が本研究の観測領域で、マゼンタの線の多角形の 領域 4 つが先行研究の観測領域を示す。緑色の等高線は X線マップを示す。

(3) 今後の展望

今後の展望として、すばる望遠鏡/HSC を用いた観測領 域の拡張が挙げられる。すでに、HSC のgバンドとrバ ンドでの観測は行われていて、ここに z バンドのデータ を加えることができると、2.(2)節で説明した Coma Red Sequence を用いた背景銀河との分離を行うことができる。 この分離をすることで、Coma のメンバー銀河候補のカタ ログが作成でき、今後のすばる望遠鏡/PFS を用いた分光 観測の際に大きく役立つと考えられる。

4. 結論

すばる望遠鏡/Suprime-Cam, FOCAS の撮像データと分 光データから、Coma 中心領域における先行研究よりも約 100 倍暗い光度レベル($L(H\alpha) = 10^{37} \text{ erg/s}$)までのHa光度 関数を推定した。Ha光度関数の暗い端において緩やかな 上昇を示した一方、先行研究と比較すると明るい端では 銀河数が比較的少ないという違いが見られた。また、 Coma 中心領域の単位体積あたりの星形成率は、*SFR* = 0.210⁺0.543</sup> M_☉ yr⁻¹ Mpc⁻³となり、先行研究より1桁小さ い値となった。そして、先行研究より約 100 倍暗い部分 である37 < log $L(H\alpha)$ < 39の星形成率の寄与は、全体の 3.5%だということが分かった。なお、分光データからは暗 い Coma Ha emitter が見つからなかった。これらの違い は、本研究における Coma Ha emitter の選択による効果 と先行研究の過大評価、観測領域の違いによる環境効果 を見ている可能性がある。

参考文献

- Cowie, L. L. et al. : New Insight on Galaxy Formation and Evolution From Keck Spectroscopy of the Hawaii Deep Fields, AJ, 112, 839, 1996
- [2] Kennicutt, R. C. Jr. : The rate of star formation in. normal disk galaxies., ApJ, 272, 54, 1983
- [3] Iglesias-Páramo, J. et al. : A deep Hα survey of galaxies. in the two nearby clusters Abell 1367 and Coma. The Hα luminosity functions, A&A, 384, 383, 2002
- [4] Lee, J. C. et al. : Comparison of Ha and UV Star. Formation Rates in the Local Volume:Systematic Discrepancies for Dwarf Galaxies, ApJ, 706, 599, 2009
- [5] Bertin, E. & Arnouts, S. : SExtractor: Software for. source extraction., A&AS, 317, 393, 1996
- [6] Yagi, M., et al. : A Dozen New Galaxies Caught in the. Act: Gas Stripping and Extended Emission Line Regions in the Coma Cluster, AJ, 140, 1814, 2010
- [7] Baldwin, J. A., Phillips, M. M., Terlevich, R. : Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects., PASP, 93, 5, 1981
- [8] Kauffmann, G. et al. : The host galaxies of active galactic nuclei, MNRAS, 346, 1055, 2003
- [9] Bruzual, G. & Charlot, S. : Stellar population. synthesis at the resolution of 2003, MNRAS, 344, 1000, 2003
- [10] Schechter, P. : An analytic expression for the. luminosity function for galaxies., ApJ, 203, 297, 1976
- [11] Mighell, K. J. : Parameter Estimation in Astronomy. with Poisson-distributed Data. I.The χ^2_{γ} Statistic, ApJ, 518, 380, 1999
- [12] Gallego, J. et al. : The Current Star Formation Rate. of the Local Universe, ApJ, 455, 1, 1995
- [13] Bell, E. F. et al. : The Optical and Near-Infrared. Properties of Galaxies. I. Luminosity and Stellar Mass Functions, ApJS, 149, 289, 2003