

木曾105 cm シュミット望遠鏡と木曾広視野 CCD カメラ KWFC による 広視野 659 nm 帯撮像観測

西浦 慎悟*・根本 明宗*・宮野 彩*

宇宙地球科学分野

(2014年5月23日受理)

NISHIURA, S., NEMOTO, A. and MIYANO A.: Wide-field 659 nm imaging with the Kiso wide-field CCD camera KWFC installed the Kiso 105cm Schmidt Telescope. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., **66**: 53-60. (2014) ISSN 1880-4330

Abstract

To detect and investigate extragalactic HII regions of the extreme outer disk in nearby spiral galaxies, we made a narrow 659 nm-band filter for emission-line H α from ionized hydrogen gas. Installing our filter to the Kiso wide-field CCD camera (= KWFC) attached to the Kiso 105cm Schmidt telescope, at Kiso Observatory, Institute of Astronomy, the University of Tokyo, central wavelength and band-width of it are 659.9 nm and 16.3 nm, respectively. The wavelength coverage is from 651.8 nm to 668.1 nm, including three emission-lines of H α 6563 and [NII] λ 6548,6583 from extragalactic HII regions with an inner motion of about 30 km s⁻¹ in a galaxy with rotation velocity and with radial velocity of about 350 km s⁻¹ and from -300 km s⁻¹ to 2,500 km s⁻¹. Our observational system enables us to detect the extragalactic HII regions from in nearby galaxy M31 to in many spiral galaxies in Virgo cluster.

From N6590 narrow-band imaging of the nearby spiral galaxy M101 region, we estimated limiting surface brightness for integration time of 30 minutes in each CCD-chip on the KWFC, 24.86-25.04 AB magnitude arcsec⁻² for chip-0, 1, 2, 3, and 23.99-24.53 AB magnitude arcsec⁻² for chip-4, 5, 6, 7.

Keywords: H α , extragalactic HII region, narrow-band imaging, wide-field imaging

Department of Astronomy and Earth Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

要旨: 我々は、近傍渦巻銀河の最外縁部に存在するHII領域を検出・調査するために、電離水素由来のH α 輝線に対応した659 nm帯の狭帯域フィルターを作成した。このフィルターは、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の105 cm シュミット望遠鏡に搭載されたKiso wide-field CCD camera (= KWFC) に装填することで、中心波長659.9 nm、バンド幅16.3 nm、帯域が651.8 nm から668.1 nm となる。この帯域は、-300 km s⁻¹ から2,500 km s⁻¹ の後退速度を持ち、350 km s⁻¹ で回転している銀河に付随し、内部運動が30 km s⁻¹ であるようなHII領域から放射されるH α 6563輝線と[NII] λ 6548, 6583輝線を捕らえることが出来る。これにより、最近傍にあるM31からおとめ座銀河団に属する渦巻銀河まで、その中にあるHII領域を検出することが可能である。

M101天域のN6590狭帯域撮像観測データから、積分時間30分に対する限界輝度として、chip-0, 1, 2, 3 に対して24.86-25.04 AB等級/□", chip-4, 5, 6, 7 に対して23.99-24.53 AB等級/□" を得た。

* 東京学芸大学 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)

1. はじめに

恒星は、低温のガスやダストが高密度かつ大量に存在する場所において、集団で誕生する。一般にこのような場所は、渦巻銀河の円盤(ディスク)部、特に渦状腕領域に多く存在しており、星生成領域と呼ばれる。その中でも、誕生後間もないOB型星から放射される紫外線によって、周辺部の物質が電離している場所はHII領域と呼ばれ、現在恒星が盛んに誕生している場所であると考えられている。HII領域中の電離ガスからは、電離光子の数やそのスペクトル、電離ガスの温度や密度、金属量などに応じて、様々な輝線が特定の強度比で放射されるため、これら輝線強度を測定することで、HII領域における電離ガスの様々な物理状態を推測することが可能となる。HII領域から放射される可視光波長域の輝線の中で、特に放射強度が強いものは、電離水素起源の $H\alpha\lambda 6563$ (以下、 $H\alpha$)と $H\beta\lambda 4861$ (以下、 $H\beta$)、そして電離酸素起源の $[OIII]\lambda 4959, 5007$ (以下、 $[OIII]$)と電離窒素起源の $[NII]\lambda 6548, 6583$ (以下、 $[NII]$)、電離硫黄起源の $[SII]\lambda 6716, 6731$ (以下、 $[SII]$)である(例えば、Shields 1990)。

このような輝線成分の研究では、スリット分光観測によって対象天体のスペクトルを得ることが一般的であるが、HII領域は一つの銀河内に数10個から数100、数1000個も存在しており、これら一つ一つに対してスリット分光観測を行うことは現実的ではない。寧ろ、特定の輝線成分の検出が目的であれば、その輝線に対応した狭帯域フィルターを用いた狭帯域撮像観測を行う方が、同時に複数のHII領域の輝線撮像が行えるために効率が良い。特に、天球上で大きく広がって見える銀河系内HII領域の輝線分布や、系外銀河の円盤外縁部からその周辺領域に分布するHII領域(例えば、Ferguson et al. 1998)の研究においては、前述したような輝線成分に対応した狭帯域フィルターを広視野観測装置に装填することで、より効果的に観測データを取得することが可能となる。

極めて広い視野を有する観測装置としては、シュミット望遠鏡が挙げられる。シュミット望遠鏡は、球面鏡の主鏡と鏡筒先端部の補正板と呼ばれるレンズによって、通常の望遠鏡よりも遙かに広い観測視野を有している。光学系にレンズを用いるため、大型化は困難であるが、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)のシュミット望遠鏡は有効口径が105 cmであり、シュミット望遠鏡としては世界第4位の有効口径を誇っている(有効口径世界第1位のシュミット望遠鏡でも、

ドイツのカール・シュバルツシルド天文台の134cmである)。これに、同観測所で開発された可視光広視野 CCDカメラ、Kiso wide-field CCD Camera(以下、KWFC)を搭載することで、約2.2度角四方という世界的にも希有な広視野撮像観測機器となる(青木ほか 2011a, 2011b, 2012; 酒向 2012; 酒向ほか 2012; 2013)。この広い観測視野は、銀河系内の多くのHII領域全体を1回から数回の露光で撮影し、また、近傍銀河内のHII領域の多くを空間的に分解しつつ、それが存在する銀河全体とその周辺領域までを、一度の露光で撮像観測することを可能にするものである。

本稿では、木曾観測所の105cmシュミット望遠鏡(以下、木曾シュミット鏡)に搭載されたKWFCに装填し、近傍渦巻銀河周辺領域のHII領域探査を行う目的で製作した、 $H\alpha$ 輝線用狭帯域フィルターについて、その仕様の詳細、フラックス較正の方法、そして、実際の狭帯域撮像データから評価した限界輝度を報告する。

2. $H\alpha$ 輝線用狭帯域フィルター：N6590

2. 1 狭帯域フィルター N6590の基本仕様

近傍渦巻銀河内のHII領域から放射される静止波長 λ_0 の輝線は、HII領域を形成するガスの内部運動 V_{inn} 、これが存在している銀河の回転運動 V_{rot} 、銀河の特異運動の視線方向成分 V_{prop} と宇宙膨張による後退速度 V_{hf} によって、観測される波長が $\Delta\lambda$ だけ偏移する。ただし、 V_{prop} と V_{hf} は観測的に区別できないため、実際には、これらの合成である $V_{rad}(=V_{prop}+V_{hf})$ を扱う。

ここで、HII領域の内部運動と銀河回転を考慮すると、輝線の静止波長 λ_0 からの波長偏移 $\Delta\lambda$ の最大値 $\Delta\lambda_{max}$ と最小値 $\Delta\lambda_{min}$ は、光速を c として、それぞれ、

$$\Delta\lambda_{max} = (V_{inn} + V_{rot} + V_{rad}) \lambda_0 / c \quad (\text{式 1})$$

$$\Delta\lambda_{min} = (-V_{inn} - V_{rot} + V_{rad}) \lambda_0 / c \quad (\text{式 2})$$

となる。そのため、狭帯域撮像観測によって、系外銀河のHII領域由来の輝線(静止波長 λ_0)を検出するためには、帯域が $\lambda_0 + \Delta\lambda_{min}$ から $\lambda_0 + \Delta\lambda_{max}$ となるような狭帯域フィルターを用いれば良いことになる。なお、本稿におけるフィルターの帯域とは、透過率が最大値の50%以上となる波長帯を示すものとする。

今までの研究から、HII領域を形成するガスの内部運動による速度分散は数10 km s⁻¹程度(例えば、Smith & Weedman 1970, 1972)、渦巻銀河の回転速度は最大で300 km s⁻¹程度(例えば、Rubin et al. 1985; Sofue

and Rubin 2001)である。また、近傍渦巻銀河の後退速度は、最小でM31の -300 km s^{-1} (de Vaucouleurs et al. 1991: 以下, RC3), 典型的なおとめ座銀河団渦巻銀河で 2500 km s^{-1} 程度(例えば, Tully 1988: 以下, T88)になる。そこで、狭帯域フィルターの仕様決定の際には、 $V_{inn} = 30 \text{ km s}^{-1}$, $V_{rot} = 350 \text{ km s}^{-1}$, $V_{rad} = -300 - 2500 \text{ km s}^{-1}$ という値を採用した。図1に、本研究で対象とする系外銀河に付随するHII領域の概念図を示す。

H α 輝線(静止波長656.3 nm)は、宇宙空間に最も多く存在する元素である水素に由来しており、また、前述したように、他の輝線に比べて相対的な強度が強いため、輝線観測の基本となる輝線成分である。ただし、H α 輝線のすぐ短波長側には電離窒素起源の[NII] $\lambda 6548$ 輝線、すぐ長波長側には同じく電離窒素起源の[NII] $\lambda 6583$ 輝線があり、狭帯域フィルターを用いた撮像観測では、これらをH α 輝線と分離することは極めて難しい。そのため、狭帯域フィルターの仕様決定の際には、H α 輝線に加えて、これら二つの[NII]輝線もこの帯域に含まれるようにし、これらを一緒に取り扱うようにした。

最後に、上記条件の下で、H α 輝線および[NII]輝線の強度が各輝線の最大値の50%以上となる輝線成分が、狭帯域フィルターの帯域に含まれるように仕様を決定した。以後、この近傍渦巻銀河内のHII領域から放射されるH α 輝線および[NII]輝線に対応したフィルターについては、狭帯域(narrow-band)撮像用であることと、主な観測波長帯が659nmであることから、N6590フィルターと呼ぶ。

図2に、作成された狭帯域フィルターN6590、表1にN6590の透過曲線、表2にN6590の基本的な仕様を示した。なお、表1、表2は、平行光条件下で測定された透過曲線を、短波長側に1.3nmだけシフトすることで、木曾シュミット鏡の光学系であるF/3相当にしたものである。HII領域などのスペクトル観測では、H α 輝線の長波長側に[SII]輝線が観測されるが、この仕様では、前述した条件のHII領域からの[SII]輝線は、N6590フィルターの帯域に混入しない。

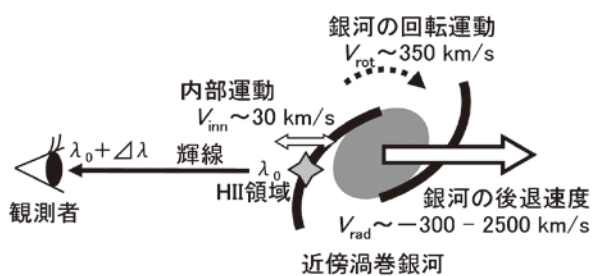


図1: 近傍渦巻銀河とそれに付随するHII領域の概念図

2.2 木曾シュミット鏡およびKWFCの波長依存性

望遠鏡に入射した天体からの光は、観測に用いたフィルターだけではなく、望遠鏡や検出器の光学系の波長依存性にも影響を受ける。木曾シュミット鏡では、望遠鏡に入射した光は、鏡筒先端部の補正板と呼ばれるレンズを透過した後、主鏡で反射されて主焦点に集光される。KWFCは主焦点に設置されており、集光された光は、フィルターとKWFCのデュワーの窓を通過して、CCDチップ上に天体の像を結ぶ。従って、大気減光を考慮しなければ、実際の観測で得られる天体からの光の強度は、天体のspectral energy distribution (= SED)を、補正板の透過率、主鏡の反射率、観測に使用したフィルターの透過率、KWFCデュワー窓の透過率、KWFCのCCDチップの波長依存性と、フィルターの帯域でコンボリューションしたものになる。これは、望遠鏡の光学系やCCDチップの性質によっては、予期しない波長特性を示す可能性があることを意味する。

図3に、N6590の透過曲線と、木曾シュミット鏡の

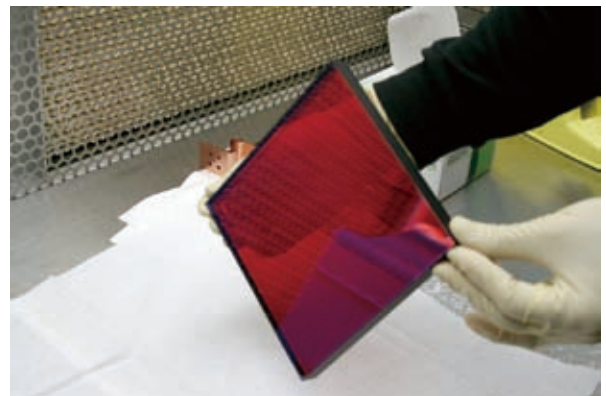


図2: 659nm帯用狭帯域フィルター N6590。

表1: 狭帯域フィルター N6590の透過曲線。波長 λ (nm)に対する透過率 $T(\lambda)$ を示した。なお、 $T(\lambda)$ は最大透過率94.0 (%)で規格化した。

λ (nm)	$T(\lambda)$ (%)	λ (nm)	$T(\lambda)$ (%)	λ (nm)	$T(\lambda)$ (%)
640	0.00	656	0.99	666	0.86
643	0.01	657	1.00	667	0.70
646	0.03	658	1.00	668	0.52
647	0.05	659	1.00	670	0.22
649	0.14	660	1.00	671	0.13
651	0.37	661	1.00	673	0.05
652	0.54	662	1.00	674	0.03
653	0.73	663	1.00	678	0.01
654	0.87	664	0.99	680	0.00
655	0.95	665	0.95		

表2：狭帯域フィルター N6590の基本仕様

	仕 様	備 考
中心波長	659.9 nm	帯域の中心となる波長
ピーク波長	658.5 nm	透過率が最大となる波長
バンド幅 (半値幅)	16.3 nm	
帯域	651.8 nm - 668.1 nm	相対的な透過率が50%以上となる波長帯
最大透過率	94.0 %	

補正板の透過率と主鏡の反射率の波長特性を図示した(樽沢ほか 1996 から図をスキャンして数値を読み取った)。また図4には、N6590の透過曲線と、KWFCの各CCDチップの波長感度を示した(諸隈2013から図をスキャンして数値を読み取った)。なお、各CCDチップの波長感度は、KWFCのデューワー窓の透過率を含めたものになっている。これらから、まず、木曾シュミット鏡の補正板の透過率と主鏡の反射率は、

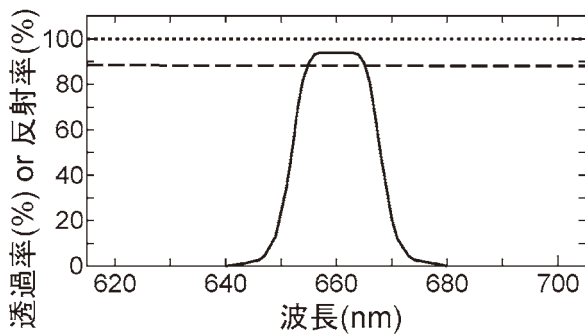


図3：狭帯域フィルター N6590の透過率(実線)と、木曾105cmシュミット望遠鏡の補正板の透過率(点線)と主鏡の反射率(破線)の波長依存性。縦軸は反射率(%)または透過率(%)を、横軸は波長(nm)を示す。

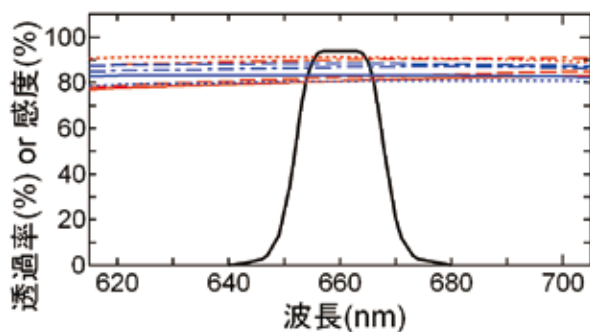


図4：狭帯域フィルター N6590の透過率(実線)と、KWFCの各CCDチップの波長感度。縦軸は透過率(%)または感度(%)を、横軸は波長(nm)を示す。赤実線はchip-0、赤点線はchip-1、赤破線はchip-2、赤一点破線はchip-3の、青実線はchip-4、青点線はchip-5、青破線はchip-6、青一点破線はchip-7の波長感度である。

N6590の帯域内においてほぼ一定であることが分かる。加えて、KWFCは4つのMIT製CCDチップ(chip-0, 1, 2, 3)と4つのSITe製CCDチップ(chip-4, 5, 6, 7)の合計8つのCCDチップから構成されており、この8枚それぞれが僅かながら異なる波長感度を持つが、N6590の帯域内では各chipでほぼ一定となっている。従って、狭帯域フィルターN6590を用いた木曾シュミット鏡とKWFCによる狭帯域撮像で得られる天体のフラックスは、事実上、天体それ自体のSEDとN6590の透過曲線のみで決まることになり、光学系やCCDチップに起因する波長特性は無視できる。

3. テスト観測と整約

木曾シュミット鏡とKWFC、そして、N6590を用いた狭帯域撮像のテスト観測を行った。観測領域は近傍渦巻銀河M101と分光測光標準星PG0934+554を中心とした天域を選んだ。

M101は、ハッブル形態がSABcdであり、その後退速度は 241 km s^{-1} (RC3)、そして、我々からの距離が5.4 Mpc (Tully 1988)と、最近傍の渦巻銀河の一つである。また、晩期型渦巻銀河であるためにその渦状腕中に多くのHII領域が存在していることに加えて、ほぼface-on view(正面向き)であることから、しばしば、系外銀河のHII領域研究の対象天体とされてきた。そのためM101の天域は、近傍渦巻銀河周辺部のHII領域の検出を目的として作成したN6590フィルターによる狭帯域撮像のテスト観測の対象として、最適な領域の一つであると考えられる。表3にM101の基本的なデータを掲げた。

M101の観測は2013年5月14日に行った。1回の露光時間を240 sとして、デザリングによって8枚(積分時間1920 s)を取得した。観測中の天頂距離(zenith distance)は 28° から 47° で、その間の気象条件は非測光夜であり、時々シラスが出現した。また、平均的なシーイング・サイズは約3秒角であった。バイアス画像とドーム・フラット画像は、同じ観測夜に、

表3: 観測天体の基本データ

パラメータ	値	出典
天体名	M101	
赤経 (J2000.0)	14 ^h 03 ^m 12.5 ^s	RC3
赤緯 (J2000.0)	+ 54° 20' 56"	RC3
ハッブル形態	SAB(rs)cd	RC3
後退速度	241 ± 2 km s ⁻¹	RC3
距離	5.4 Mpc	T88
R ₂₅	14.4'	RC3
天体名	PG0934+554	
赤経 (J2000.0)	09 ^h 38 ^m 19.9 ^s	M88
赤緯 (J2000.0)	+ 55° 05' 53"	M88
スペクトル型	SdO	M88
m _{N6590}	12.638 AB等級	This work

それぞれ、21枚と6枚とを取得した。

PG0934+554は、波長に対する放射強度が既知の分光測光標準星である。後述するような、N6590狭帯域撮像データのフラックス較正方法を評価するため、この天体の観測を2014年3月27日に行った。PG0934+554の基本データは、表3に示した。1回の露光時間を210sとして、KWFCのchip-0から7を用いて1回ずつ、計8枚を取得した。観測中の天頂距離は19°から26°であり、その間の気象条件は非測光夜で、時々シラスが出現した。平均的なシーイング・サイズは約3秒角であり、同じ観測夜にバイアス画像とドーム・フラット画像を、それぞれ、28枚と7枚とを取得した。

観測データの整約(reduction, リダクション)には、アメリカの国立光学天文台が開発・管理・無償配布するIRAF (= Image Reduction and Analysis Facility, <http://iraf.noao.edu/>)を用いた。画像処理は、オーバースキャン領域 (= overscan region) を用いたバイアス画像の合成とバイアス成分の差し引き、ドーム・フラット画像の合成とこれを用いた感度むら補正(フラット・フィールドニング = flat fielding)、そして背景光除去 (= sky subtraction) という典型的な手法で行った。なお、KWFCの各CCDチップは、それぞれ読み出し口が異なる上(北)半分と下(南)半分で、僅かながらバイアス・レベルの違いがあることが指摘されているため(諸隈 2013)、実際の画像解析では、最初に各CCDチップ画像を上下に分割し、それぞれを整約した後、改めて上下を繋ぎ合わせた。

背景光除去の後、画像間のフラックス・レベルの調整を行った。また、星像サイズは画像間で比較的安定していたため、この調整は行わなかった。最後にメジアン・フィルターを通して、位置合わせを行いつつ、

CCDチップ毎に8枚の画像を合成した。なお、PG0934+554の観測データについては、その目的上、感度むら補正以後の処理が不要であるため行っていない。

図5に、画像解析が完了したchip-0から7の画像を合わせて作成した、M101天域の659nm帯画像を掲げた。

4. M101天域撮像データのフラックス較正

狭帯域フィルターは、対象となる輝線や天体そして研究内容に合わせて個別に作製されるため、広帯域撮像における測光標準システム(例えば、Johnson 1966; Bessell 1990; Fukugita et al. 1995)や測光標準星(Landolt 1992)は存在しない。そのため、狭帯域撮像観測で得られた画像データのフラックス較正では、SEDが既知である分光測光標準星(例えば、Oke 1974, 1990; Stone 1977; Massey et al. 1988; 以下、M88)を観測することになる。しかし、分光測光標準星は、事実上1天域中に1つしか用意されておらず、そのために、KWFCのchip-0から7に対して、同時に分光測光標準星の観測を行うことは難しい。

そこで今回は、M101の天域が、既にスローン・デジタル・スカイ・サーベイ(SDSS = Sloan Digital Sky Survey)で観測され、その測光データが公開されていることを利用する。まず、SDSSのデータベースから、KWFC各チップに写った恒星のSEDを作成する。続いて、この恒星のSEDからN6590を透過するフラックスを計算する。最後に、この計算で得たフラックスの値を、実際の観測データと比較することでフラックス較正を行う。ただし、計算を簡単にするために、恒星のSEDはSDSSの観測波長に対して、測光値を直線で結んで近似できるとし、また、N6590の透過曲線は、本来ガウス型に近い形状を持つが、これと同じ最大透過率と帯域、バンド幅を持つ矩形の透過曲線で近似できるとした。図6にフラックス較正の概念図を掲げた。

図6からも分かるように、N6590の帯域はSDSSシステムの*r*と*i*バンドの間に位置するため、恒星のSEDは*r*および*i*バンドの波長 λ_r (= 613.9 nm), λ_i (= 746.7 nm)と、これらに対するフラックス密度 f_r , f_i だけで決まる。すると、N6590を透過する恒星のフラックス f_{N6590} は、図6中の斜線で示された台形部分の面積で近似できることになり、

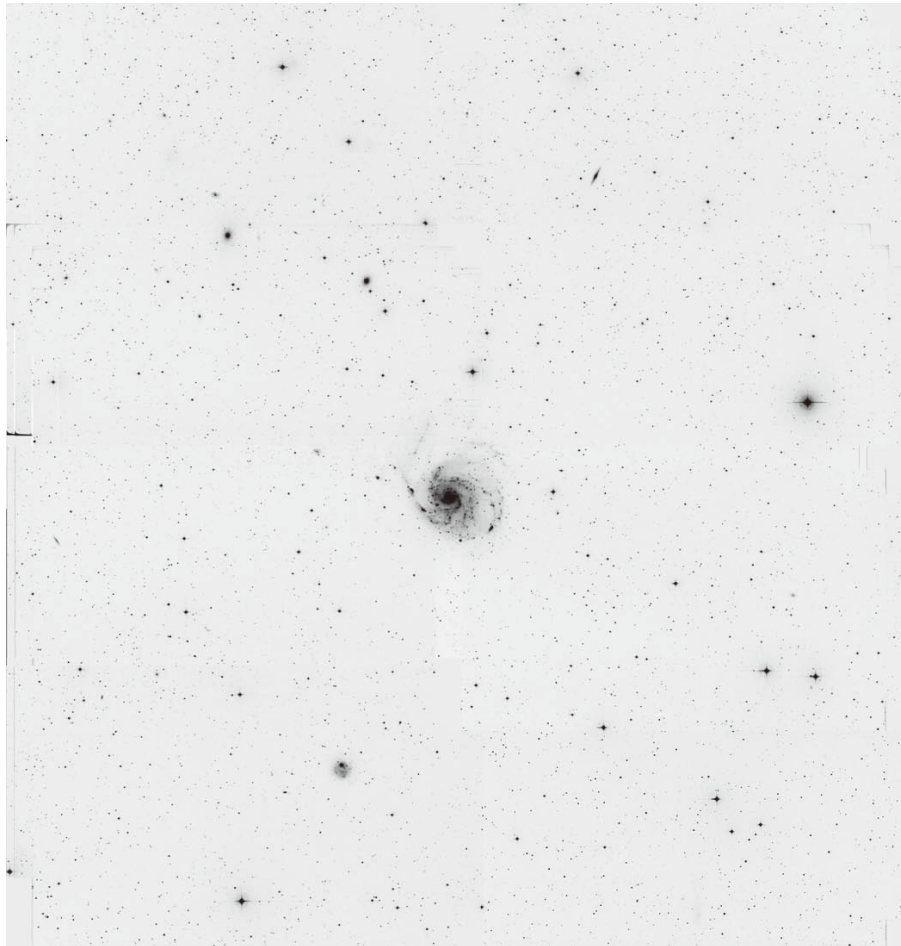


図5：近傍渦巻銀河M101天域の659nm帯画像。視野は約2.2°×2.2°で、方角は上が北、左が東である。

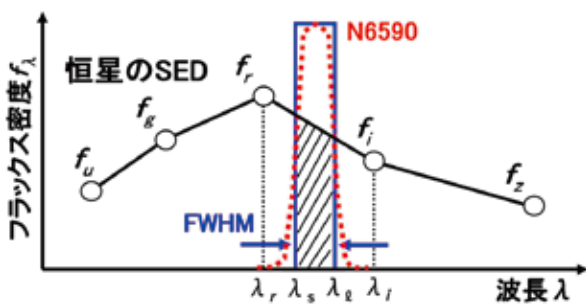


図6：等級較正の概念図。赤点線はN6590の透過率を示す。青直線はN6590の近似的な透過曲線であり、N6590の透過曲線と同じ帯域とバンド幅、最大透過率を持つ矩形である。 λ_l と λ_s は、N6590および仮想的な狭帯域フィルターの帯域における最長波長と最短波長を示す。白丸と黒直線はSDSSによる恒星のSEDで、 f_λ はSDSSのバンド λ におけるフラックス密度、 λ_l と λ_i はSDSS-rおよび-iバンドの波長である。斜線部分は、N6590の近似的な狭帯域フィルターを透過する恒星のフラックスを示す。

$$f_{N6590} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(f_i - f_r)(\lambda_l + \lambda_s - 2\lambda_r)}{\lambda_i - \lambda_r} + 2f_r \right\} \quad (\text{式3})$$

となる。ここで、 λ_l および λ_s は、N6590フィルター帯域の最長波長と最短波長であり、表2より、それぞれ、668.1 nmと651.8 nmである。

具体的には、以下のような手順でM101天域画像のフラックス較正を行った。まず、画像処理済みのM101天域の各CCDチップ画像から、飽和せずかつ暗過ぎない恒星を6-8個、眼視で選出した。次に、ストラスブール天文データセンター(Strasbourg Astronomical Data Center = CDS)が運営する天体カタログ・サービスVizieR (<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>)を用いて、これらのSDSS-rおよび-iバンド等級を抽出し、(式3)から各恒星の f_{N6590} を算出した。続いて、IRAF/APPHOTを用いて、これら選出した恒星の開口測光を行い、この測定値と算出した計算値とを比較して、フラックスのゼロ点(または等級のゼロ点)を求めた。KWFCの各CCDチップに対する、等級のゼロ点決定のランダム誤差は、0.02-0.06 AB等級であった。

5. 考察

KWFCの各CCDチップによって撮像されたM101天域について、限界輝度の目安として、これらの背景光のゆらぎの大きさを測定した。測定は、各チップに対して、中央と上下左右(北南東西)の五箇所について、目立った恒星が無い領域(典型的には100数十ピクセル四方)を眼視で選び、IRAF/imststatsを用いて、背景光ゆらぎの 1σ の値を測り、これを表面輝度に換算した。これによって得られた限界輝度は、MIT製のchip-0, 1, 2, 3に対して、それぞれ、24.96, 25.04, 24.91, 24.86 AB等級/ \square'' 、SITe製のchip-4, 5, 6, 7に対して、それぞれ、24.39, 24.53, 24.31, 23.99 AB等級/ \square'' であった。これらの値は、chip-0から3に対して $4.13\text{--}5.50 \times 10^{-7}$ Jy/ \square'' 、chip-4から7に対して $5.60\text{--}9.21 \times 10^{-7}$ Jy/ \square'' に相当する。各CCDチップに対して得られた限界輝度の値を表4にまとめた。

本研究で行ったフラックス較正の方法を評価するため、PG0934+554のN6590撮像データから、CCDチップ毎に、以下の2つの方法で等級のゼロ点を求め、これらを互いに比較した。1つ目は、本稿4節で行った方法であり、PG0934+554の周辺から約10個の恒星を選び、これらのSDSS- r バンドと $-i$ バンドの測光値から内挿によって f_{N6590} を求め、これを開口測光の値と比較し、等級のゼロ点を算出する。二つ目は、PG0934+554のSEDを、N6590の透過曲線と帯域でコンボリューションすることで f_{N6590} を求め、この値をPG0934+554の開口測光の値と比較し、等級のゼロ点を求める方法である。PG0934+554のSEDはMassey et al. (1988)で報告されたものを用い、開口測光はIRAF/APPHOTを使って行った。PG0934+554の f_{N6590} に相当する値として、N6590帯域における等級 $m_{N6590} = 12.638$ AB等級を得た(表3)。

これら2つの方法で得られた等級のゼロ点の差は、chip-0, 1, 2, 3に対して0.090, 0.088, 0.075, 0.091 AB等級、chip-4, 5, 6, 7に対して0.084, 0.119, 0.072, 0.077 AB等級となり、PG0934+554のSEDから得た値の方が、

0.07 ~ 0.11 AB等級だけ系統的に暗くなることが分かった。この原因については、選出した恒星のSEDの影響などが考えられ、今後検討が必要である。

現在、N6590に対する輝線成分フリーの狭帯域フィルター(659 nm帯に近接しつつ、強い輝線成分を帯域中に持たない狭帯域フィルター)は存在しない。そのため今後は、効果的な輝線成分の検出を実現するために、既存の広帯域フィルター(例えば、ジョンソン・カズンス・システムの R_c と I_c バンド、SDSSシステムの r と i バンド、など)を用いた、連続光成分の除去方法を検討する必要がある。また、連続光成分を差し引く場合には、背景光のゆらぎが大きくなることが予想されるため、先に見積もった輝線源検出の限界輝度も明るくなる。

本研究を進めるにあたって、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の土居守氏、小林尚人氏、三戸洋之氏、前原裕之氏、樽沢賢一氏、征矢野隆夫氏、青木勉氏、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の酒向重行氏、諸隈智貴氏、宮田隆志氏、国立天文台光赤外研究部の八木雅文氏、美星スペースガードセンターの坂本強氏、三重大学教育学部の伊藤信成氏から、狭帯域フィルターの仕様決定や観測によるデータ取得、画像解析の手法、そして、データ評価の方法などに関して、多くの協力や助言を頂きました、ここに深く感謝し、御礼申し上げます。また、本稿の執筆・出版に関して、学術振興会による科学研究費補助金(24654046:代表者 西浦慎悟, 26350193:代表者 伊藤信成)の支援を受けました、心から感謝いたします。

引用文献

青木 勉・加藤拓也・酒向重行・征矢野隆夫・樽沢賢一・三戸洋之・松永典之・猿楽祐樹・土居 守・小林尚人・宮田隆志・仲田史明・岡田則夫・宮崎 聡(2011a), “木曾観測所次世代広視野カメラ(KWFC)の開発”, 日本天文学会

表4: 積分時間約30分に対するKWFC各CCDチップの659nm帯狭帯域撮像での限界輝度。()内には、CCDチップの属性を記した。誤差は等級のゼロ点決定に伴うランダム誤差である。

chip	限界輝度 (AB等級/ \square'')	chip	限界輝度 (AB等級/ \square'')
0 (MIT)	24.96 \pm 0.06	4 (SITe)	24.39 \pm 0.05
1 (MIT)	25.04 \pm 0.05	5 (SITe)	24.53 \pm 0.05
2 (MIT)	24.91 \pm 0.06	6 (SITe)	24.31 \pm 0.02
3 (MIT)	24.86 \pm 0.02	7 (SITe)	23.99 \pm 0.03

- 2011年春季年会, V79a.
- 青木 勉・酒向重行・征矢野隆夫・樽沢賢一・三戸洋之・松永典之・猿楽祐樹・諸隈智貴・土居 守・小林尚人・宮田隆志・加藤拓也・仲田史明・岡田則夫・宮崎 聡(2011b), “木曾観測所次世代広視野カメラ(KWFC)の開発(II)”, 日本天文学会2011年秋季年会, V06a.
- 青木 勉・酒向重行・征矢野隆夫・樽沢賢一・三戸洋之・松永典之・猿楽祐樹・諸隈智貴・土居 守・小林尚人・宮田隆志・家中信幸・仲田史明・岡田則夫・宮崎 聡(2012), “木曾観測所広視野カメラ(KWFC)開発の現況(IV)”, 日本天文学会2012年秋季年会, V234c.
- Bessell, M. S. (1990), “UBVRI passbands”, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 102, pp. 1181-1199.
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, H. G., Jr., Buta, R. J., Paturel, G., and Fouqué, P. (1991), “Third Reference Catalogue of Bright Galaxies”, Springer, New York., 2091p. (RC3)
- Ferguson, A. M. N., Wyse, R. F. G., Gallagher, J. S., and Hunter, D. A. (1998), “Discovery of Recent Star Formation in the Extreme Outer Regions of Disk Galaxies”, *Astrophysical Journal*, 506, pp. L19-L22.
- Fukugita, M., Shimasaku, K., and Ichikawa, T. (1995), “Galaxy colors in Various Photometric Band Systems”, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 107, pp. 945-958.
- Johnson, H. L. (1966), “Astronomical Measurements in the Infrared”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 4, pp. 193-206.
- Landolt, A. U. (1992), “UBVRI photometric standard stars in the magnitude range 11.5-16.0 around the celestial equator”, *Astronomical Journal*, 104, pp. 340-371, 436-491.
- Massey, P., Strobel, K., Barnes, J. V., and Anderson, E. (1988), “Spectrophotometric standards”, *Astrophysical Journal*, 328, pp. 315-333. (M88)
- 諸隈智貴 (2013), “解析マニュアルの整備”, 木曾シュミットシンポジウム2013 (http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/RESEARCH/symp2013/kisosymp2013_morokuma1.pdf)
- Oke, J. B. (1974), “Absolute Spectral Energy Distributions for White Dwarfs”, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 27, pp. 21-35.
- Oke, J. B. (1990), “Faint spectrophotometric standard stars”, *Astronomical Journal*, 99, pp. 1621-1631.
- Rubin, V. C., Burstein, D., Ford, W. K., Jr., and Thonnard, N. (1985), “Rotation velocities of 16 SA galaxies and a comparison of Sa, Sb, and Sc rotation properties”, *Astrophysical Journal*, 289, pp. 81-98, 101-104.
- 酒向重行 (2012), “KWFCの開発・運用”, 木曾シュミットシンポジウム2012 (<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/RESEARCH/symp2012/Sako.pdf>)
- 酒向重行・青木 勉・征矢野隆夫・樽沢賢一・三戸洋之・松永典之・猿楽祐樹・諸隈智貴・土居 守・小林尚人・宮田隆志・家中信幸・仲田史明・岡田則夫・宮崎 聡(2012), “木曾観測所次世代広視野カメラ(KWFC)の開発(III)”, 日本天文学会2012年春季年会, V207b.
- 酒向重行・KWFC開発チーム (2013), “KWFCの現状”, 木曾シュミットシンポジウム2013 (http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/RESEARCH/symp2013/kisosymp2013_sako.pdf)
- Shields, G. A. (1990), “Extragalactic HII regions”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 28, pp. 525-560.
- Smith, M. G., and Weedman, D. W. (1970), “Internal Motions in Galactic and Extragalactic HII Regions”, *Astrophysical Journal*, 161, pp. 33-40.
- Smith, M. G., and Weedman, D. W. (1972), “Internal Kinematics of the 30 Doradus Nebula in the Large Magellanic Cloud”, *Astrophysical Journal*, 172, pp. 307-317.
- Sofue, Y., and Rubin, V. (2001), “Rotation Curves of Spiral Galaxies”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 39, pp. 137-174.
- Stone, R. P. S. (1977), “Spectral energy distributions of standard stars of intermediate brightness. II”, *Astrophysical Journal*, 218, pp. 767-769.
- Tully, R. B. (1988), “Nearby galaxies catalog”, Cambridge University Press, Cambridge and New York., 221p. (T88)
- 樽沢賢一・征矢野隆夫・青木 勉・吉田重臣・長谷川 隆 (1996), “2KCCDカメラの開発II: デュワー関係”, 木曾シュミット観測の新展開 2KCCDとKONICによる新しい天文学, pp. 7-16.