

MASTA和WFST大视场望远镜的窄带 光学成像观测分析*

徐 霄^{1,2} 娄 铮^{1,2} 平一鼎^{1,2} 董云芬^{1,2,3} 郑宪忠^{1,2,4†}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

(3 中科院南京天文仪器有限公司 南京 210042)

(4 上海交通大学李政道研究所 上海 201210)

摘要 在小焦比的光学系统中,窄带滤光片的光学性能会受到望远镜的光学系统以及光线入射角的显著影响.从视场中心至视场边缘,入射角的偏转逐渐增大,导致窄带滤光片出现中心波长蓝移,带通增宽以及最大透过率衰减.针对WFST (Wide Field Survey Telescope)与MASTA (Multi-Application Survey Telescope Array)望远镜开展窄带巡天观测的需求,定量分析不同窄带滤光片中心波长和带通随视场半径的变化.WFST的焦比 $F/2.49$,轴外最大入射角为 13.27° .在最大偏转处,中心波长分别为395 nm与656 nm的窄带滤光片的最大中心波长蓝移0.78%,10 nm和1 nm带通将分别增加2.67%和41.80%.最大透过率衰减系数分别为80.00%与74.50%.MASTA望远镜焦比为 $F/1.74$,轴外最大入射角为 18.48° .在最大偏转处,中心波长分别为395 nm与656 nm的窄带滤光片的中心波长将蓝移2.70%,其10 nm与1 nm带通的展宽将分别达到4.20%和81.70%,最大透过率衰减系数分别为80.00%与63.90%.未来基于WFST和MASTA开展发射线或吸收线的窄带观测,需系统考虑中心波长蓝移和带通变宽的影响.

关键词 望远镜, 仪器: 滤光片, 技术: 测光, 大视场巡天

中图分类号: P111; 文献标识码: A

1 引言

窄带巡天基于窄带滤光片,以特定发射线为目标,在天文研究中应用广泛.相较于光谱观测,窄带测光能高效地在宽视场内测量众多天体的目标发射线强度,从而高效地筛选特定发射线天体.同时,其滤光片对应的光学波段天光背景通常较低,有助于探测更暗弱的发射线信号.当前,全球多台配备宽场相机的望远镜使光学窄带巡天具备

了强大的观测能力.

对于银河系内与近邻星系的观测,窄带观测可以研究发射线星云,包括电离氢区的空间分布、行星状星云、Herbig-Haro (H-H)天体、超新星遗迹等.通过研究这些发射线星云可以获得恒星形成与演化的丰富信息.例如,电离氢区可以良好示踪恒星形成区域,电离气体常拥有高强度的 $H\alpha$ 线,故对该发射线的光度测量是探测星系局部以及整体恒星形成的主要手段之一.行星状

2024-10-08收到原稿, 2025-06-23收到修改稿

*国家重点研发计划(2023YFA1608100), 国家自然科学基金项目(12233005、12073078)资助

† xzzheng@sjtu.edu.cn

星云常通过强[OIII]双线与 $H\alpha$ 线探测,通过该方法认证的MASH (The Macquarie/AAO/Strasbourg $H\alpha$ Planetary Nebula Catalogue)目录为后续研究提供了大量样本^[1]. H-H天体可通过结合[SII]线与 $H\alpha$ 线进行认证,示踪了年轻恒星附近的外流,其存在表明了活跃的恒星形成活动^[2-4]. 超新星遗迹可以反映其前身星的性质. 由于超新星爆发时标很短,仅通过对超新星爆发的观测很难完整地考察各类恒星演化末期的特点,超新星遗迹可以帮助完善对恒星演化的理解,超新星遗迹还可以帮助对其可能存在的中心致密天体的物理性质进行限制^[5-6].

窄带观测可以高效地搜寻认证中高红移的发射线星系. 基于足够大的发射线星系样本,可以获得发射线光度函数等有价值的星系参数.

星系的光度函数常用Schechter函数^[7]进行拟合,该函数给出了指定光度间隔之内的星系数目分布. 光度函数可以给出星系样本的许多信息,如星系所处的环境是星系团还是一般场,星系样本中不同类型星系的分布等,在望远镜分辨率有限,难以分辨星系形态时可以对星系类型进行限制^[8-11]. 将光度函数与星系的其他特征函数相联系可以获得更多结果,例如将其与恒星质量函数比较,可以考察给定的红移范围内恒星质量与恒星形成率的关系^[12-13]. 不同发射线在尘埃吸收强度、产生机制等多方面存在差异,通过比较这些差异可以获得比单一发射线更丰富的信息,例如通过比较 $Ly\alpha$ 与 $H\alpha$ 光度函数的差异来分析星系的尘埃结构以及形态特征分布等^[14-15]. 星系的各项参数会随着红移而演化,比较同一类发射线星系在不同红移处的光度函数,可以获得星系星族特征随着宇宙演化的变化规律^[16-18].

许多特征发射线在高红移星系的研究中十分重要,其中 $Ly\alpha$ 发射线非常具有代表性. $Ly\alpha$ 发射线是强度最高的发射线. 自从Partridge与Peebles^[19]首先指出 $Ly\alpha$ 发射线在高红移星系研究中的重要性,很多针对该发射线的观测研究陆续开展^[20-22]. 早期的发射线观测研究限于当时的望远镜条件,对发射线的观测受制于有限的口径和较小的视场,因而只能获取较小区域、有限样本的观测结果.

这一局限也成为后续发展大口径、宽视场望远镜的重要原因之一. 近几年,大口径宽视场望远镜的建成,显著拓展了发射线研究的深度和广度. 大口径保证了对微弱信号的高灵敏度探测,而宽视场则使得对大尺度结构和大样本的系统性观测成为可能,对发射线的研究得以深入. 在红移(z) 2~3的宇宙正午时期天体的 $Ly\alpha$ 发射线红移至可见光波段,可以使用光学窄带滤光片对发射源进行观测.

在该时期,大质量星系和宇宙结构快速形成,同时宇宙整体的恒星形成和活动星系核活动达到顶峰,是研究与宇宙环境相关的星系演化的理想时期. 通过大量的发射线星系样本,可以揭示原星系团的大尺度结构,预测原星系团未来的演化趋势等^[23-26]. 同时,具有 $Ly\alpha$ 发射的延展结构,即 $Ly\alpha$ 团块($Ly\alpha$ blobs/nebula),可以良好示踪电离星系际介质,由他们的分布可以测绘星系团中星系际介质的结构特征,该结构特征可以示踪宇宙大尺度结构的演化^[27]. 对于再电离时期($z \sim 7$)的宇宙, $Ly\alpha$ 发射线也能够提供丰富的科学信息. 由于 $Ly\alpha$ 光子易被中性氢共振散射,该发射可以良好示踪再电离时期中性星系际介质的电离情况^[28].

与 $Ly\alpha$ 发射线类似, $H\alpha$ 发射线也可用于高红移星系的认证^[29],可以示踪星系的恒星形成率,例如HiZELS (The High- z Emission Line Survey)巡天^[30]给出了大量不同红移处发射线星系的 $H\alpha$ 光度函数与恒星形成率等参数.

结合新一代的宽场巡天望远镜的观测能力,系列窄带观测项目已经或计划开展,其中,部分针对河内及近邻星系天体的观测聚焦于恒星形成与演化、恒星形成区的空间解析分布、行星状星云、球状星团的星族性质等,例如S-PLUS (The Southern Photometric Local Universe Survey)^[31]、BNBIS (The Byurakan Narrow Band Imaging Survey)^[3-4]; 还有针对中高红移星系的观测计划聚焦于不同发射线的光度函数演化,不同环境下星系性质的差异,原星系团的结构及其与暗物质晕的关联性等,例如SILVERRUSH (Systematic Identification of LAEs for Visible Exploration and Reionization Research Using Subaru HSC)^[32]、

SFACT (The Star Formation Across Cosmic Time)^[33]、ODIN (The One-hundred-deg² DECam Imaging in Narrowbands)^[34]. 大视场巡天设备可以提供大量的观测数据, 例如拥有1.7°直径视场的HSC可每晚获得近1TB的观测数据. 新一代的巡天望远镜, 如LSST (The Large Synoptic Survey Telescope), Roman (The Nancy Grace Roman Space Telescope), 也包括紫金山天文台设计的墨子巡天望远镜(Wide Field Survey Telescope, WFST), 拥有更大的视场、更高的观测效率. 以WFST为例, 该望远镜口径2.5 m, 焦比 $F/2.49$, 直径视场达3°, 其正在开展的巡天中宽场观测计划可覆盖约8000 deg²的天区, 高频深场观测也可覆盖1000 deg²的天区, 6 yr的计划观测时间内可达到的极限星等比SDSS (Sloan Digital Sky Survey) 深约2等. 大视场的优势之一是可以更高效全面地监测时域信号, 例如活动星系核的光变, 黑洞潮汐撕裂恒星事件(tidal disruption event, TDE), 超新星爆发等现象; 优势之二是可以对大尺度的结构与物质分布进行深度观测, 经过叠加之后的大视场观测数据可以更好地开展宇宙学研究, 例如引力透镜、星系团的形成等^[35-37].

由于发射线的贡献, 强发射线目标在窄带观

测下的测得通量明显高于宽带观测, 这意味着高红移发射线星系能被窄带观测发现. 然而, 在大多数情况下, 此类滤光片的带通比发射线的典型线宽更宽, 并且滤光片的透过率在带通范围内变化很大, 这导致使用一个特定窄带滤光片的观测得出的红移和流量存在很大的不确定性^[38]. 为了解决这个问题, 可以根据不同窄带滤光片和几个匹配的宽带滤光片观测到的流量比来确定更准确的红移和流量估计.

特别是在大焦比的光学系统中, 窄带成像会受到望远镜的光学系统以及光线入射角的显著影响. 在本研究工作中, 我们以蓝端395 nm和r波段656 nm窄带为例子分析WFST和MASTA (Multi-Application Survey Telescope Array)两个大视场望远镜光学性能参数随视场角的变化, 为未来依托其开展的窄带观测提供定量分析结果.

2 窄带滤光片原理

表1列举了几个窄带常用的波段以及其对应的发射线与关联的观测目标, 窄带观测也常用于证认特定红移范围内的发射线星系, 如Ly α 发射线星系, 表格中也列出了几个波段对应的Ly α 红移值的大小.

表 1 常用的窄带波段以及其对应观测目标
Table 1 Commonly used narrowband filters with their corresponding observational targets

Wavelength/nm	Line	Target	$z(\text{Ly}\alpha)$
387	[OII]	Star-forming regions and galaxies	2.18
395	CaHK	Cool stars, such as M dwarfs and brown dwarfs	2.24
486.2	H β	Emission nebulae	3.00
495.9	[OIII]	Planetary nebulae and supernova remnants	3.08
500.7	[OIII]	Same purposes as 495.9	3.12
656.3	H α	Emission nebulae and stars	4.40

目前广泛使用的窄带滤光片基本都基于全电介质滤光片(All-dielectrics filter), 全电介质滤光片是一个多层的法布里-珀罗干涉仪, 每一层厚度为中心波长的1/4的整数倍^[39]. 该类型的窄带滤光片可以等效为2个界面的三明治结构^[40-41], 在等效

后的模型中, 透过率和带通等参数的计算更为方便.

对于全电介质滤光片, 最大透过率的波长满足

$$2\mu_* d \cos \theta_* = n\lambda, \quad (1)$$

其中 μ_* 是间隔层的折射率、 θ_* 为等效入射角、 d 是间隔层的厚度、 λ 是入射光的波长、 n 取正整数. 根据斯涅耳定律, 如果滤光片外部的折射率等于1, 则存在 $\sin \theta_* = \frac{\sin \theta}{\mu_*}$, θ 是入射光的入射角.

中心波长偏移量 $\Delta\lambda$ 与入射角 θ 的关系满足^[42]

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_0 \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\sin \theta}{n} \right)^2} - 1 \right] \simeq -\lambda_0 \frac{\sin^2 \theta}{2n^2} \simeq -\frac{\lambda_0 \theta^2}{2n^2}, \text{ 若 } \theta \ll 1, \quad (2)$$

其中 λ_0 指原中心波长.

实际的望远镜光学系统中, 入射至滤光片的光束并非固定角度的平行光, 而是以半角为 α (与系统焦比相关)的汇聚光束形式照射到焦平面. 因此, 焦平面上的每一点都汇集了不同入射角的光线. 需依据光学系统的成像光束特性进行分析. 假设滤光片置于会聚光路中, 且其表面法线方向 (或光轴)垂直于滤光片平面, 光束的半孔径角为 α . 在此条件下, 滤光片带通宽度随入射角的变化关系可由以下公式描述:

$$\frac{\Delta\lambda_\alpha}{\Delta\lambda_0} = (1 + X^{1/2}),$$

$$\text{其中 } X = F^{1/2} B \frac{\alpha^2}{2}, \quad (3)$$

$\Delta\lambda_\alpha$ 是入射光为会聚光束半角 α 的光时, 滤光片的实际带通, $\Delta\lambda_0$ 是入射光为理想平行光时滤光片的理想带通. B 与镀膜的具体参数有关, 参数 F 的详细计算方法见Lissberger等人的工作^[40-41].

当光束倾斜入射时, 其在膜层内的光程增加, 导致滤光片峰值透过率下降. 在实际光学系统中, 来自焦平面中心区域和边缘区域的光线, 其主光线相对于系统光轴的入射角亦不相同. 倾斜入射光在各膜层中的有效光程显著大于膜层的物理厚度, 且不同入射角对应不同的有效光程增量. 上述光程效应共同作用, 最终导致滤光片的中心波长发生蓝移, 并使其透射光谱 (透射率曲线) 发生展宽与形变 (失真).

上述关于带通变化的分析和公式适用于具有

特定入射角的平行 (准直) 光束. 然而, 在实际望远镜系统中, 焦平面上的每个像点均为其对应入射角范围内光线的积分结果, 图1展示了焦平面上每个像点的入射光角度范围. 值得注意的是, 视场中心与边缘像点对应的入射角范围分布存在细微差异, 且该范围覆盖了所有可能的入射角大小. 因此, 为获得可靠结果必须基于实际的入射角变化范围来计算滤光片光学性能 (如带通宽度、中心波长) 的变化. 进一步来说, 前述中心波长偏移计算式针对的是单一入射角情况, 对于实际汇聚光束中的像点 (涵盖入射角范围), 则需要对该变化关系进行积分, 方能获得该像点处滤光片的有效光学响应.

公式(3)计算的是窄带滤光片带通变化的系数, 对于焦面上确定位置的一点, 需要计算角度范围 $\theta_1 \sim \theta_2$ 内的积分均值. 参照公式

$$\Delta\lambda = \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} [1 + X(\theta)^{1/2}] \Delta\lambda_0 d\theta}{\Delta\theta}, \quad (4)$$

利用望远镜的光学系统参数, 可以计算出汇聚到焦面上像点的光线在滤光片上的入射角度范围, 其中既包括轴上像点, 也包括轴外 (即视场中央与边缘) 像点, 式中 $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$.

入射角的偏转会影响到滤光片的透过率, 带通宽度以及中心波长. 参考Lissberger等^[40-41]以及Zheng等^[42]的方法, 我们对不同入射角偏移大小情况下滤光片的光学参数做了模拟.

滤光片的中心波长随入射角 (Angle of Incidence, AOI) 增大发生蓝端偏移, 该偏移量仅取决于原中心波长与入射角大小, 独立于带通特性. 图2展示了不同中心波长滤光片的中心波长偏移量随入射角的变化规律.

图3对比了1 nm与10 nm带通滤光片在平行光入射角变化时的带通变化特征. 带通宽度对入射角变化的敏感性较低, 仅在入射角较大且原带通极窄 (~ 1 nm) 时存在可观测变化, 即入射角增大导致带通轻微展宽. 峰值透过率衰减量则与原中心波长及原带通相关, 波长越长、带通越窄, 衰减越显著.

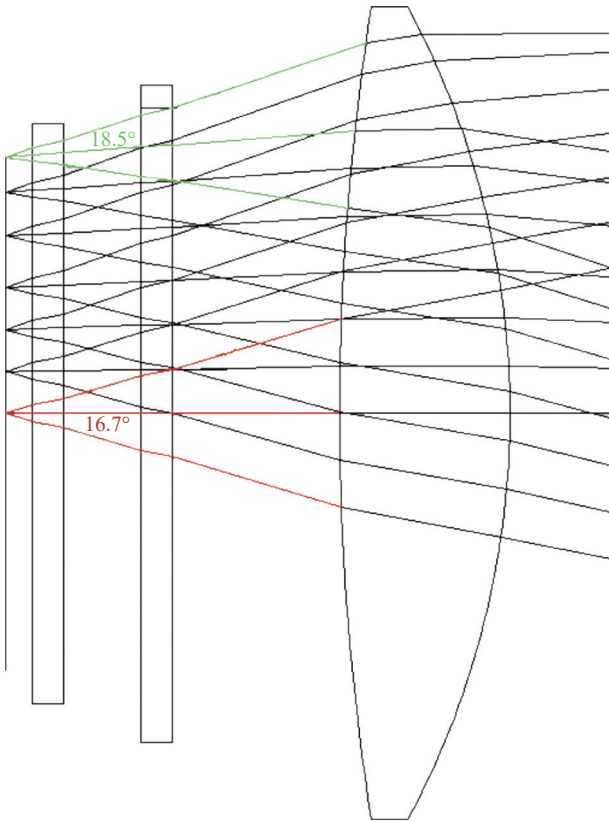


图 1 轴上与轴外入射光示意图, 红色与绿色分别表示轴上与轴外.

Fig. 1 Schematic of on-axis and off-axis incident light, red and green denoting on-axis and off-axis respectively.

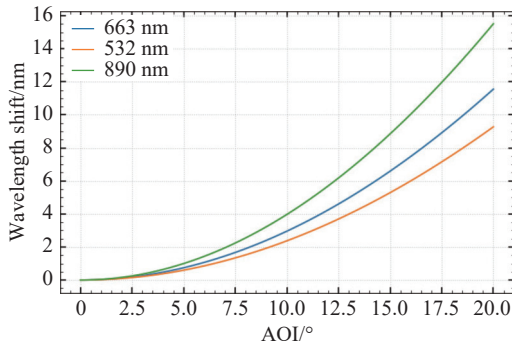


图 2 入射角与中心波长偏移的关系

Fig. 2 Angle of incidence v.s. central wavelength shift

3 WFST与MASTA的窄带分析

3.1 WFST窄带光学性能

WFST是针对大视场巡天科学设计建造的望

远镜, 望远镜的光路结构可见Lou等^[43], 表2列出了该望远镜主要的参数.

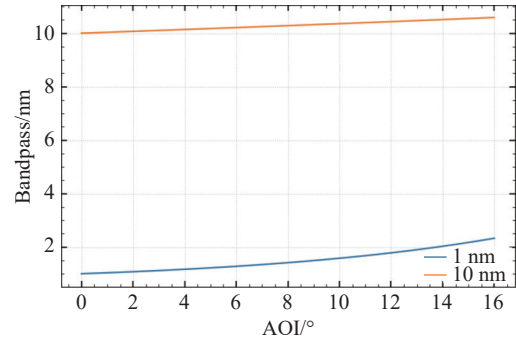


图 3 入射角与带通变化的关系

Fig. 3 Angle of incidence v.s. bandpass

表 2 WFST的主要参数

Table 2 Specifications for WFST

Item	Specification
Aperture	2.5 m
Field of View (FOV)	3°
Etendue	29.3 m ² · deg ²
Wavelength	320~960 nm
Image Quality	diameter ≤ 0.4"
Blinding Pointing	5"
Tracking	0.1" (One loop, 1 min)

WFST的主镜口径为2.5 m, 焦比为 $F/2.49$. 在其光学系统中, 视场边缘的入射角偏移最大可达 13.27° , 其影响不可忽略. 针对中心波长 (Central wavelength, CWL) 为395 nm与656 nm的两种情形, 分别采用带通为10 nm与1 nm的滤光片 (即395 nm/10 nm, 656 nm/1 nm). 从视场中心延伸至视场边缘, 在不同入射角的准直光条件下, 滤光片的模拟透过率变化如图4所示. 此处滤光片带通的定义为模拟透过率曲线的半高全宽 (Full width at half maximum, FWHM).

3.2 MASTA窄带光学性能

多用途巡天望远镜阵 (MASTA) 主要用于大批量中高轨空间碎片的搜索发现. 表3给出了该阵列

中单个望远镜的主要参数. 该望远镜口径710 mm, 焦距1238 mm, 焦比 $F/1.74$, 相较WFST, 视场边缘入射角的偏转更大, 视场边缘入射角偏移的最大值为 16.03° . 针对中心波长为395 nm与656 nm

nm的两种情形, 分别采用带通为10 nm与1 nm的滤光片(即395 nm/10 nm, 656 nm/1 nm). 从视场中心延伸至视场边缘, 在不同入射角的准直光条件下, 滤光片的模拟透过率变化如图5所示.

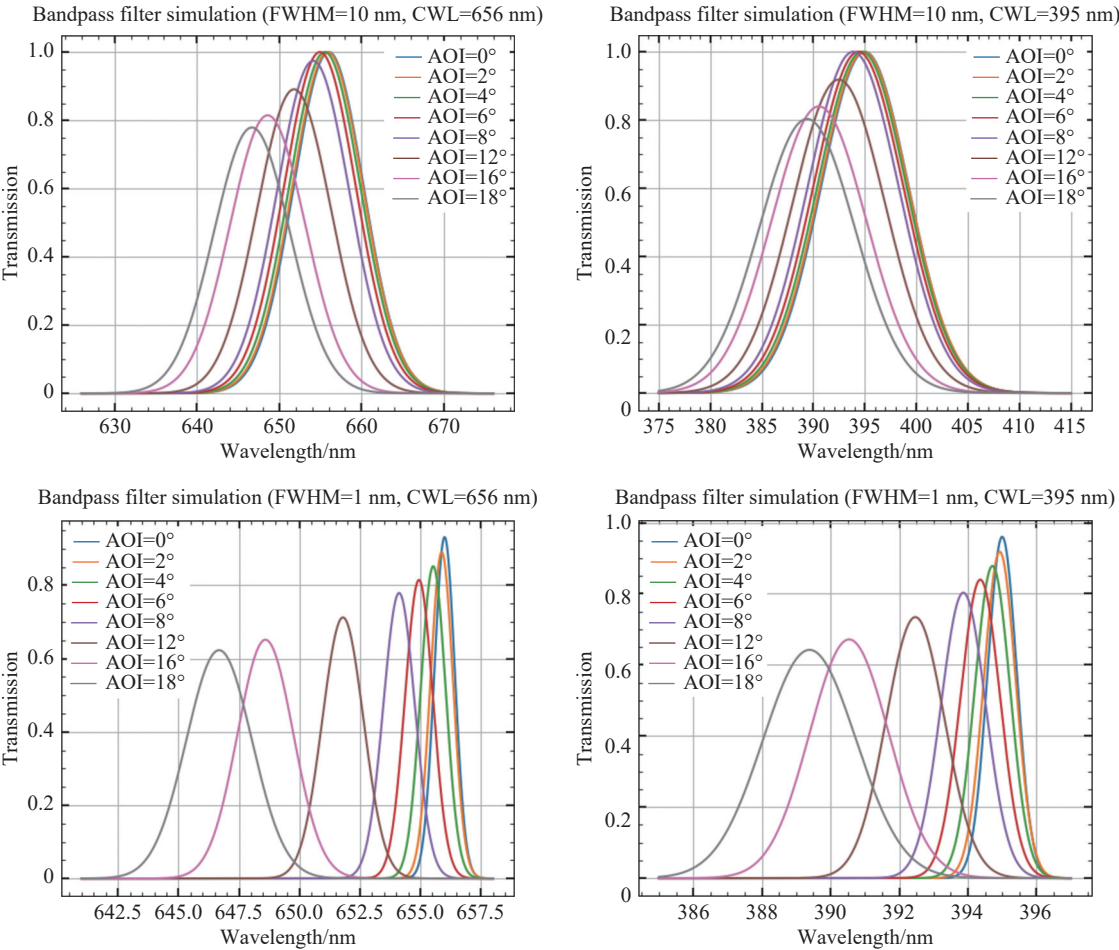


图 4 WFST滤光片模拟透过率变化示意图

Fig. 4 Simulated filter transmittance of WFST

表 3 MASTA的主要参数 Table 3 Specifications for MASTA	
Item	Specification
Optical Designs	Prime Focus
Aperture	710 mm
FOV	6°
Focal Length	1238 mm
Resolution of Detector	$8k \times 8k$
Maximum Quantum Efficiency	$>90\%$

对于两个光学系统, 轴上与轴外的汇聚光束的角度范围以及对应的带通变化系数如表4所示, 滤光片中心波长的蓝端偏移与入射光角度的关系如表5所示.

WFST的焦比 $F/2.49$, 轴外最大入射角为 13.27° . 在最大偏转处, 中心波长分别为395 nm与656 nm的窄带滤光片的最大中心波长蓝移0.78%. MASTA望远镜焦比为 $F/1.74$, 轴外最大入射角为 18.48° . 在最大偏转处, 中心波长分别为395 nm

与656 nm的窄带滤光片的中心波长将蓝移2.70%.

中心波长的相对蓝移仅与光学系统的焦比有关.

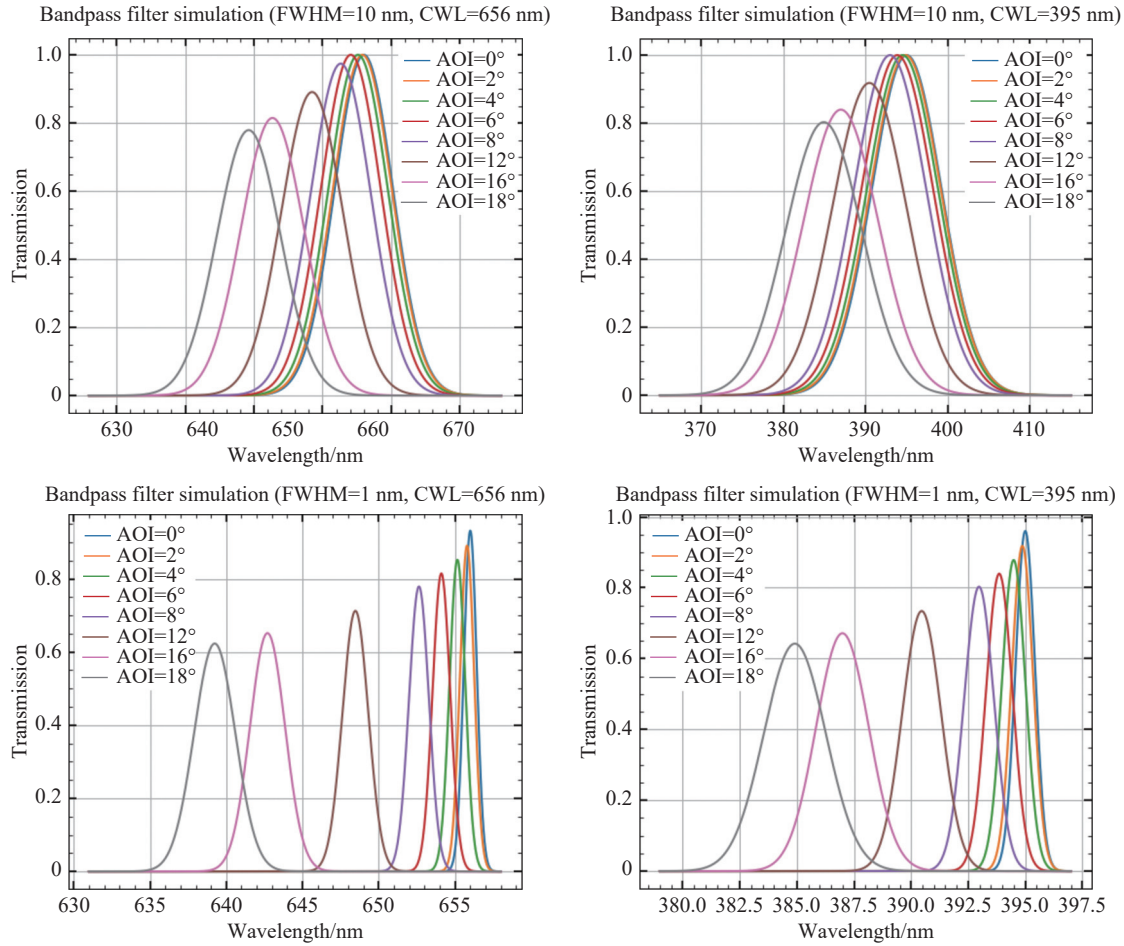


图 5 MASTA滤光片模拟透过率变化示意图

Fig. 5 Simulated filter transmittance of MASTA

由于轴上与轴外已经包括了所有可能的光线入射角情况, 故可以得到两个望远镜窄带滤光片带通变化的范围. 对于WFST, 原带通10 nm的滤光片, 变化之后带通不会大于2.67%; 原带通1 nm的滤光片, 变化之后带通不会大于41.80%. 对于MASTA, 原带通10 nm的滤光片, 变化之后带通不会大于4.17%; 原带通1 nm的滤光片, 带通变化不会大于81.70%.

3.3 窄带滤光片光学性能改变的影响

基于两个望远镜系统窄带滤光片的模拟计算, 可以估计观测证认高红移目标时红移值的偏离.

若以Ly α 发射线星系作为观测目标, 中心波长395 nm的滤光片原本证认的目标星系红移应在2.24左右. 在WFST中, 最大0.78%的波长蓝移会使目标红移偏移至2.22, 距离近了26.5 Mpc, 在MASTA中, 最大2.70%的波长蓝移会使目标红移偏移至2.16, 距离近了107.6 Mpc.

根据滤光片中心波长偏移量与光线入射角的解析关系, 其偏移量 $\Delta\lambda$ 严格取决于光学系统焦比及滤光片介质折射率 n_{eff} (二者直接决定最大半角 α_{max}). 因此, 与中心波长相关的观测目标红移偏移量 Δz 也完全由此类参数决定.

表 4 两个望远镜轴上与轴外的入射光角度差异及带通变化
Table 4 On-axis v.s. off-axis incidence angle differences and bandpass variation in telescopes

Telescope	Bandpass/ nm	Incident light position/°	Bandpass changed (%)
WFST	10	on-axis 0~11.89	2.10
		off-axis 1.78~13.27	2.67
	1	on-axis 0~11.89	31.10
		off-axis 1.78~13.27	41.80
MASTA	10	on-axis 0~16.66	2.98
		off-axis 4.57~18.48	4.17
	1	on-axis 0~16.66	53.00
		off-axis 4.57~18.48	81.70

表 5 中心波长的蓝端偏移与入射光角度的关系
Table 5 Relationship between blue-end shift of
central wavelength and incidence angle

Telescope	Central wavelength/nm	Max incident angle/°	Max wavelength shift (%)
WFST	656	13.27	0.78
	395		0.78
MASTA	656	18.48	2.70
	395		2.70

以红移 $z = 2.28$ 的 $\text{Ly}\alpha$ 发射源为例: 当采用中心波长 395 nm 窄带滤光片观测时, 该目标的理论探测波长 $\lambda_{\text{obs}} = \lambda_0(1+z) = 399.8 \text{ nm}$. 图 6 定量展示了红移测量值随入射角的变化. 可以看出, 对于焦比更小的望远镜, 观测红移值的偏移会更大.

若未经校正使用该窄带滤光片观测原始红移估计值 2.24 的目标天体, 由中心波长偏移、带通展宽与峰值透过率衰减构成的复合效应将显著扭曲观测结果. 图 7 展示了宽窄带滤光片的透过率曲线与模拟的发射线源的光谱能量分布(Spectral Energy Distribution, SED), 可以清楚地看出, 经历光谱特性漂移后的滤光片透射曲线已无法匹配发射线轮廓, 导致目标信号脱离有效通带覆盖范围.

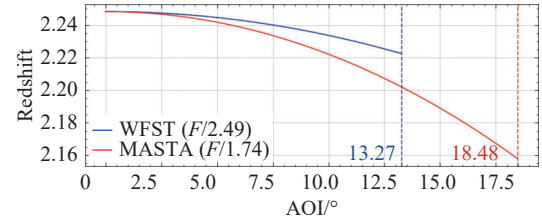


图 6 以中心波长 395 nm 的窄带滤光片观测目标为波长 1216 nm 的 $\text{Ly}\alpha$ 发射线时, WFST 与 MASTA 所获取的测量红移值与入射角的关系, 虚线标出了两个系统光线的最大入射角.

Fig. 6 When observing $\text{Ly}\alpha$ emission lines at 1216 nm with a narrowband filter centered at 395 nm, the correlation between measured redshift values and angle of incidence obtained by WFST and MASTA were plotted. The dashed lines indicate the maximum incidence angle within each optical system.

比较同一个目标宽带和窄带测光数据的差异是证认发射线天体的常用方法之一, 当窄带滤光片的透过率曲线偏移展宽之后, 窄带测光数据的值相对宽带测光数据的超出会显著减少, 这将降低测光观测的信噪比. 通过卷积模拟的滤光片透过率曲线与天体能谱, 可以得到宽窄带测光的相对流量大小, 如下所示:

$$L_{\text{relative}} = \frac{\int \Phi_{\text{filter}}(\lambda) * \Phi_{\text{target}}(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_{\text{filter}}(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

其中 Φ_{filter} 和 Φ_{target} 分别指滤光片的透过率曲线与发射线目标的光谱能量分布.

我们选取一个波长覆盖了 395 nm, 带通 150 nm 的宽带滤光片模拟数据, 将其与偏移前后的窄带测光结果进行比较. 结果表明, 安装在 MASTA 上带通 10 nm、波长 395 nm 滤光片的相对测光流量是 204.05, 透过率曲线偏移后的相对测光流量是 197.30, 而宽带的相对测光流量是 180.04. 可以看出, 窄带测光的结果受到了影响.

随着入射角增大, 滤光片的中心波长会发生蓝移, 同时峰值透过率下降, 这使得目标光谱与滤光片的标称响应失配, 有效信号强度减弱. 此外, 斜入射还会增加滤光片的反射损失和散射噪声, 进一步降低信噪比. 以 656 nm 的滤光片为例, 观测目标星等为 20, 结合 WFST 的望远镜及相机的参数, 我们计算了信噪比的变化, 该计算主要通过

DECam曝光时间计算器的模拟分析完成, 天光背景按照月相为新月估计. 当入射角从 0° 增至 18° 时, 滤光片的峰值透过率下降约20.0%, 对应信噪比降低约21.7%. 这一效应在宽视场测光中尤为显著,

需在观测规划和数据处理中引入角度依赖的修正因子, 以补偿信噪比的损失并确保数据质量的一致性. 表6展示了窄带观测信噪比随着入射角的增大的变化.

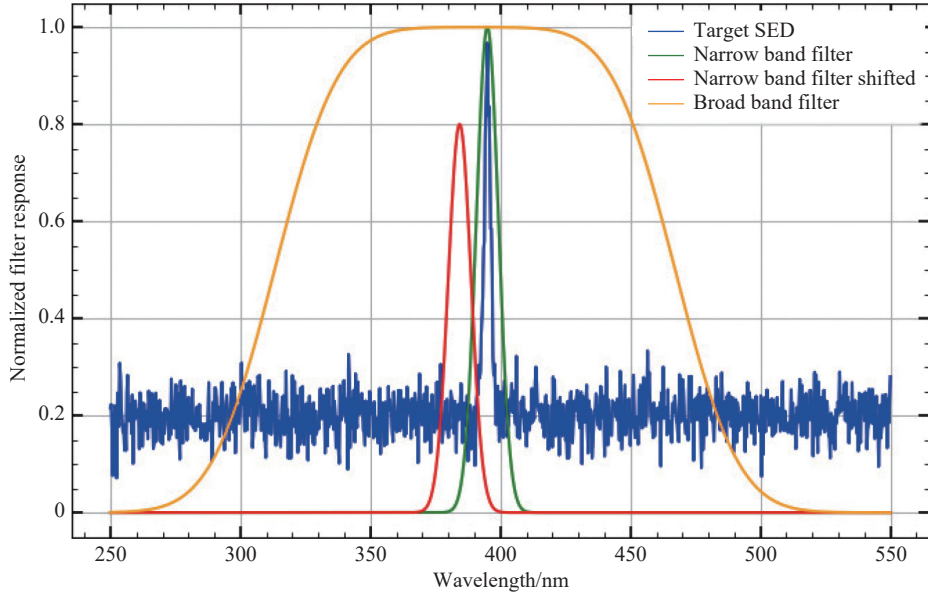


图 7 模拟透过率曲线与目标光谱能量分布

Fig. 7 Simulated transmission curve v.s. target spectral energy spectrum

表 6 窄带光度测量中入射角对信噪比的影响分析
Table 6 Analysis of incidence angle impact on signal-to-noise ratio in narrowband photometry

$\theta/^\circ$	SNR/dB	SNR retention (%)
0	16.6	100.00
2	16.4	98.80
4	15.9	95.78
8	15.3	92.17
12	14.4	86.75
16	13.8	83.13
18	13.0	78.31

Note: measurement conditions: wavelength (656 ± 10) nm, integration time 90 s.

结合信噪比的衰减以及测光流量的测量偏差, 参照证认发射线星系的一般过程, 我们估计了在

实际工作中, 可能误识别为假源的目标比例.

参照An等人的工作^[13], 使用以下标准筛选发射线星系源

$$\text{NB} - \text{BB} > \Sigma \sqrt{\sigma_{\text{NB}}^2 + \sigma_{\text{BB}}^2}, \\ \text{EW} > 50 \text{ \AA}. \quad (6)$$

公式(6)中, NB与BB分别代指窄带与宽带的测光星等值, σ_{NB} 与 σ_{BB} 分别为窄带与宽带观测下的背景天光噪声, Σ 取2至3, EW指根据流量差异得到的发射线等值宽度, EW的测量结果会受到样本选取标准的影响, 例如不同的颜色选择或窄带/宽带阈值设定, 都会导致所得到的EW分布存在差异, 该等值宽度筛选标准换算为星等差为 $(\text{BB} - \text{NB})_{\text{EW}=50 \text{ \AA}} = 0.77$.

基于该标准, 使用蒙特卡洛方法模拟了1000个发射线源的宽带与窄带测光数据, 分别计算在信噪比以及测光流量受到影响前后, 成功识别的

目标源数目占有源的比例。

在该判断标准中,受到影响的参数是窄带测光星等NB与背景天光噪声项 $\Sigma\sqrt{\sigma_{\text{NB}}^2 + \sigma_{\text{BB}}^2}$,我们绘制了参数变化前后筛选发射线源的颜色-星等图,即图8与图9,图中标出了证认的发射线源占总源的比例。

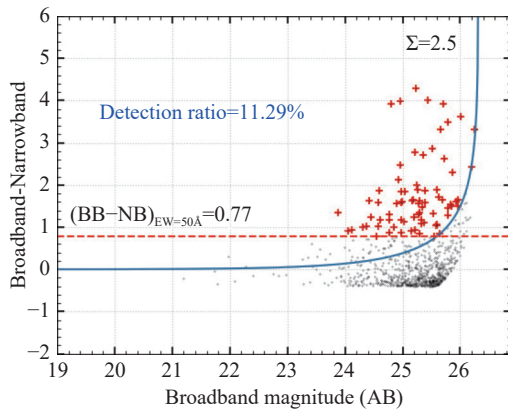


图 8 理想情况的窄带发射线源筛选的模拟

Fig. 8 Simulation of ideal case narrowband emission-line source selection for ideal cases

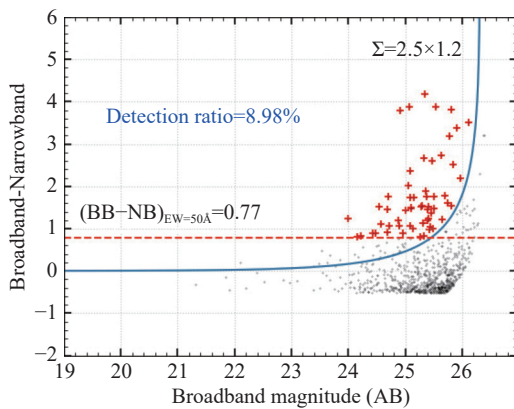


图 9 考虑测光误差时,窄带发射线源筛选的模拟

Fig. 9 Simulation of narrowband emission-line source selection accounting for photometric bias

由模拟结果可以看出,窄带滤光片易受光线入射角的变化影响这一特点,会导致信噪比和窄带测光星等的偏移,使得实际证认发射线星系时识别率下降,这会明显降低样本识别的准确率。

总体而言,上述中心波长蓝移与带通展宽效应将显著劣化发射线天体的观测质量。带通展宽

直接导致发射线天体红移测量的弥散度增大,显著削弱星系团成员认证的统计可靠性。同时,蓝移后的中心波长叠加展宽的带通,将引入更强的天光背景连续谱噪声,致使发射线星系样本存在系统性选择偏差。

4 总结

我们分析给出了WFST与MASTA两个望远镜光学系统,由视场中心至视场边缘,窄带滤光片透过率参数随光线入射角的变化。WFST的焦比 $F/2.49$,轴外最大入射角为 13.27° 。在最大偏转处,中心波长分别为395 nm与656 nm的窄带滤光片的最大中心波长蓝移0.78%,带通10 nm和1 nm将分别展宽2.67%和41.80%。最大透过率衰减分别为80.00%与74.50%。MASTA望远镜焦比为 $F/1.74$,轴外最大入射角为 18.48° 。在最大偏转处,中心波长分别为395 nm与656 nm的窄带滤光片的中心波长将蓝移2.70%,其10 nm与1 nm带通的展宽将分别达到4.20%和81.70%,最大透过率衰减系数分别为80.00%与63.90%。

根据计算的结果,WFST在使用10 nm窄带滤光片时,入射角的偏转对于滤光片光学性能的影响很小,只有在目标源中心波长较长时,中心波长的蓝端偏移才可能造成可感知的影响。MASTA由于焦比更小,相同条件下中心波长的偏移显著大于WFST,故在观测窄带目标源时,例如使用宽带窄带流量差异的方法证认发射线星系时,精度会受到更明显的影响。对于带通1 nm的窄带滤光片,透过率的衰减以及带通的展宽都会明显得多,极窄带滤光片使用时受到的影响更大。

在实际滤光片的生产安装过程中,可以通过镀膜设计来调整最终的透过率曲线,例如将设计的带通范围向红端适当偏移,即在设计之初将滤光片的目标中心波长变得更长,目标带通变得更窄,使实际的光学性能更贴近设计需求。

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议,使得文章的质量有了显著的提高。感谢ADS数据库的协助。感谢WFST团队提供的数据支持。

参考文献

- [1] Miszalski B, Parker Q A, Acker A, et al. *MNRAS*, 2008, 384: 525
- [2] Strom K M, Strom S E, Wolff S C, et al. *ApJS*, 1986, 62: 39
- [3] Movsessian T, Magakian T, Reipurth B, et al. *MNRAS*, 2024, 530: 2068
- [4] López R, Riera A, Estalella R, et al. *A&A*, 2021, 648: A57
- [5] González-Díaz R, Galbany L, Kangas T, et al. *A&A*, 2024, 684: A104
- [6] Suherli J, Safi-Harb S, Seitzzahl I R, et al. *MNRAS*, 2024, 527: 9263
- [7] Schechter P. *ApJ*, 1976, 203: 297
- [8] Binggeli B, Sandage A, Tammann G A. *ARA&A*, 1988, 26: 509
- [9] Binggeli B, Tarenghi M, Sandage A. *A&A*, 1990, 228: 42
- [10] Bremnes T, Binggeli B, Prugniel P. *A&AS*, 1998, 129: 313
- [11] Bremnes T, Binggeli B, Prugniel P. *A&AS*, 1999, 137: 337
- [12] Yan L, McCarthy P J, Freudling W, et al. *ApJ*, 1999, 519: L47
- [13] An F X, Zheng X Z, Wang W H, et al. *ApJ*, 2014, 784: 152
- [14] Song M, Finkelstein S L, Gebhardt K, et al. *ApJ*, 2014, 791: 3
- [15] An F X, Zheng X Z, Hao C N, et al. *ApJ*, 2017, 835: 116
- [16] Lilly S J, Tresse L, Hammer F, et al. *ApJ*, 1995, 455: 108
- [17] Blanc G A, Adams J J, Gebhardt K, et al. *ApJ*, 2011, 736: 31
- [18] Torralba-Torregrosa A, Gurung-López S, Arnalte-Mur P, et al. *A&A*, 2023, 680: A14
- [19] Partridge R B, Peebles P J E. *ApJ*, 1967, 147: 868
- [20] Hu E M, McMahon R G. *Nature*, 1996, 382: 231
- [21] Cowie L L, Hu E M. *AJ*, 1998, 115: 1319
- [22] Rhoads J E, Malhotra S, Dey A, et al. *ApJ*, 2000, 545: L85
- [23] Geach J E, Sobral D, Hickox R C, et al. *MNRAS*, 2012, 426: 679
- [24] Ouchi M, Ono Y, Shibuya T. *ARA&A*, 2020, 58: 617
- [25] Wen R, An F X, Zheng X Z, et al. *ApJ*, 2022, 933: 50
- [26] Harikane Y, Ono Y, Ouchi M, et al. *ApJS*, 2022, 259: 20
- [27] McCarthy P J, Spinrad H, Djorgovski S, et al. *ApJ*, 1987, 319: L39
- [28] Konno A, Ouchi M, Ono Y, et al. *ApJ*, 2014, 797: 16
- [29] Bunker A J, Warren S J, Hewett P C, et al. *MNRAS*, 1995, 273: 513
- [30] Sobral D, Smail I, Best P N, et al. *MNRAS*, 2013, 428: 1128
- [31] Mendes de Oliveira C, Ribeiro T, Schoenell W, et al. *MNRAS*, 2019, 489: 241
- [32] Shibuya T, Ouchi M, Konno A, et al. *PASJ*, 2018, 70: S14
- [33] Sieben J, Carr D J, Salzer J J, et al. *AJ*, 2023, 166: 101
- [34] Lee K S, Gawiser E, Park C, et al. *ApJ*, 2024, 962: 36
- [35] Wang T G, Liu G L, Cai Z Y, et al. *SCPMA*, 2023, 66: 109512
- [36] Liu Z Y, Lin Z Y, Yu J M, et al. *ApJ*, 2023, 947: 59
- [37] Lei L, Zhu Q F, Kong X, et al. *RAA*, 2023, 23: 035013
- [38] Zabl J, Freudling W, Møller P, et al. *A&A*, 2016, 590: A66
- [39] Battaini F, Ragazzoni R, Antonino P M, et al. *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation V*, 2022, 12188: 721
- [40] Lissberger P H. *JOSA*, 1959, 49: 121
- [41] Lissberger P H, Wilcock W L. *JOSA*, 1959, 49: 126
- [42] Zheng Z Y, James E R, Wang J X, et al. *PASP*, 2019, 131: 074502
- [43] Lou Z, Liang M, Yao D Z, et al. *SPIE*, 2016, 10154: 587

Performance of Narrow-band Imaging for MASTA and WFST

XU Xiao^{1,2} LOU Zheng^{1,2} PING Yi-ding^{1,2} DONG Yun-fen^{1,2,3} ZHENG Xian-zhong^{1,2,4}

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(2 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(3 CAS Nanjing Astronomical Instruments Co., LTD, Nanjing 210042)

(4 Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 201210)

ABSTRACT For wide field telescopes with small focal ratios, the performance of narrow-band filters is significantly affected by the deflection of the light incident angle. From the center to the edges of the field of view, the deflection of the incident angle gradually increases, resulting in a blue shift of the central wavelength of the narrow-band filter, a broadening of the bandpass, and an attenuation of the maximum transmittance. For planned imaging with WFST (Wide Field Survey Telescope) and MASTA (Multi-Application Survey Telescope Array), we analyze the changes in the central wavelength and bandpass of different narrowband filters with the radius of the field of view. The focal ratio of WFST is $F/2.49$, and the maximum off-axis incident angle is 13.27° . At the maximum deflection, the central wavelength of the narrowband filters at 395 nm (656 nm) is blue-shifted by 0.78%, and the broadening of the 10 nm and 1 nm bandpasses will reach 2.67% (41.80%), and the maximum transmittance attenuation is 80.00% (74.50%). The focal ratio of the MASTA telescope is $F/1.74$, and the maximum off-axis incident angle is 18.48° . At the maximum deflection, the central wavelength at 395 nm (656 nm) exhibits a blue shift of 2.70%, the broadening of the 10 nm (1 nm) bandpasses will reach 4.20% (81.70%), and the maximum transmittance attenuation coefficients will be 80.00% and 63.90%, respectively. In the future, narrow-band imaging observations with WFST and MASTA need to take into account the effects of central wavelength blue shift and bandpass broadening.

Key words telescopes, instrumentation: filter, techniques: photometers, wide-field imaging