

2018年7月10日(火)-11日(水) 木曾シュミット・シンポジウム2018@上松町

①

# 木曾105cmシュミット鏡と KWFCによる 広視野多色狭帯域撮像観測



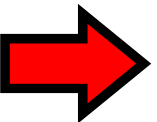
西浦 慎悟

(東京学芸大学・自然・宇宙地球科学)

宮野 彩 (東京学芸大学・教育)

根本 明宗 (東京学芸大学・教育)

長谷川 優子 (東京学芸大学・教育)



# 1. はじめに

②

## ● 広視野狭帯域撮像観測

銀河のHII領域に注目した星生成研究で大きな威力を発揮する。

- 例えば, 2kCCDから... 赤色に見える所がHII領域と呼ばれる星生成領域→

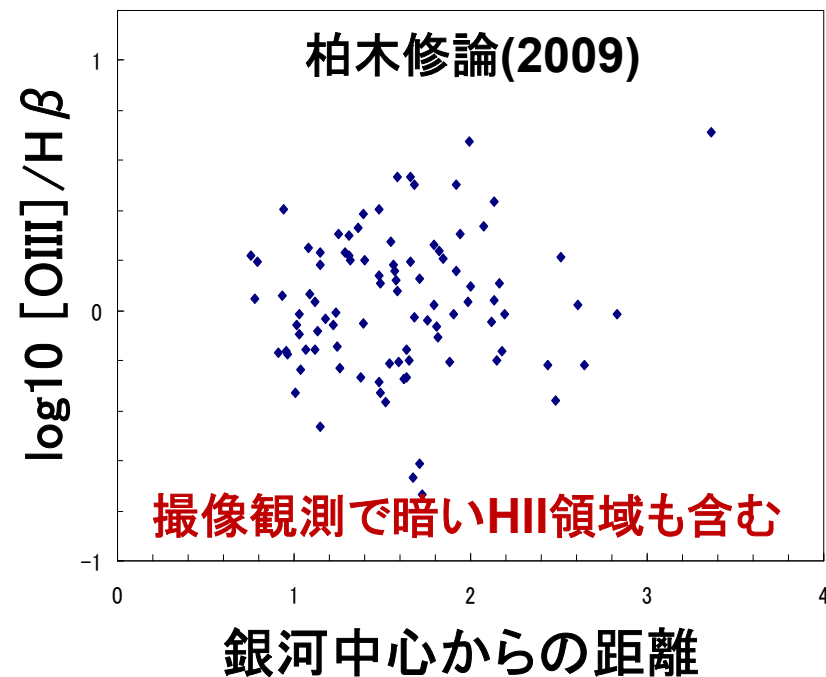
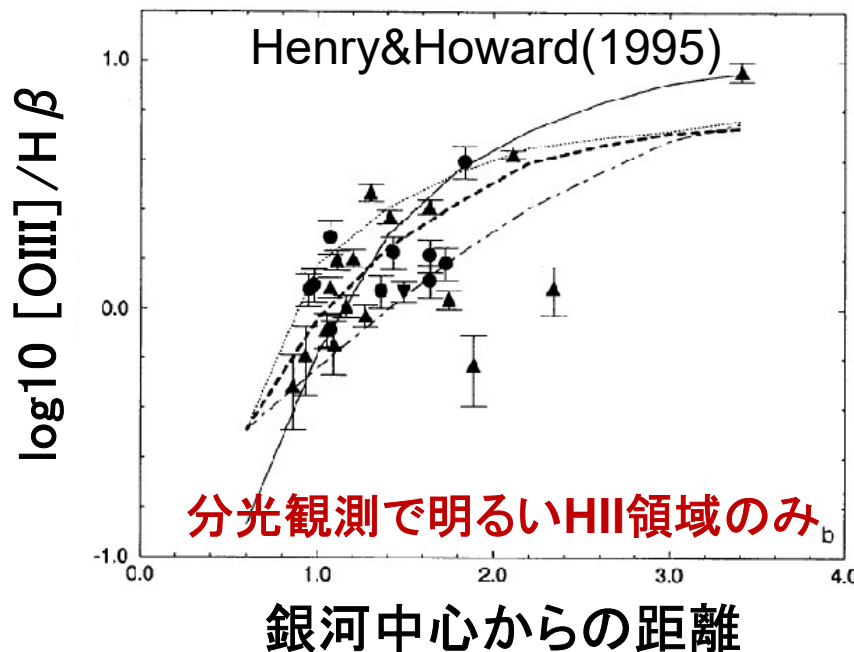
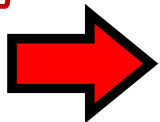
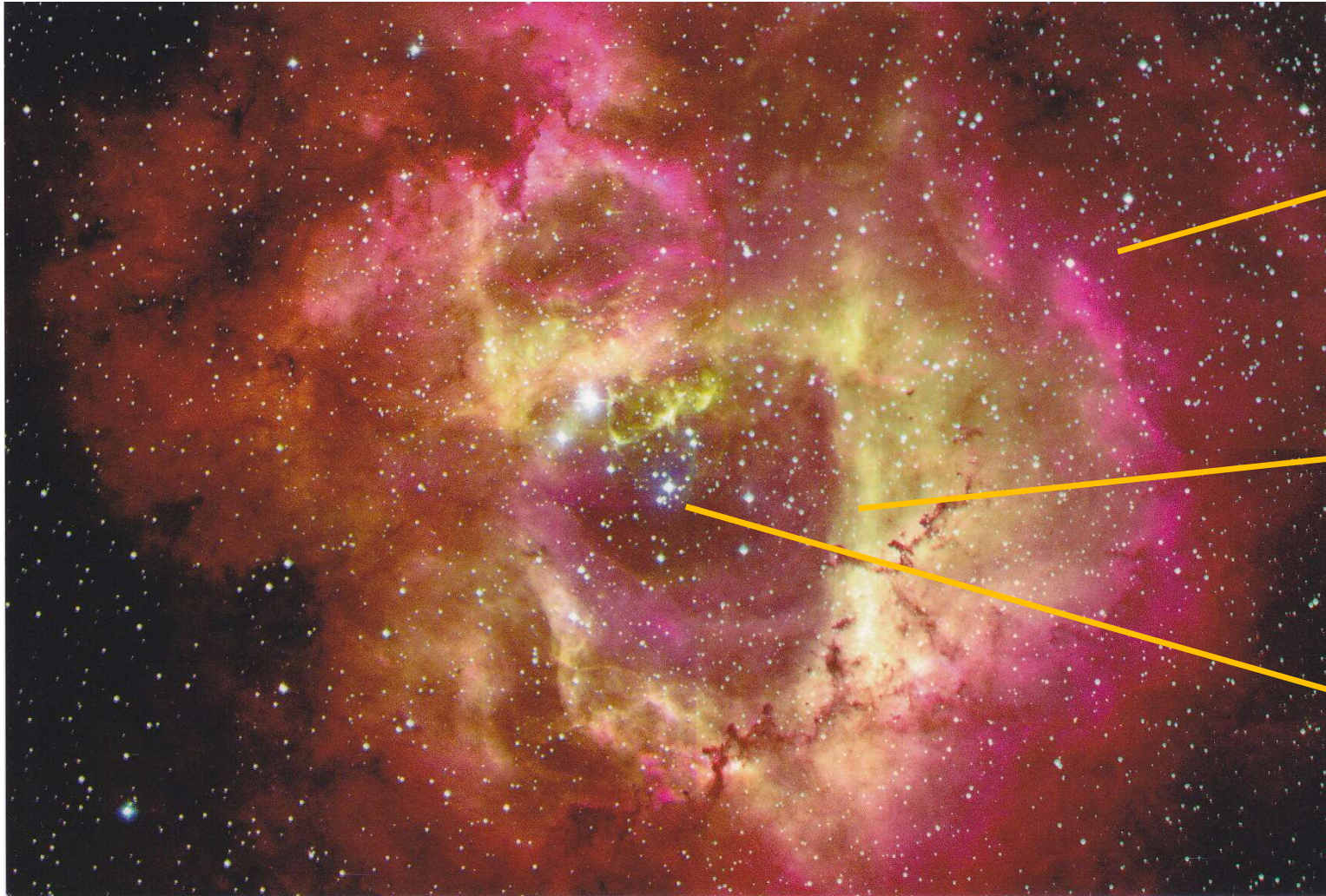


図1. 上右) M81のBVH $\alpha$ 画像, 下左右) M81のHII領域の銀河中心からの距離と輝線比

⇒M81のHII領域の[OIII]/H $\beta$ は中心からの距離に依存しない



電離ガスに着目したカラー画像を用いることで、天文学を中心とした原子構造やイオンを学ぶ科目横断的な教材を作成できる。→ 例えば, 2kCCDから...



赤い領域は相対的に水素イオンが多い。

黄色い領域は相対的に酸素イオンが多い。

電離源である散開星団。

図2. ばら星雲の $H\beta + [OIII] + H\alpha$  画像(連続光は未除去)



## 2. KWFC用狭帯域フィルター

銀河に付随するHII領域の内部運動 $V_{inn}$ , 銀河の回転運動 $V_{rot}$ , 銀河の後退速度 $V_{rad}$ を以下の図1のように設定 (Smith & Weedman 1970, ApJ, 161, 33; 1972, ApJ, 172, 307; Rubin et al. 1985, ApJ, 289, 81; Sofue & Rubin 2001, ARA&A, 39, 137; de Vaucouleur et al. 1991, RC3; Tully 1988)し, 輝線は $H\alpha$ + $[NII]$ ,  $H\beta$ ,  $[OIII]$ ,  $[SII]$ を想定した。

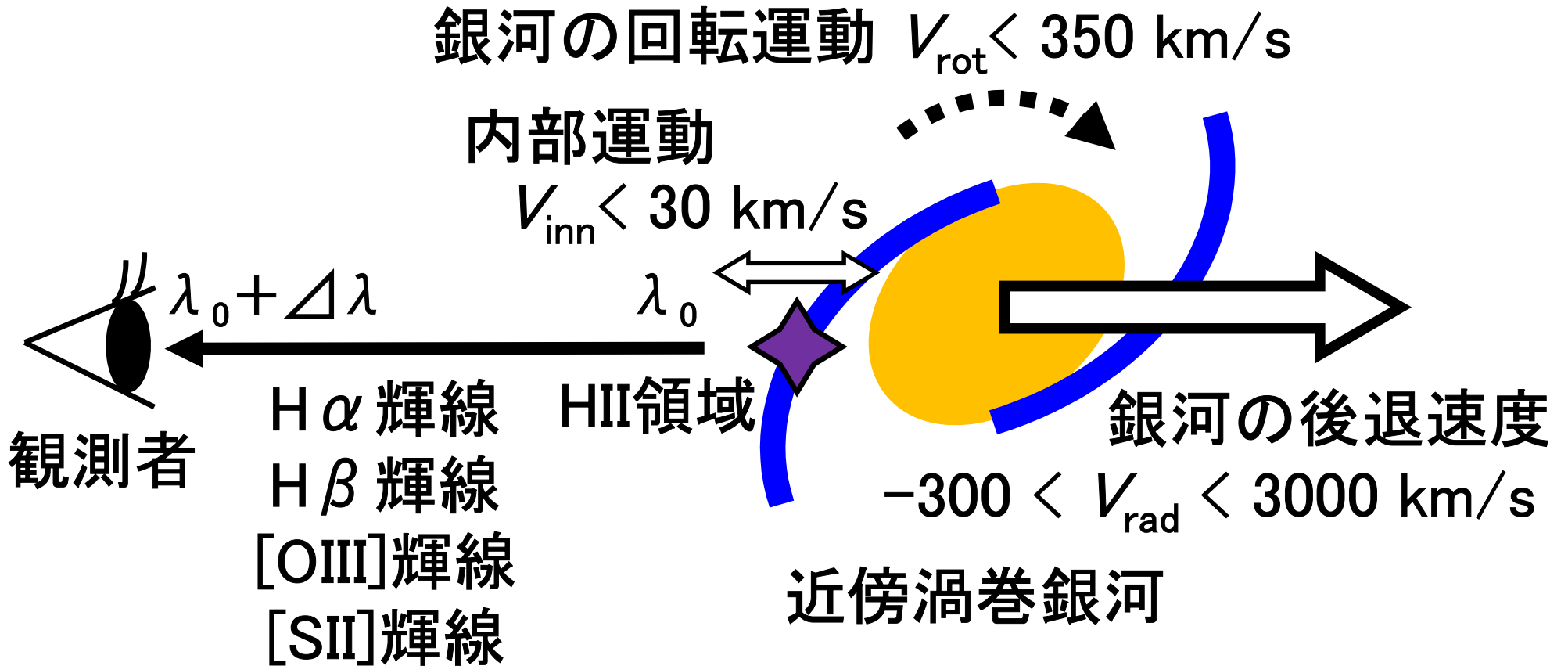
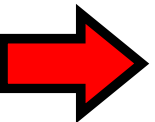


図3. 近傍銀河に付随したHII領域から放射される輝線の概念図



前述したようなHII領域から放射される各輝線に対応した帯域を設定・作成した。

H $\beta$  $\lambda$ 4861 → N4873 フィルター  
 [OIII] $\lambda\lambda$ 4959,5007 → N5013 フィルター  
 H $\alpha$  $\lambda$ 6563 + [NII] $\lambda\lambda$ 6548,6583 → N6590 フィルター  
 [SII] $\lambda\lambda$ 6716,6731 → N6750 フィルター

表1. KWFC用の各狭帯域フィルターの仕様

フィルター	中心波長 (nm)	ピーク波長 (nm)	バンド幅 (nm)	帯域 (nm)	最大 透過率 (%)	対応輝線
N4873	487.3	487.9	10.9	481.8-492.7	96.2	H $\beta$ $\lambda$ 4861
N5013	501.3	501.1	16.8	492.9-509.7	91.6	[OIII] $\lambda\lambda$ 4959,5007
N6590	659.9	658.5	16.3	651.8-668.1	94.0	H $\alpha$ $\lambda$ 6563 +[NII] $\lambda\lambda$ 6548,6583
N6750	675.0	675.1	13.9	668.1-682.0	93.3	[SII] $\lambda\lambda$ 6716,6731

注) 本稿でいう「帯域」とは、透過率が最大値の50%以上となる波長帯を意味する。

注) F3の透過曲線は平行光に対して得られたものに、単純な波長シフトを施して得た。

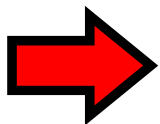


表2. N4873 (H $\beta$ ) の透過曲線@F3

N 4 8 7 3			
波長 (nm)	透過率 (%)	波長 (nm)	透過率 (%)
474	0.00	491	0.93
476	0.01	492	0.72
478	0.03	493	0.42
479	0.06	494	0.21
480	0.12	495	0.10
481	0.27	496	0.05
482	0.54	497	0.03
483	0.83	499	0.01
484	0.97	501	0.00
485	0.99		
486	0.99		
487	1.00		
488	1.00		
489	1.00		
490	0.99		

表3. N5013 ([OIII]) の透過曲線@F3

6

N 5 0 1 3			
波長 (nm)	透過率 (%)	波長 (nm)	透過率 (%)
483	0.00	502	1.00
485	0.01	503	0.99
488	0.03	504	0.99
489	0.06	505	0.99
491	0.18	506	0.99
492	0.32	507	0.95
493	0.53	508	0.83
494	0.74	509	0.63
495	0.91	510	0.43
496	0.98	511	0.26
497	0.99	512	0.16
498	0.99	513	0.09
499	0.99	515	0.04
500	1.00	519	0.01
501	1.00	522	0.00

注) 透過率は表1の「最大透過率」で規格化してある。

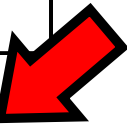


表4. N6590 (H $\alpha$ +[NII]) の透過曲線@F3

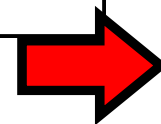
N 6 5 9 0			
波長 (nm)	透過率 (%)	波長 (nm)	透過率 (%)
640	0.00	661	1.00
643	0.01	662	1.00
646	0.03	663	1.00
647	0.05	664	0.99
649	0.14	665	0.95
651	0.37	666	0.86
652	0.54	667	0.70
653	0.73	668	0.52
654	0.87	670	0.22
655	0.95	671	0.13
656	0.99	673	0.05
657	1.00	674	0.03
658	1.00	678	0.01
659	1.00	680	0.00
660	1.00		

表5. N6750 ([SII]) の透過曲線@F3

7

N 6 7 5 0			
波長 (nm)	透過率 (%)	波長 (nm)	透過率 (%)
657	0.00	677	1.00
659	0.01	678	0.99
662	0.03	679	0.99
664	0.06	680	0.99
666	0.18	681	0.99
667	0.32	682	0.95
668	0.53	683	0.83
669	0.74	685	0.63
670	0.91	687	0.43
671	0.98	689	0.26
672	0.99	691	0.16
673	0.99	693	0.09
674	0.99		
675	1.00		
676	1.00		

注) 透過率は表1の「最大透過率」で規格化してある。



### 3. 光学系とCCD感度とフィルターの波長依存性

⑧

- ・狭帯域フィルターと木曾シュミット主鏡の反射率(黒破線)と補正板透過率(黒実線) (樽沢ほか, 1996, 木曾シュミット観測の新展開 集録), 測光標準フィルター(Bessell, 1990, PASP, 102, 1181, Doi et al. 2010, AJ, 139, 1628)。

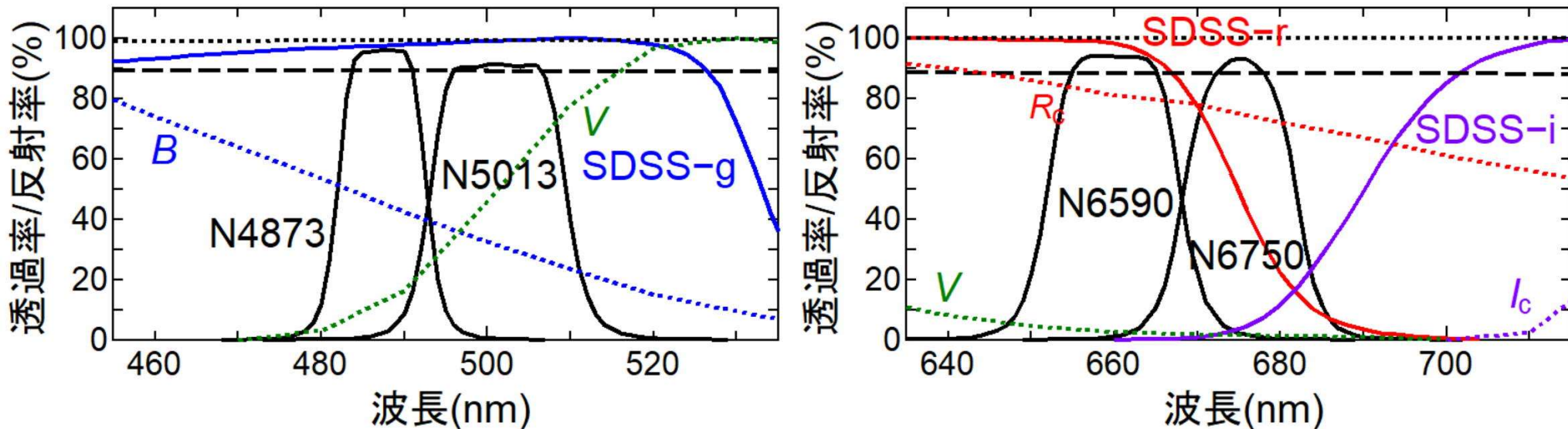
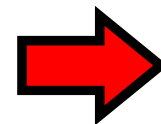


図4. KWFC用狭帯域フィルターの透過曲線と、木曾シュミット主鏡の反射率(黒破線), 補正板透過率(黒実線), 測光標準フィルターB, V, Rc, Ic, SDSS-g, r, iの透過曲線。





・狭帯域フィルターとKWFC (Kiso Wide Field Camera) 各CCDチップの感度の波長特性(諸隈 2013, 木曾シュミット・シンポジウム2013 集録)。

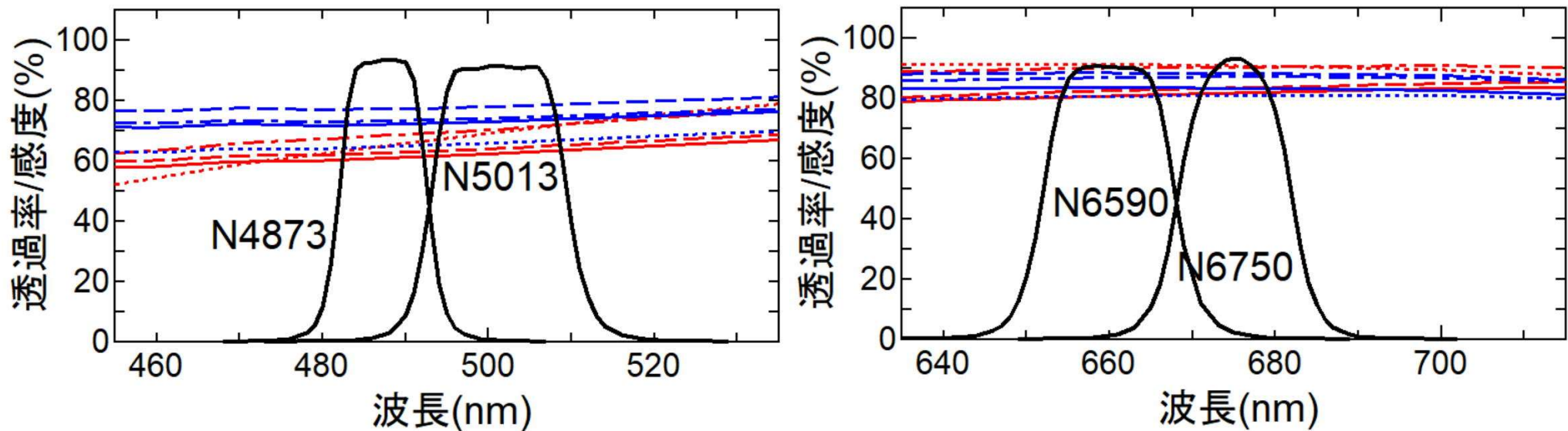


図5. KWFC用狭帯域フィルターの透過曲線と、KWFCの各CCDチップの感度の波長特性。  
赤実線は chip#0, 赤点線は chip#1, 赤破線は chip#2, 赤一点破線は chip#3, 青実線は chip#4, 青点線は chip#5, 青破線は chip#6, 青一点破線は chip#7。

狭帯域フィルターの帯域中において、光学系の反射率・透過率や CCD感度などの急激な変動は見られない。  
→ (結果) 安心して標準的な画像解析が行える。



# 4. 各CCDチップ上下の応答性の差異

**(目的)** 峰崎氏が指摘した, KWFC各チップの上下間に生じる線形性の差異(諸隈2013, 木曾シュミット・シンポジウム2013集録)の確認とこれに対応した画像解析方法を考察する。

**(観測)** 2014/03/26から2018/01/31の間の5晩で, 複数のフィルター(*B, V, Rc, SDSS-*i*, N4873, N5013, N6590, N6750*)によるドーム・フラット画像を, 様々な露光時間で取得した。

**(解析)** KWFC各chipを上(upper)部と下(lower)部に分け, それぞれからオーバー・スキャン領域(OSRs)によるレベル補正を施したバイアス画像を差し引いた。そして, 各CCDチップについてupper部とlower部の応答の平均値  $I_{upp}$ ,  $I_{low}$  を測定し,  $I_{low}$  に対する  $I_{upp} / I_{low}$  をプロットすることで, 照度に対するその線形性と画像解析方法の妥当性の確認を行った。

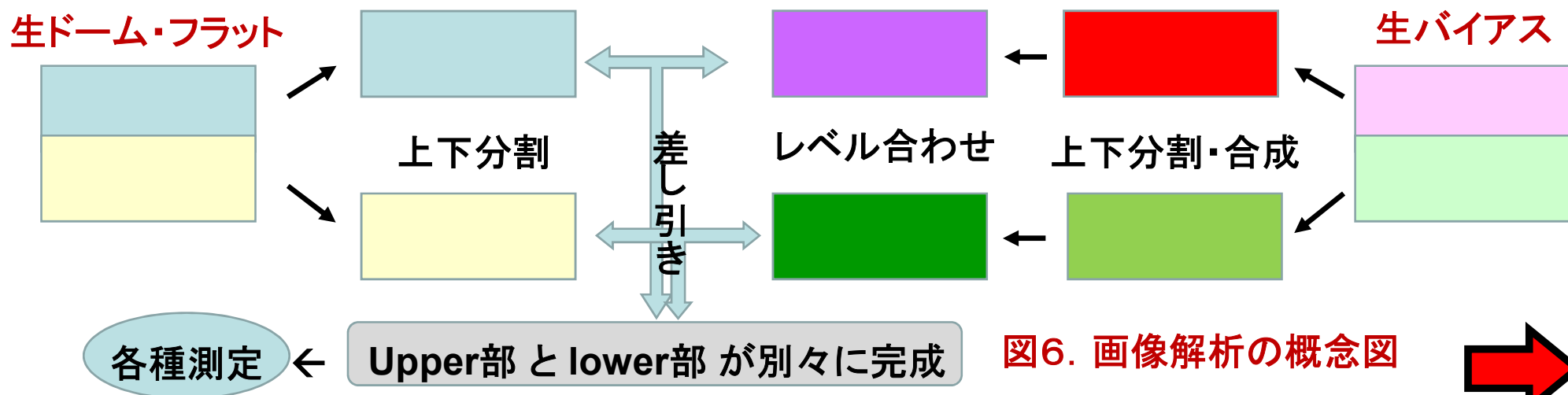
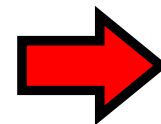


図6. 画像解析の概念図



## ・MIT製チップ#0-#3の照度に対する応答性

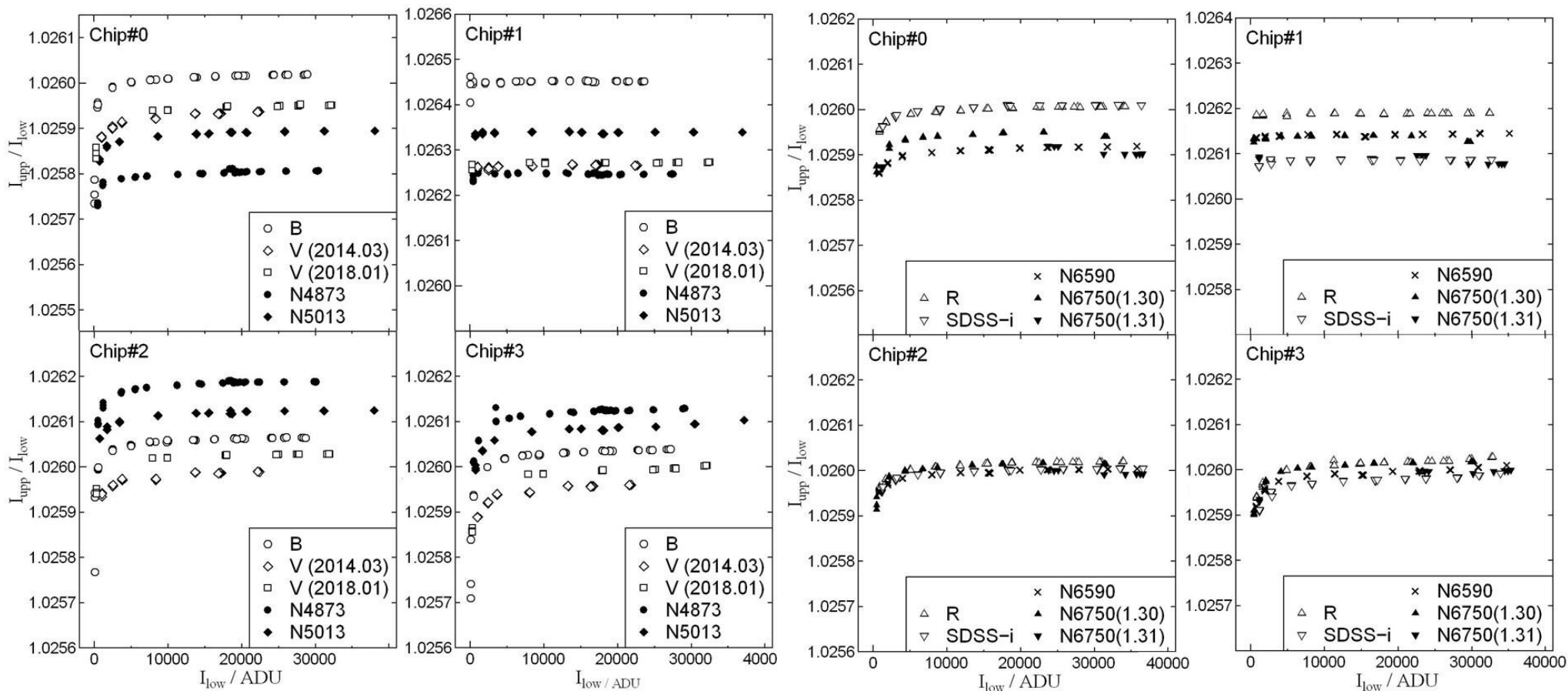
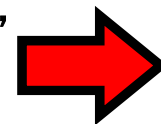


図7. MIT製チップの照度 $I_{low}$ に対する応答性の比 $I_{upp} / I_{low}$ 。右) B, V, N4873, N5013, 左) Rc, SDSS-i, N6590, N6750。

(結果1)  $I_{low}$  に対する  $I_{upp} / I_{low}$  の応答は、5000-10000 ADU までに急激に立ち上がり、その後、非常に緩やかな増加傾向を経て、ほぼ一定となる。この一定値は、チップやフィルターとは無関係に約2.5-2.7%である。



## ・SITE製チップ#4-#7の照度に対する応答性

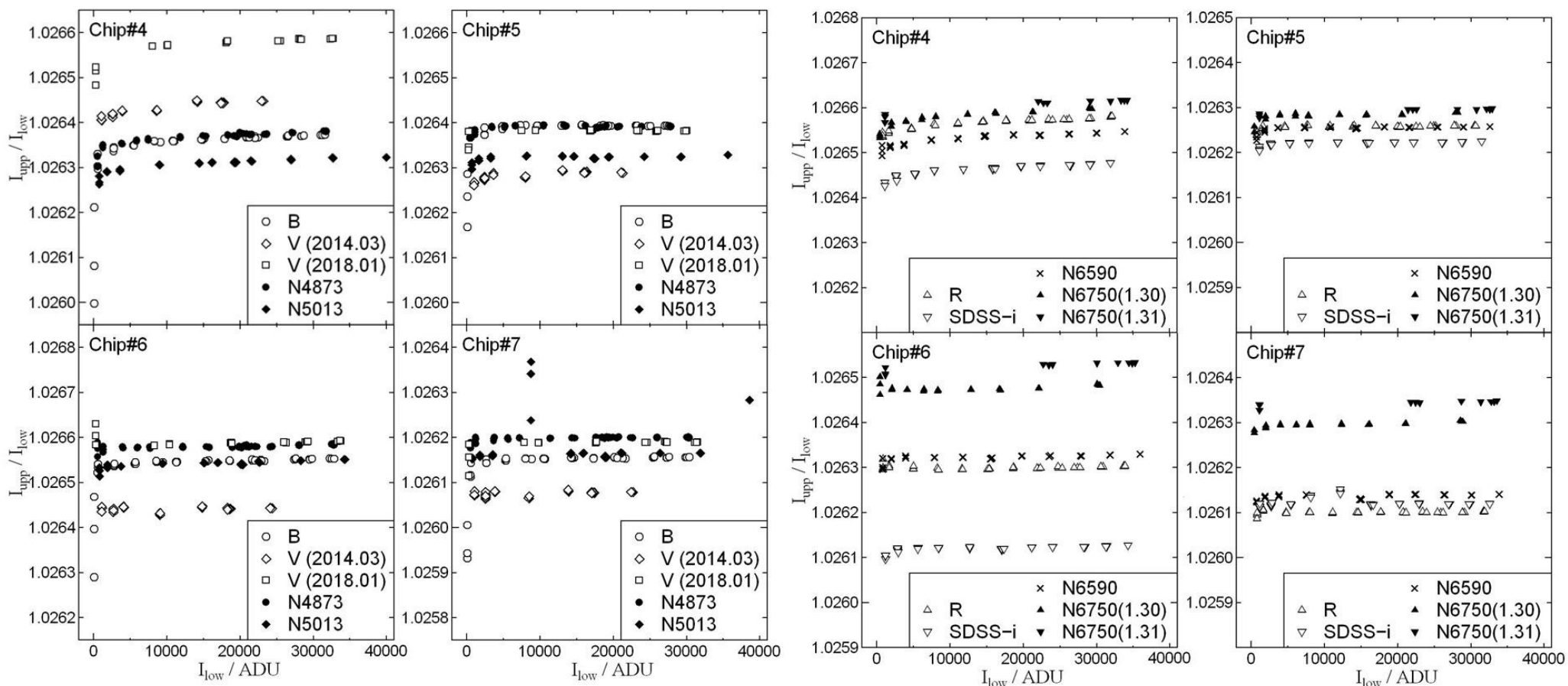


図8. SITE製チップの照度 $I_{\text{low}}$ に対する応答性の比 $I_{\text{upp}} / I_{\text{low}}$ 。右) B, V, N4873, N5013, 左) R, SDSS-i, N6590, N6750。

(結果2) KWFCの広い照度範囲(500-35,000 ADU)で,  $I_{\text{upp}} / I_{\text{low}}$  のばらつき度合いは, チップやフィルターに関係なく, 0.1%以内である。

→ 最初に上下2分割してリダクションを行い, 背景光除去後に再合成がベター。



## 5. 等級較正の精度

(目的) 分光測光標準星は1視野に1つ程度しか無い。そこで、簡単な仮定の下に、観測視野内の複数の恒星の測光データを内挿することで、狭帯域フィルターによる等級の予想値を算出し、これを観測値と比較することで等級較正を行う。この等級較正方法の精度を概算する。

(観測) 2014/03/27, 2014/11/19, 2017/05/05, 2018/01/26に、分光測光標準星PG 0934+554, BD+28° 4211を各狭帯域フィルターを用いて、chip#0-#7で撮像観測した。

(カタログ・データ) SDSS-R12から、これら分光測光標準星領域の恒星のPSF測光値を収集し、それを単純に線形補間したものをその恒星のSEDと見做す。そして、各狭帯域フィルターと同じ半値幅を持つ矩形の感度特性を仮定し、これを透過する恒星のフラックスを算出する(図9参照)。

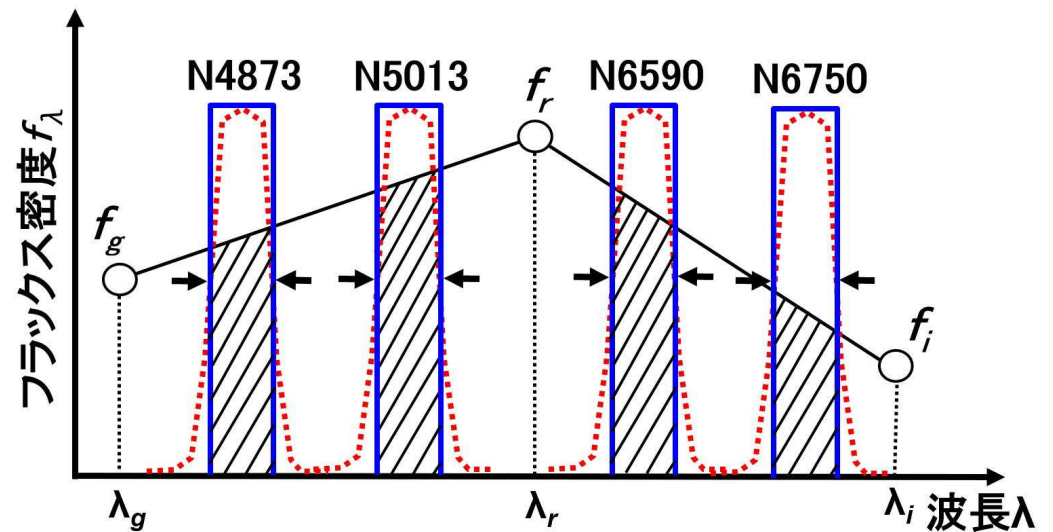


図9. SDSS- $g, r, i$ による恒星のSEDと、単純化した狭帯域フィルターの感度特性。斜線部分が狭帯域フィルターを透過するフラックスに相当する。

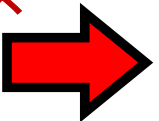


表6. 等級のゼロ点の差  $\Delta$ ZERO

chip	N4873	N5013	N6590	N6750
#0	-0.115	-0.007	-0.026	-0.058
#1	-0.142	-0.057	-0.029	-0.070
#2	-0.131	-0.020	-0.041	-0.058
#3	-0.102	+0.012	-0.025	-0.097
#4	-0.159	+0.019	-0.032	-0.082
#5	-0.155	-0.020	+0.003	-0.082
#6	-0.120	-0.006	-0.044	-0.019
#7	-0.145	-0.036	-0.039	-0.060

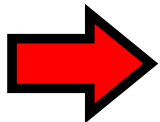
(データ解析) 「1つの分光測光標準星から求めた」等級のゼロ点ZERO(SP)と、「約10個の周辺の恒星のSDSSの測光値を用いて求めた」等級のゼロ点ZERO(PT)の差,

$\Delta$ ZERO = ZERO(SP) - ZERO(PT)  
をチップ毎に求める。

なお, ZERO(PT) 導出に伴うランダム誤差は, 0.06-0.07等であった。

(結果3) 一見, ZERO(PT)が大きい傾向があるが, ZERO(PT)のランダム誤差を考慮すると, N5013, N6590, N6750 の  $\Delta$ ZEROはほぼゼロと見做して, つまり, ZERO(SP)とZERO(PT)の値はほぼ同じと考えて良い。ただし, N4873では, この誤差範囲を超えて, ZERO(PT)が大きくなる傾向があるようだ(原因は不明)。

→ N5013, N6590, N6750 については, 本稿の方法による等級較正方法が有効と考えられる。N4873画像については, 今後, さらなる分析を考えたい(2kCCDでも同じか? 他の分光測光標準星でも同じか?, など)。



## 6. 限界輝度の測定

(目的・観測) 限界輝度を測定するため, 2013/05/14 (N6590, 計32分), 2014/03/27 (N5013, 計60分), 2018/01/26 (N6750, 計約20分), 2018/01/27 (N4873, 計70分) に近傍渦巻銀河M101領域の狭帯域撮像観測を行った。

(分析) 限界輝度を反映する量として, IRAF/imstat で各CCDチップの背景ゆらぎの $1\sigma$ に相当する輝度を測定した。結果は表7にまとめた。

表7. 各狭帯域撮像の限界輝度 (mag/□")

chip	N4873	N5013	N6590	N6750
#0	24.71 ± 0.08	25.70 ± 0.01	24.96 ± 0.06	23.66 ± 0.07
#1	24.66 ± 0.03	25.72 ± 0.06	25.04 ± 0.05	23.72 ± 0.04
#2	24.67 ± 0.08	25.45 ± 0.02	24.91 ± 0.06	23.56 ± 0.04
#3	24.59 ± 0.02	25.41 ± 0.06	24.86 ± 0.02	23.59 ± 0.02
#4	24.34 ± 0.01	24.99 ± 0.02	24.39 ± 0.05	23.06 ± 0.02
#5	24.32 ± 0.01	25.02 ± 0.05	24.53 ± 0.05	23.26 ± 0.06
#6	24.64 ± 0.16	25.05 ± 0.02	24.31 ± 0.02	23.19 ± 0.03
#7	24.31 ± 0.01	25.00 ± 0.01	23.99 ± 0.03	23.15 ± 0.02

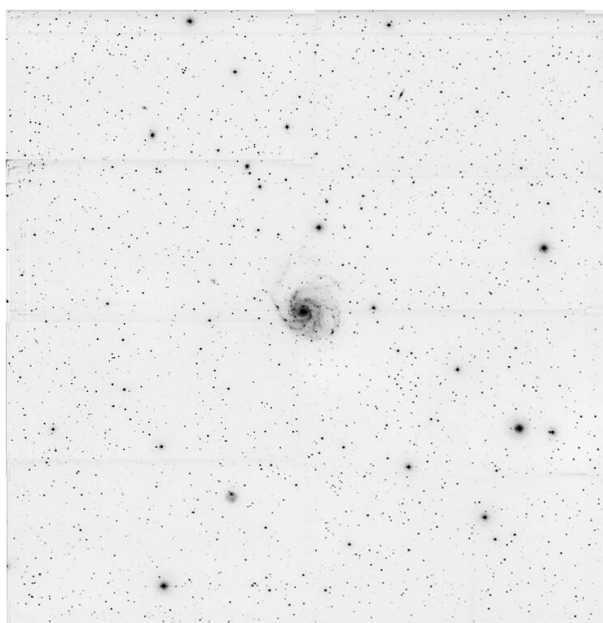


図10. M101領域のN4873画像。  
視野は2度×2度, 上が北。

本研究は学術振興会による科学研究費補助金(2465046, 16K12750:代表者西浦慎悟)の支援を受けました, 心から感謝申し上げます。