

輝線撮像観測による M81・M101 の HII 領域の研究

柏木雄太（東京学芸大学 大学院教育学研究科 理科教育専攻）

西浦慎悟（東京学芸大学 自然科学系 宇宙地球科学分野）

1. はじめに

系外銀河の HII 領域の物理的性質を調べるためには、スペクトルを得る必要がある。そのためには、スリット分光観測が一般的である。しかし、通常のスリット分光観測では、一度に 1 個もしくは数個の HII 領域しか観測することができず、しかも明るい HII 領域しか分光できない。従って、銀河 1 個当りに数十から数百も存在する HII 領域のほとんどをスリット分光観測することは時間的にも物理的にも事実上不可能である。よって、銀河全体にわたる HII 領域のスペクトル観測は、過去にほとんど行われていない。スリット分光観測以外で系外銀河の HII 領域の性質を調べるために有効な方法は、特定の輝線成分のみを透過する狭帯域フィルターを用いた輝線撮像観測である。実際に、HII 領域の輝線撮像観測は今までも多くの系外銀河に対して行われている。しかし、そのほとんどが写真乾板によるもので感度が悪く、しかも輝線はほとんどが $H\alpha$ λ 6463 + [NII] λ λ 6548,6583 に対してのみである。HII 領域の物理的性質を調べるためには、水素バルマー系列の $H\alpha$ 、 $H\beta$ λ 4861、そして 2 階電離酸素の [OIII] λ λ 4959,5007、1 階電離硫黄の [SII] λ λ 6716,6731 など、複数の輝線強度が必要である。これらを得るためには、見かけサイズが大きい系外銀河全体を一度に撮像できる広い視野を有した望遠鏡と、多数の輝線に対応した狭帯域フィルターを持つ広視野 CCD カメラが必要である。

これらを背景に、我々は 2006 年から「多色撮像観測による近傍銀河 HII 領域の可視域 SED 研究計画」を進めている。これは、東京大学天文学教育研究センター木曾観測所の 105cm シュミット望遠鏡と 2k-CCD カメラ、そして 11 種類の広・狭帯域フィルターを用いることにより、系外銀河に存在する多くの HII 領域の低分散スペクトルを取得し、これらの物理的性質を統計的に議論することを狙った観測計画である（詳細は本集録の西浦『多色撮像による近傍渦巻銀河 HII 領域の SED 研究計画』を参照）。本研究は、この「多色撮像観測による近傍銀河 HII 領域の可視域 SED 研究計画」の一環であり、早期型渦巻銀河 M81・晩期型渦巻銀河 M101 の HII 領域の電離ガスに着目し、多輝線撮像観測からその密度や金属量などの物理的性質を調べ、また銀河中心からの距離とその性質の関連性を考察したものである。

2. 観測

観測天体は、M81 (NGC3031) と M101 (NGC5457) の 2 天体である。観測期間は、M81 が 2006 年 12 月 19 日～2007 年 12 月 11 日であり、M101 が 2004 年 8 月 12 日～2007

年8月16日である。シーイングは、M81が $2''.36 \sim 5''.67$ 程度であり、M101が $3''.00 \sim 5''.25$ 程度であった。観測装置は、木曾105cmシュミット望遠鏡、2k-CCD、多色のフィルターを使用した。フィルターは、ジョンソン・カズンズ (Johnson-Cousins) システムに則った広帯域フィルター U, B, V, Rc, Ic の5枚と、HII領域に特徴的な輝線 $H\alpha + [NII], H\beta, [OIII], [SII]$ をそれぞれカバーする狭帯域フィルター4枚、そして輝線のオフ点用の狭帯域フィルター2枚の計11枚を使用した。データリダクション及びキャリブレーションについては、本シンポジウムの西浦の集録『多色撮像による近傍渦巻銀河HII領域のSED研究計画』を参照していただきたい。

表 1. M81・M101 の各バンドの積分時間と限界輝度

フィルター	M81		M101	
	積分時間 (sec)	限界輝度 (mag/□")	積分時間 (sec)	限界輝度 (mag/□")
U_J	1800	24.252	1500	24.208
B_J	1500	27.730	720	27.230
V_J	1500	27.054	720	26.613
Rc	720	26.278	360	26.099
Ic	720	24.833	360	24.845
N487 ($H\beta$)	5400	26.039	3600	25.978
N499 ([OIII])	5400	26.327	3600	26.560
N519 (オフ点)	5400	26.318	3600	25.773
Ha6417 (オフ点)	2400	24.668	1800	25.031
Ha6577 ($H\alpha$)	2400	24.867	1800	24.563
Ha6737 ([SII])	2400	24.660	1800	24.883

3. HII領域の検出

キャリブレーション済の各輝線のオン点画像からレベルを合わせたオフ点画像を引き、4つの輝線毎の輝線画像を作成する。作成した4枚の輝線画像に対し、*Source Extractor* で等輝度測光と開口測光を行い、4つ全てで検出された天体のリストを作成する。その際の *Source Extractor* の検出条件は、 $S/N > 1.5$, 最小ピクセル数=9pixels, aperture=FWHM $\times 3.5$ である。そのリストから恒星と思われる天体を差し引く。その方法としては、まず $B, V, Ha6417, Ha6577$ バンド全てで検出された天体の $(B-V)$ vs. $(Ha6417-Ha6577)$ ダイアグラムを描く。すると恒星では輝線成分が存在しないため、 $Ha6417-Ha6577$ は $B-V$ に対してほとんど依存せず、ほぼ直線状に分布する。これを最小二乗法で直線フィットし、フィッティングエラーの 1σ よりも $Ha6417-Ha6577$ が小さい天体を恒星とみなし、4輝線全てで検出された天体のリストからその恒星と位置が合致した天体を取り除き、

残ったものを HII 領域とみなした.

4. HII領域の各輝線の光度関数

等輝度測光によって得られた HII 領域の等級から, 各輝線成分の光度関数を作成し, 線形近似から冪を求めた.

光度関数は, 一般的に

$$N(L) = kL^{-\alpha}$$

と表される. ここで L は光度, $N(L)$ は光度当りの個数, k は比例定数を表す.

光度関数の横軸には検出した光度範囲の中心の値をとり, 縦軸はその光度範囲に検出された天体数を 4×10^{33} erg/s/Å 当りの値で表した. 図 1 には, 例として M81 と M101 の $H\alpha$ 光度関数を示し, 冪とそのフィッティングエラーは表 2 に示した.

前述したように, $H\alpha$ 光度関数については多くの先行研究がある. M81 に対しては, Lin et al. (2003, AJ, 126, 1286) では $\alpha = 1.70$, Petit et al. (1988, A&AS, 74, 475) では $\alpha = 1.87$ という値が報告されている. また, M101 に対しては, Pleuss et al. (2000, A&A, 361, 913) では $\alpha = 1.74$ という値が報告されている. 本研究で得られた $H\alpha$ 光度関数の冪の値は, M81・M101 共にこれらの先行研究と誤差範囲で一致した.

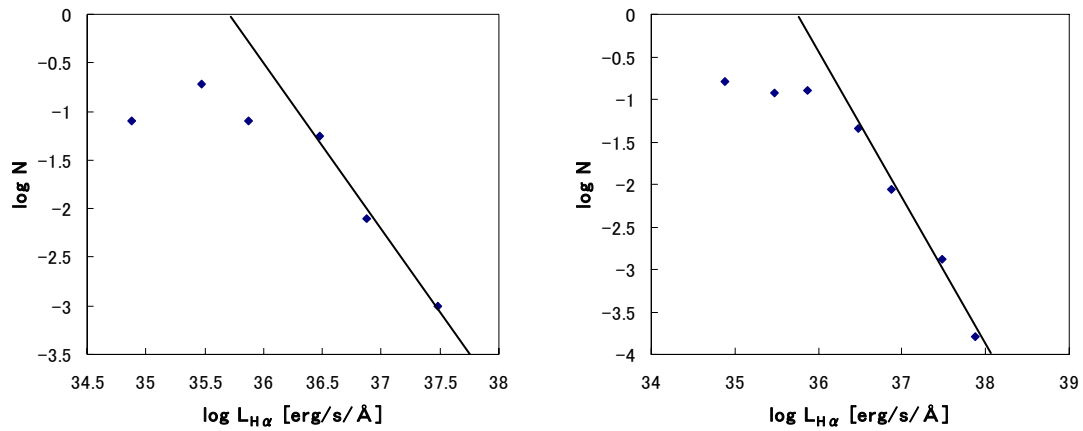


図 1. M81 HII 領域 (左図) と M101 HII 領域 (右図) の $H\alpha$ の光度関数

表 2. 各輝線の光度関数

輝線	α (M81)	α (M101)
$H\beta$	1.67 ± 0.13	1.63 ± 0.26
[OIII]	1.87 ± 0.11	1.51 ± 0.25
$H\alpha$	1.66 ± 0.24	1.85 ± 0.23
[SII]	1.97 ± 0.20	1.74 ± 0.22

5. HII領域の電離ガスの物理的性質

HII領域の輝線比は、電離の要因である電離光子のスペクトルや数、電離ガスの密度や金属量などに依存する。そこで、本研究で得られた輝線比 $[\text{SII}]/\text{H}\alpha - [\text{OIII}]/\text{H}\beta$ 図上に、Stasinska (1984, A&AS, 55, 15) の光電離モデルを併せて表記し、電離ガスの性質を考察した。光電離モデルには、Stasinska (1984) で計算され、公表されているデータを用いた。

図2は、M81・M101それぞれのHII領域の輝線比と電離光子のスペクトルの冪 $\beta = 1.5$ 、水素数密度 $n(\text{H}) = 10^{-4} \text{cm}^{-3}$ に対して、電離ガスの金属量とionizing parameterを変化させたモデルと観測量との比較を表している。この図からは、電離ガスの金属量が $Z \geq 0.5Z_{\odot}$ のとき輝線比はほとんど変わらないということが読み取れ、M81・M101のHII領域は金属量が豊富であるという傾向が見受けられる。しかし、M101についてはM81によりも多少金属量の少ないHII領域も存在することが読み取れる。また、M81・M101のHII領域ではionizing parameterの値がStasinska (1984) で用意されたモデルよりも小さいという傾向も示している。

図3は、M81・M101それぞれのHII領域の輝線比と電離光子のスペクトルの冪 $\beta = 1.5$ 、金属量 $Z = 1Z_{\odot}$ に対して、水素数密度 $n(\text{H})$ とionizing parameterを変化させたモデルと観測量との比較を表している。この図からは、電離ガスの水素数密度が大きくなるにつれて $\log([\text{OIII}]/\text{H}\beta)$ は大きくなることが読み取れ、M81・M101のHII領域では比較的气体密度が高いという傾向を示している。しかし、M101についてはM81によりも多少ガス密度の低いHII領域も存在することが読み取れる。

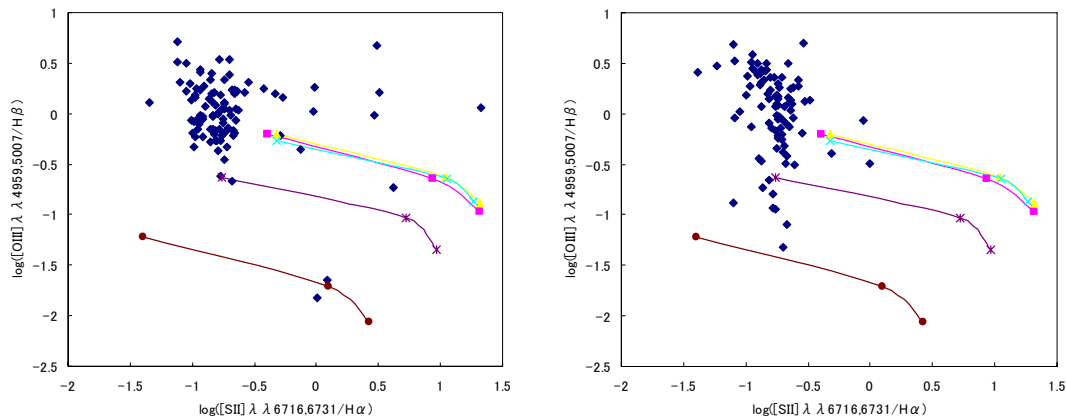


図2. 輝線比と光電離モデル. 青いひし形は、本研究で得られたM81 (左図) とM101 (右図) のHII領域の輝線比. 曲線は光電離モデルを表しており、電離光子のスペクトルの冪 $\beta = 1.5$ 、水素数密度 $n(\text{H}) = 10^{-4} \text{cm}^{-3}$ を一定にした上で、電離ガスの金属量を下から $0.02Z_{\odot}$ 、 $0.1Z_{\odot}$ 、 $0.5Z_{\odot}$ 、 Z_{\odot} 、 $2Z_{\odot}$ とし、それぞれに対してionizing parameterを左から 1×10^{-4} 、 1×10^{-3} 、 1×10^{-2} と変化させたときの輝線比の変化を示している。

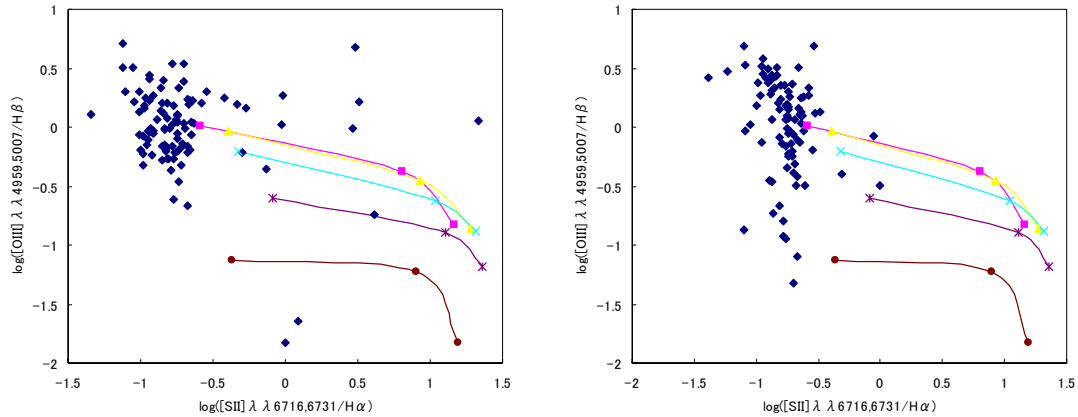


図 3. 輝線比と光電離モデル. 青いひし形は、本研究で得られたM81 (左図) とM101 (右図) のHII領域の輝線比. 曲線は光電離モデルを表しており、電離光子のスペクトルの冪 $\beta = 1.5$ 、電離ガスの金属量 $Z=Z_{\odot}$ を一定にした上で、水素数密度を下から 10^6cm^{-3} , 10^5cm^{-3} , 10^4cm^{-3} , 10^3cm^{-3} , 10^2cm^{-3} とし、それぞれに対してionizing parameterを左から 1×10^{-4} , 1×10^{-3} , 1×10^{-2} と変化させたときの輝線比の変化を示している.

6. HII領域の銀河中心からの距離と輝線比

図 4 は、銀河中心からの距離と $\log([\text{OIII}]/\text{H}\beta)$ の関係を表したものである. 左がM81, 右がM101 のHII領域に対するものである. M81 の結果 (左図) では、 $1 < \rho_e < 2$ あたり (M81 の腕の部分) にHII領域が集中しているが、距離の変化による $\log([\text{OIII}]/\text{H}\beta)$ の主だった規則性は見られない. しかしながらHenry&Howard(1995, ApJ, 438, 170)では、M81 中心からの距離と $\log([\text{OIII}]/\text{H}\beta)$ の間に弱いながらも正相関があることが示唆されている. だが、HenryとHoward等はそれまでにスリット分光観測が行われたHII領域のスペクトルを取りまとめて議論を行っており、観測対象が明るいHII領域に偏っている可能性が大きい. それに対して、本研究では撮像観測によってさらに暗いHII領域まで観測データが得られているため、このようなバイアスの影響は少ないと考えられる. 従って、M81 のHII領域の中心距離に対する金属量依存性はないか、あっても非常に弱いと考えられる. M101 についてもHenry&Howard (1995) は、M101 中心からの距離と $\log([\text{OIII}]/\text{H}\beta)$ の間に正の相関があることを示唆している. 本研究では、図 4 (右) のように、彼等が示した正相関と同様の相関が見受けられる結果となった.

M81 と M101 で、銀河中心からの距離と $\log([\text{OIII}]/\text{H}\beta)$ の間の相関の有無が何に起因するものなのかは、まだ二つの銀河しか調べていないため、現状では詳しく言及できない. M81 は近くに M82 と NGC3077 が存在しており、その 3 つの銀河を結ぶように巨大な HI が取り巻いていることが明らかになっている. これは極めて激しい銀河衝突の痕跡である (Yun, M. et al., 1994, Nature 372: 530). 一方、M101 は、渦上腕がなどの特異な形態から、何らかの重力相互作用を経験していると考えられるが、近傍に同程度の銀河は存

在せず、せいぜい *minor merger* 程度の相互作用であると考えられる (Waller et al., 1997, *AJ*, 481, 169). このことから、銀河中心からの距離と HII 領域の $\log([\text{OIII}]/\text{H}\beta)$ の関係は、銀河衝突の規模に依存している可能性がある。また、M81 は早期型渦巻銀河であり、M101 は晩期型渦巻銀河であるので、ハッブルタイプに依存している可能性も捨て切れない。

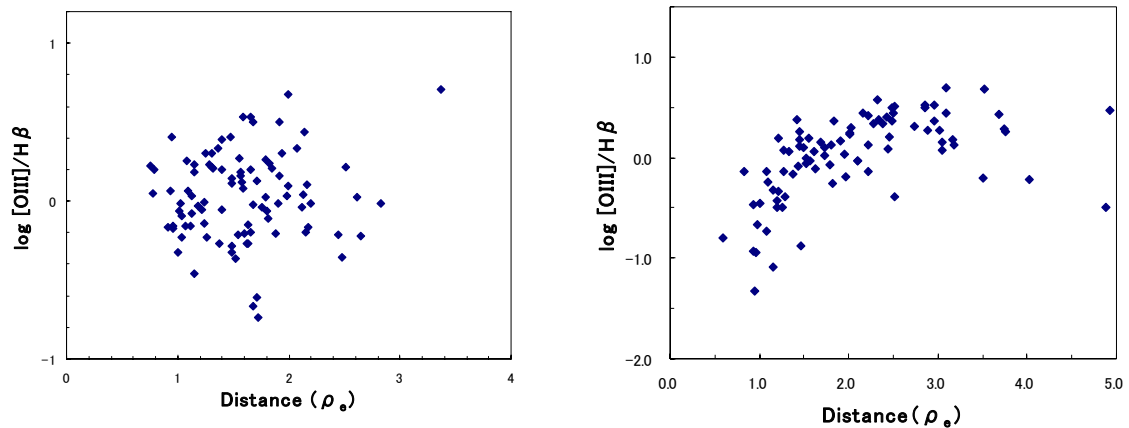


図 4. 銀河中心からの距離と $\log([\text{OIII}]/\text{H}\beta)$. 左が M81, 右が M101 の HII 領域に対するもの。

7. 今後について

今回は、HII 領域の物理的性質を考察する手段として Stasinska (1984) の光電離モデルを用いたが、*Cloudy* の光電離モデルを用いるとさらに多くのパラメータを細かく変化させることができるので、今後は *Cloudy* を使用して HII 領域の性質を調べていきたい。

また、既にデータがほとんど揃っており、同じハッブルタイプで全く衝突していないと思われる晩期型渦巻銀河 (IC342・NGC6946) や、明らかに衝突している早期型渦巻銀河 (M51) を調査して比較し、HII 領域の銀河中心からの距離と $\log([\text{OIII}]/\text{H}\beta)$ の間の相関を比較・考察したい。

他には、解析を簡単にするためのプログラムやスクリプトを作成し、解析の手間と時間をできるだけ省いていきたい。