

### 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  $H\alpha$  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  $H\alpha$  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  $H\alpha$  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  $0.210 M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$ , which is one order of magnitude smaller than that in the previous study, and the star formation rate contribution from  $10^{37} < L(H\alpha) < 10^{39}$  erg/s galaxies is 3.5% of the total. We also find that the star formation activity in the Coma is dominated by star formation is mainly from massive galaxies with  $M \gtrsim 10^9 M_{\odot}$ . These differences are suggested to be due to selection effects of Coma  $H\alpha$  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 $z \sim 2$ 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 [ $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ]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 $H\alpha$ 輝線を観測することで得られる $H\alpha$ 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 $H\alpha$ 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 $H\alpha$ 光度から求めることができる。本研究では、その全 $H\alpha$ 光度を推定するために、ある $H\alpha$ 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H $\alpha$ 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H $\alpha$ 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 $1.36 M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{Mpc}^{-3}$ 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 $1.57 M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{Mpc}^{-3}$ 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、H $\alpha$ 光度が $L(\text{H}\alpha) = 10^{39} \text{erg s}^{-1}$ 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 $L(\text{H}\alpha) < 10^{38} \text{erg s}^{-1}$ 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H $\alpha$ 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( $L(\text{H}\alpha) \sim 10^{37} \text{erg/s}$ )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H $\alpha$ 光度関数を作成する。そして、このH $\alpha$ 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。

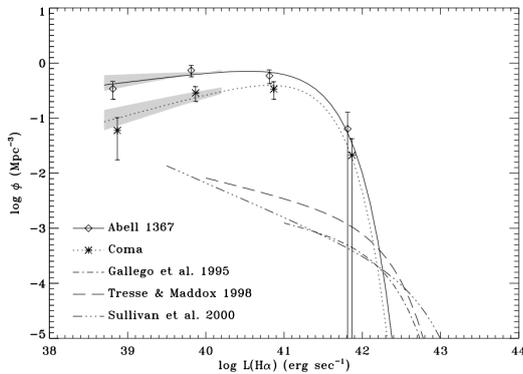


図1: ComaのH $\alpha$ 光度関数(点線)。横軸はH $\alpha$ 光度、縦軸は銀河個数密度を示す。データ点があるのが銀河団、データ点がない線がフィールド銀河を表している。(Iglesias-Páramo et al. 2002[3])

## 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 $1150.7 \text{arcmin}^2$ )が、NB671(H $\alpha$ )、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H $\alpha$ 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。

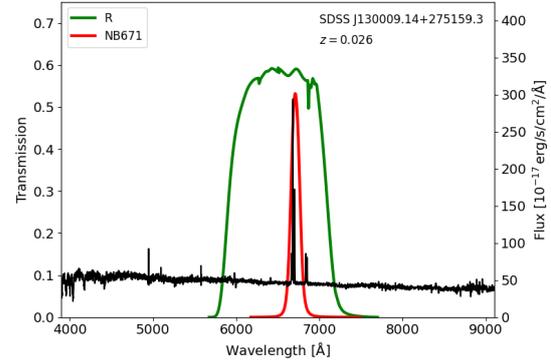


図2: NB671の透過率曲線。赤線がNB671、緑線がRバンドの感度曲線である。各フィルターの透過率は、大気の透過率、主鏡の反射率、CCDの量子効率などの効果を考慮したものである。黒線はSDSSから得たComaの星形成銀河のスペクトルの一例である。Comaの赤方偏移でNB671がH $\alpha$ 輝線を捉えている。

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。H $\alpha$ 輝線の大部分は星形成領域から出ているため、H $\alpha$ 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H $\alpha$ 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。

$$\text{Continuum} - \text{NB671} > 0.07 \quad (1)$$

$$\text{Continuum} - \text{NB671} > 3\sigma \quad (2)$$

$$\text{NB671} < 24.5 \quad (3)$$

$$\text{SExtractor flag} \leq 3 \quad (4)$$

$$\text{SExtractor class\_star} \leq 0.8 \quad (5)$$

ただし、 $\sigma$ 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 $\sigma$ に変換したものである( $\sigma = \text{MAD} \times 1.48$ )。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、他の問題の可能性の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H $\alpha$ 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H $\beta$ 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。

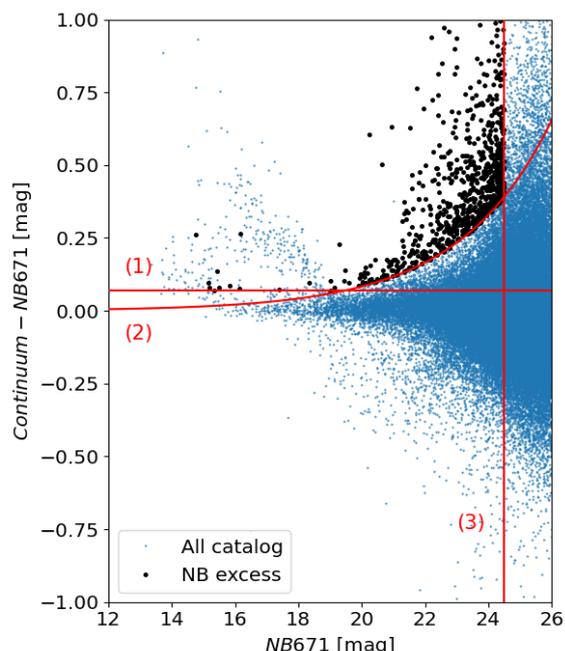


図 3 : NB excess の選択。横軸は NB671 の等級、縦軸は Continuum - NB671 の等級。黒点が NB excess、青点が測光された全ての天体を示す。赤線は条件式(1)、(2)、(3)を示している。

## (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。

表 2 : 分光観測の詳細

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

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 $\alpha$ 輝線銀河(Coma H $\alpha$  emitter)は存在しなかった。

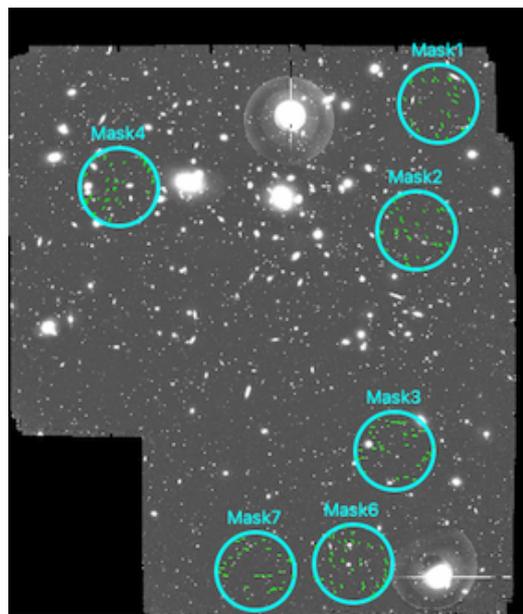


図 4 : FOCAS の観測領域 (青色の丸)。青色の丸の中の緑色のプロットが分光する銀河を示す。背景の撮像データはNB671で観測されたComa中心領域である。

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 $\alpha$ 輝線が確認できたComa H $\alpha$  emitterは3個となり、Coma H $\alpha$  emitterでない分光データは94個となった。ただし、H $\alpha$ 尾(銀河内の星形成に付随していないH $\alpha$ 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 $\alpha$ 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H $\alpha$ 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 H $\alpha$  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は $\sigma = 0.054$ であったことから、Coma Red Sequenceの $3\sigma$

の線を、 $(r - z) = -0.039r + 1.326$  (黒い破線)と求めた。Coma H $\alpha$  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 $3\sigma$ 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 $\alpha$  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 $\alpha$  emitter ではないと判定された。

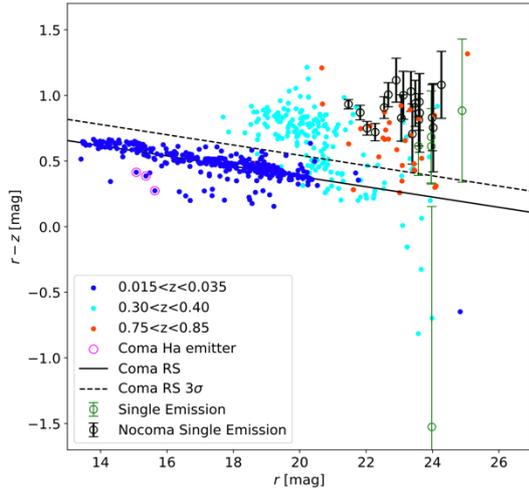


図 5 : DECals のカタログとクロスマッチした single emission galaxy の色等級図 (DECals の等級を使用している)。緑色の誤差棒がついている白抜きのシンボルが single emission galaxy を示す。青色、シアン、オレンジ色の塗りつぶされている点は、赤方偏移別 (それぞれ  $0.015 < z < 0.035$ ,  $0.30 < z < 0.40$ ,  $0.75 < z < 0.85$  に対応している)の分光データを示す。青点に重なったマゼンタの丸は Coma H $\alpha$  emitter だと分かった銀河である。黒い実線は Coma ( $0.015 < z < 0.035$ ) Red Sequence を示し、その分布の  $3\sigma$  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 $3\sigma$ 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 $\alpha$  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 $\alpha$  を放出している可能性がある(H $\alpha$ 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 $\alpha$  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 $\alpha$  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

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

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。

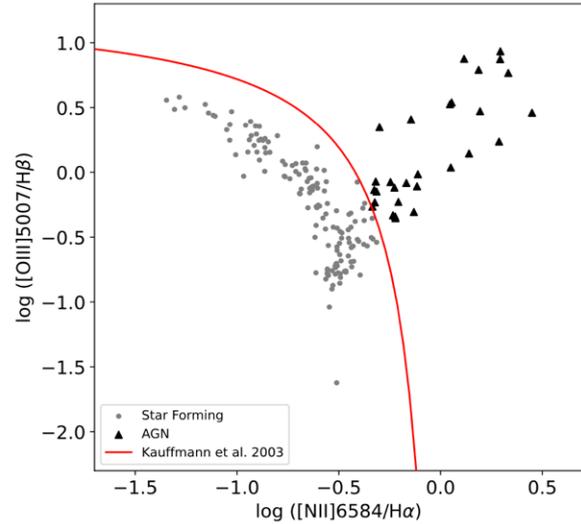


図 6 : SDSS から取得した H $\alpha$  輝線を持つ銀河の BPT 図。灰色の点が星形成銀河、黒い三角が AGN を示す。赤線は Kauffmann et al. (2003)[8]による星形成銀河と AGN の分離線を示す。

### (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、H $\alpha$  光度関数を作成するために、二色図から Coma H $\alpha$  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 H $\alpha$  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  $0.004 (0.2Z_{\odot})$ 、星形成率(SFR)は Simple Stellar Population、年齢は  $0.001-10 \text{ Gyr}$  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

$$\begin{cases} (B-R) \leq 3(R-i) + 0.5 \\ (B-R) \geq 3(R-i) - 0.25 \\ (B-R) \leq -(R-i) + 1.75 \\ (B-R) \leq -(R-i) + 0.25 \end{cases} \quad (7)$$

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 $\alpha$  emitter に追加した。以上より、分光されている Coma H $\alpha$  emitter 3 個と合わせて、最終的に 95 個の Coma H $\alpha$  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 $\alpha$  emitter の選択が可能となった。

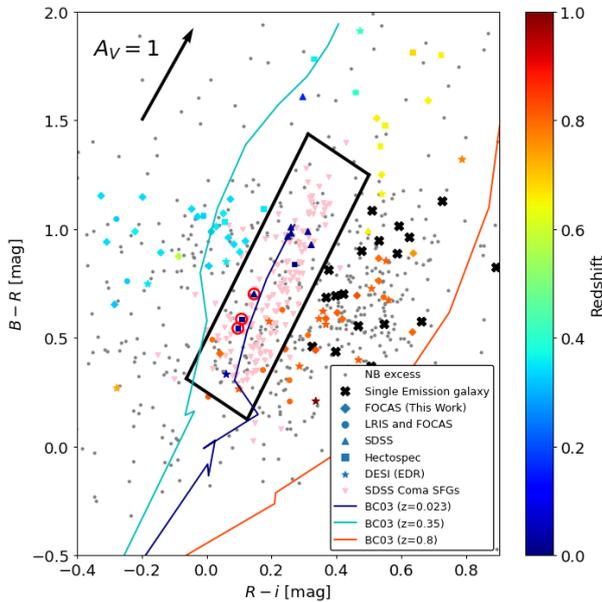


図7: NB excess と分光データの二色図。灰色の点は NB excess、黒いクロスは Coma H $\alpha$  emitter ではないと分かった single emission galaxy、各種色付きのシンボルは分光データ(赤方偏移のカラーバーに対応)、ピンク色の逆三角形は SDSS Coma SFGs、赤色の白抜き円は Coma H $\alpha$  emitter と分かった分光データを示す。また、青、シアン、オレンジの線は BC03 で計算されたモデル銀河を表している。黒い矢印は、 $A_V = 1$  の赤化量を示す。また、二色図における Coma H $\alpha$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

#### (4) H $\alpha$ 光度関数と星形成率

95 個の Coma H $\alpha$  emitter の H $\alpha$  光度を求め、H $\alpha$  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 H $\alpha$  emitter の H $\alpha$  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。

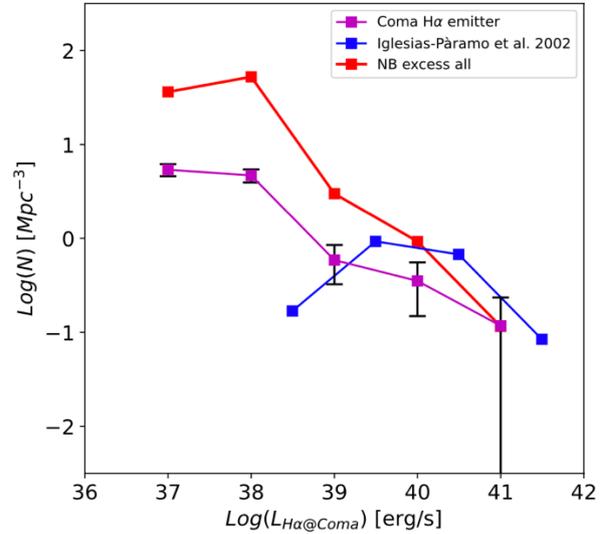


図8: H $\alpha$  光度関数。横軸は H $\alpha$  の光度、縦軸は銀河数密度(どちらも常用対数を取っている)。赤いシンボルは NB excess 全て、マゼンタのシンボルは本研究で得られた Coma H $\alpha$  emitter、青いシンボルは先行研究[3]の光度関数を示す。

星形成率を求めるためには、観測領域における全 H $\alpha$  光度が必要である。つまり、Coma H $\alpha$  emitter 全ての H $\alpha$  光度の和を取ることで観測された全 H $\alpha$  光度を求めることができる。しかし、H $\alpha$  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 H $\alpha$  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 H $\alpha$  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]

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

を用いた。ここで、 $\phi^*$  は特徴的密度、 $L^*$  は特徴的光度、 $\alpha$  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ふことから、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、

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

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 $\alpha$ 、 $L^*$ 、 $\phi^*$ 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、 $\alpha = -1.90$ 、 $\log(L^* [\text{erg/s}]) = 44.04$ 、 $\log(\phi^* [\text{Mpc}^{-3}]) = -4.22$ となった。また、H $\alpha$ 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 $\alpha$ 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 $\alpha$ 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。

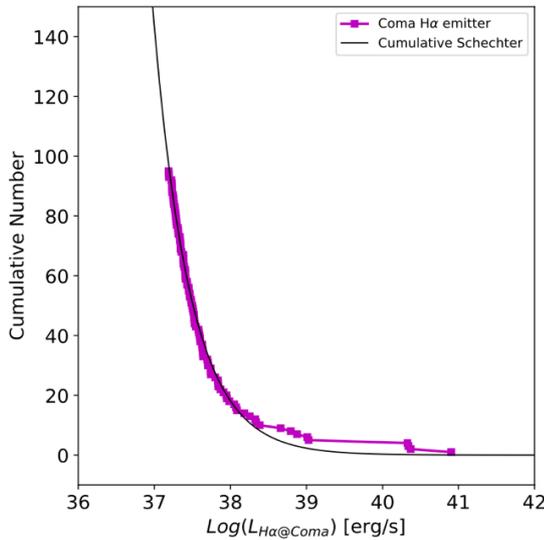


図9：累積H $\alpha$ 光度関数。横軸はH $\alpha$ 光度(常用対数)、縦軸は光度が明るい側から足していった累積個数を示す。マゼンタのシンボルは Coma H $\alpha$  emitter の結果を示し、黒い実線はベストフィッティングパラメータ $\alpha = -1.90$ 、 $\log(L^* [\text{erg/s}]) = 44.04$ 、 $\log(\phi^* [\text{Mpc}^{-3}]) = -4.22$ の累積個数 $\Phi(L)$ を示す。フィッティングは $\log L(\text{H}\alpha) < 38.5$ の範囲で行なった。

本研究における観測領域の全H $\alpha$ 光度の計算は、観測された全 Coma H $\alpha$  emitter のH $\alpha$ 光度の合計と、観測データがない暗い側( $\log L(\text{H}\alpha) \leq 37.1$ )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H $\alpha$ 光度 $L(\text{H}\alpha)_{\text{total}}$ は、 $L(\text{H}\alpha)_{\text{total}} = 1.68^{+4.35}_{-0.11} \times 10^{41} \text{ erg s}^{-1}$ となった。全H $\alpha$ 光度 $L(\text{H}\alpha)_{\text{total}}$ から星形成率 SFR への変換は、先行研究<sup>[3]</sup>と比較するため、Gallego et al. (1995)[12]の

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

を用いた。そして、Coma の単位体積あたりの星形成率 SFR は、 $\text{SFR} = 0.210^{+0.543}_{-0.014} \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$ となった。ただし、Coma の体積は本研究で解析した範囲から $8.52 \text{ Mpc}^3$

とした。先行研究<sup>[3]</sup>のSFRにハッブル定数の補正をした値 $\text{SFR} = 1.931 \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$ 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 $37 < \log L(\text{H}\alpha) < 39$ 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 $\log L(\text{H}\alpha) < 37$ 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 $37 < \log L(\text{H}\alpha) < 39$ 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 $\alpha$  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 $1.79 \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ であり(図10の水平線)、一方、図10の右側に分布する $M \geq 10^9 \text{ M}_{\odot}$ の大質量銀河4個の星形成率の合計は $1.57 \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 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 $M \geq 10^9 \text{ M}_{\odot}$ 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 H $\alpha$  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 $\log L(\text{H}\alpha) \approx 40, 41$ であり、本研究で目指していたゴール $\log L(\text{H}\alpha) \approx 37, 38$ の銀河ではなかった。そして、これらの銀河の星質量は、 $M = (6 \sim 9) \times 10^9 \text{ M}_{\odot}$ 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 H $\alpha$  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。

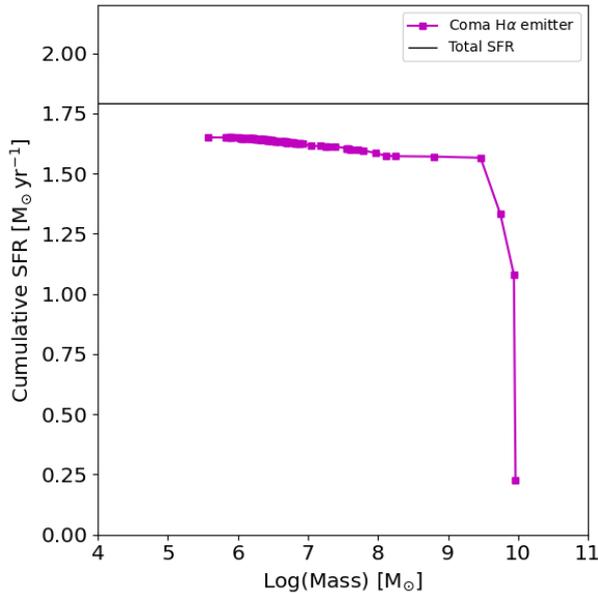


図 10 : 星質量関数。横軸は銀河の星質量(常用対数)、縦軸は銀河の累積星形成率(単位体積あたりではないことに注意)を示す。黒い実線は観測領域内で得られた全星形成率  $SFR = 1.79 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  (体積で割る前)の値に対応する水平線を示す。

## (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 H $\alpha$  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 $\alpha$  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 $\alpha$  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 $\alpha$  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  $[NII]/H\alpha > 1$  で  $[NII]/H\alpha$  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 H $\alpha$  放出が確認できた。実際に、Iglesias-Páramo et al. (2002)[3]は銀河の H $\alpha$  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 H $\alpha$  emitter の銀河内ダストによる H $\alpha$  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 H $\alpha$  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 $\alpha$  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 $\alpha$  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 $\alpha$  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。

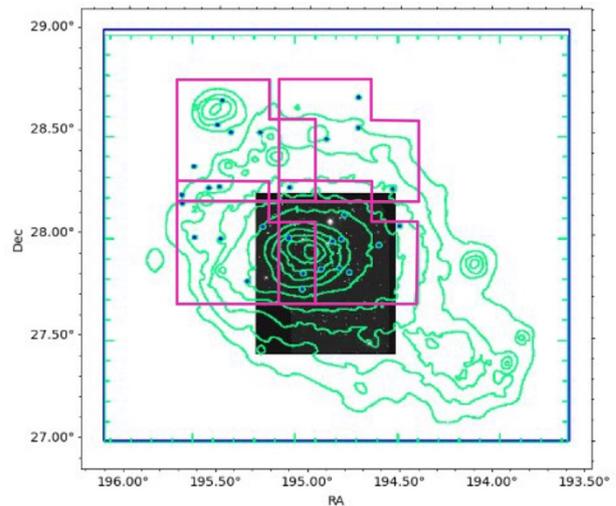


図 11 : 本研究の観測領域と、先行研究[3]の観測領域。天体画像が本研究の観測領域で、マゼンタの線の多角形の領域 4 つが先行研究の観測領域を示す。緑色の等高線は X 線マップを示す。

## (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( $L(\text{H}\alpha) = 10^{37} \text{ erg/s}$ )までの  $\text{H}\alpha$  光度関数を推定した。 $\text{H}\alpha$  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、 $SFR = 0.210^{+0.543}_{-0.014} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$  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  $37 < \log L(\text{H}\alpha) < 39$  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  $\text{H}\alpha$  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  $\text{H}\alpha$  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

- [1] 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  $\text{H}\alpha$  survey of galaxies. in the two nearby clusters Abell 1367 and Coma. The  $\text{H}\alpha$  luminosity functions, *A&A*, 384, 383, 2002
- [4] Lee, J. C. et al. : Comparison of  $\text{H}\alpha$  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  $\chi^2_{\nu}$  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