

文章编号: 1000-8349(2008)01-0073-07



# 基于积分视场单元的三维天文成像光谱技术

王俊凡<sup>1,2</sup>, 朱永田<sup>1</sup>, 胡中文<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京 210042; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 近年来, 三维成像光谱技术主要是发展和采用积分视场单元方法, 即将视场内的展源目标连续切割成若干单元, 重新排列后进入光谱仪器, 同时获得展源的高分辨率三维数据立方体 ( $x$ ,  $y$  和  $\lambda$ )。相对于传统的技术方法, 这种基于积分视场单元的三维成像光谱技术进行一次观测可以同时获取天体各处的二维空间信息和光谱信息。采用积分视场单元虽然在光谱数据处理上会带来很多困难, 但由于其在观测时间和效率上具有明显的优点, 因此值得采用。该文简要介绍了三维成像光谱技术的原理; 评述了目前实现三维成像光谱的三种不同类型的技术系统: 小透镜阵系统、光纤加小透镜阵系统、像切分器系统, 重点介绍了像切分器系统的有关情况; 最后展望了三维成像光谱技术在天文学上的应用。

**关键词:** 三维成像光谱; 积分视场单元; 像切分器; 小透镜阵

**中图分类号:** P111.4      **文献标识码:** A

## 1 三维成像光谱技术概述

三维成像光谱技术可以实现展源的三维数据立方体 ( $x$ ,  $y$  和  $\lambda$ ) 采样, 获取天体的完整信息, 是当今天文观测手段研究关注的焦点之一。传统意义上的光谱多是通过狭缝在线视场上采样而获得的光谱像, 只有进入狭缝的天体才可能获得光谱, 在垂直于狭缝的方向无法直接获得天体信息。无论是单狭缝还是多狭缝光谱仪得到的都是观测目标的二维信息, 即空间一维加上波长一维 ( $x$ ,  $\lambda$ )。长缝光谱仪在观测时要通过多次曝光及分次扫描才能得到展源 (面源) 的三维信息, 需花费大量的观测时间, 且同一展源的光谱不是同时观测得到的。

为了获取在焦面上二维分布的两个方向的光谱, 同时又不降低光谱的空间分辨率, 首选的方法是采用基于积分视场单元 (Integral Field Unit, IFU) 的成像光谱技术。IFU 技术将二维视场内的展源目标连续切割成若干单元, 并在二维视场上采样重新排列后进入光谱仪, 通过单次曝光我们能够同时获得展源的三维信息 ( $x$ ,  $y$  和  $\lambda$ ), 其技术原理如图 1 所示。基于 IFU 的三

收稿日期: 2007-05-01; 修回日期: 2007-10-26

维成像光谱技术能够同时获取二维视场内所有空间分辨单元的光谱,避免了由于扫描过程中大气状况(透明度和视宁度)随时间变化对数据的影响,特别适合于延展天体的高空间分辨率光谱观测。观测中三维成像光谱技术没有像狭缝光谱仪那样的目标精确入缝的要求。在视宁度较差的情况下观测不可分辨天体时,三维成像光谱技术能起到像切分器的作用,这既保证了不降低光谱分辨率,又避免了窄狭缝的损光。显然,三维成像光谱比长缝光谱具有许多优点:(1)没有狭缝带来的光损失,系统具有高光效率;(2)可以同时测到和扣除展源各区域的光谱背景;(3)光谱分辨率不受大气状况限制。

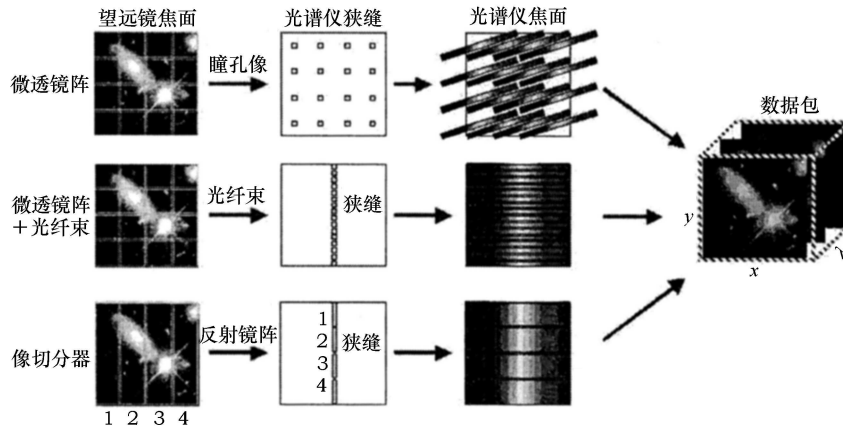


图1 基于视场积分单元的三维成像光谱技术原理<sup>[1]</sup>

三维成像光谱技术在天文学上的应用涉及很多领域。随着天文成像资料尤其是较高空间分辨率图像(如 Hubble Space Telescope)资料的不断积累,同时具有高空间分辨率和高空间覆盖率的光谱观测需求出现了。这种光谱观测对于研究星系中恒星形成和星族分布、星系运动学和动力学非常必要,而这些研究对探讨星系的形成与演化至关重要,属于当前天体物理学的热点和前沿。在利用 Tully-Fisher 关系来确定星系距离(中等红移)时需要二维速度场数据,三维成像光谱技术就很适合于这类观测。利用三维成像光谱技术对发射线光谱观测,还可以揭示射电星系、塞弗特星系等天体的一些特征结构。对于经引力透镜放大的遥远星系的三维成像光谱观测,可以得到其红移和星族成分信息。在近红外波段,三维成像光谱技术观测可用于探测活动星系的核区结构。甚至在类地行星(如火星)地质学领域,高空间分辨率三维成像光谱观测也大有用武之地。

基于上述三维成像光谱的技术优势与科学需求的驱动,20世纪末以来国际上相继研制出了多种不同类型的基于 IFU 的三维成像光谱仪器系统:如光纤系统、小透镜阵系统、光纤-小透镜阵系统、像切分器系统等,并发展出可供组合使用的 IFU。

## 2 基于 IFU 的三维成像光谱基本方法

IFU 将面源在望远镜焦平面上的像连续切割成若干单元,重新排列后成像于光谱仪器的入射狭缝或者配套使用的多目标光谱仪,通过光谱仪就能够同时获得展源的三维信息( $x$ ,  $y$  和  $\lambda$ )。IFU 有三种不同类型的实现方法:

1) 微透镜阵 (lenslet arrays) 方法。这种方法用一组小透镜阵将成像在望远镜焦面处的面源分割成若干单元, 也将望远镜的入瞳分割成非连续的单元像, 这些单元像又被光谱仪色散为相应的光谱 (见图 2)。采用这种技术的缺点是会出现光谱重叠。通过改变色散方向使其与小透镜阵的阵列方向有一夹角, 可以错开一部分光谱, 同时使用波段滤光片选择所观测的波段, 可以解决光谱重叠的问题。光谱不出现重叠的最大范围由单元像的尺寸和相邻单元像的间距比值决定。这种技术仅适合于低分辨率宽波段或高分辨率窄波段的观测, 例如星系个别吸收线的研究或从单根吸收线或发射线研究星系动力学。

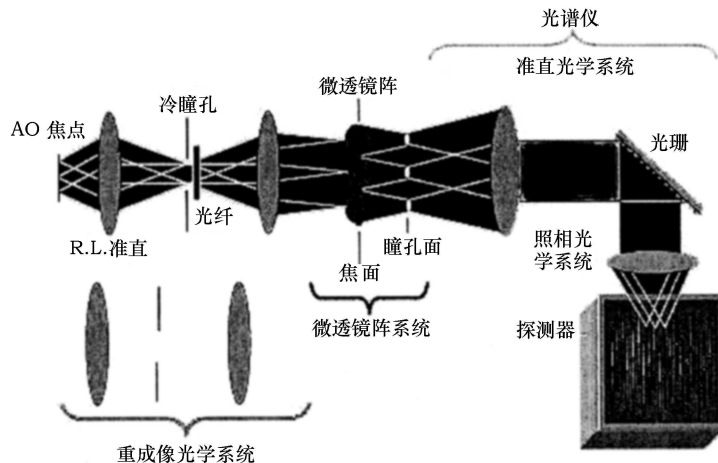


图 2 OSIRIS 的光学设计示意图 [2]

2) 微透镜阵加光纤束方法。利用一组微透镜阵把原视场分割成若干单元, 在每一个微透镜后面接一根光纤, 出射光纤依次排列在光谱仪的入缝处 (见图 3)。目前利用这种技术

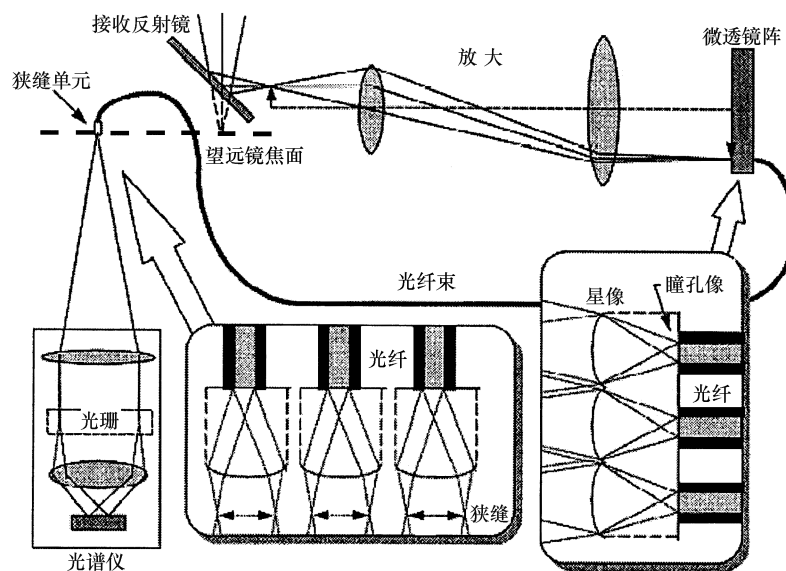


图 3 GMOS IFU 的基本原理 [5]

方法制作 IFU 的仪器有: SMIRFS-IFU [3]、TEIFU [4]、GMOS - IFU [5]。这种方法的一个简化是仅用裸光纤束直接对准展源的像,如 INTEGRAL [6],但这种简化方法不能充分收集来自望远镜的光能量,光效率低。

3) 像切分法。像切分法利用光学元件把原像场切分成窄而长的子像场,子像场重新成像后,依次排列在光谱仪的入缝处。像切分法可使光谱填满光谱仪的探测器,几乎利用了探测器的每一个像素,两维的空间方向采样和色散方向互不干涉。目前利用像切分法的仪器有 MPE-3D [7]、SPIFFI [8,9]、UIST [10]、NGST [11] 等像切分器。

### 3 像切分器

使用像切分器最初的目的是为了提高光谱分辨率,同时又能够避免由于缝宽不够大引起的光损失。在像切分器系统中,每一个切分片产生一个比原像场小的子像场,把所有子像场重组集中在一起就得到整个像源的光谱信息。

早期的像切分器设计方法是在 MPE-3D [7] 设计中首先提出的,其原理如图 4 所示。望远镜的光被接收反射镜接收,经过接收反射镜后降低了光束的焦比。降低了焦比的光束入射到切分反射镜上,切分反射镜由窄而长并有不同倾斜角的小平面反射镜构成。每一个切分反射镜的子像场以不同的方向反射到二级平面反射镜。二级反射镜组把这一系列成虚像的切分子像场反射到光谱仪的入射焦面上。当使用现有的光谱仪时,必须增加适当的光学系统,把这些成虚像的切分子像场重新成像于长缝光谱仪的入射狭缝或者多缝光谱仪的入射面板上。

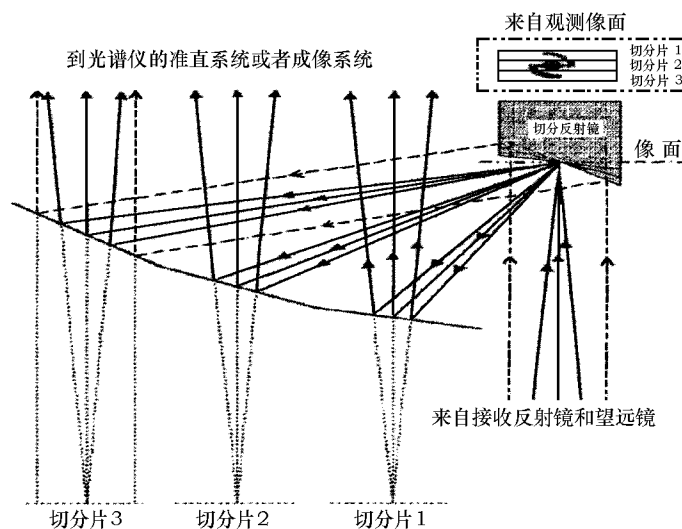


图 4 早期的像切分器设计原理 [12]

早期切分器的设计方法最大的缺点在于其光学系统的尺寸大,降低了焦比的光束不仅增加了二级反射镜组的尺寸,而且使得准直或者重成像光学系统所成的虚像更大。

改进的像切分器 (Advanced Image Slicer) [12,13] 的设计与早期的概念不同,为了使瞳孔实像产生在瞳孔反射镜上,它的切分反射镜 (S1) 是球面而不是平面。切分反射镜 S1 改成凹的,所以它产生的切分子像场是实像而不是虚像 (见图 5)。瞳孔反射镜 S2 也是凹的,所以能够把

切分子像场成像于光谱仪入射焦面处的反射镜 S3。在光谱仪的入射焦面, 这些切分子像场依次排列, 形成长缝, 从而使像场完成从二维到一维的重构。

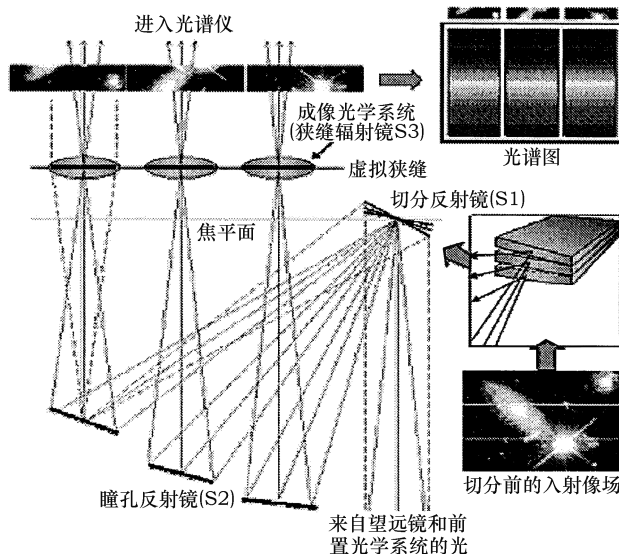


图 5 改进的像切分器的原理<sup>[13]</sup>

改进型像切分器有很大的实用性, 例如, 它可以很容易地使用多缝面板, 从而可以在光谱方向上同时得到几个出射光谱。用这种新的技术方法设计的 IFU 通常宽为 1 个狭缝长度, 长为 1~3 个狭缝长度, 而厚度通常是几厘米。因此, 如此小尺寸的 IFU 很容易安装进现有的光谱仪里, 成为未来光谱仪的一个组成部分。它的小尺寸也使 IFU 便于冷却到低温, 很适合红外光谱仪使用。

综上所述, 像切分器相比于其他方法有很多优点: (1) 像切分的方法大大提高了光谱在探测器上的分布密度, 提高了探测器的焦面阵列的利用率。这是其他三维成像光谱方法所不能比拟的。(2) 像切分器仅受狭缝可容纳的像素总数的限制, 从而有较大的视场。而微透镜阵加光纤束系统因为操作出射光纤束比较困难, 实际上视场大小受到空间可分辨单元的总数的限制。(3) 因为像切分器沿一个方向分割原像场, 仅在沿切片垂直的方向上产生较大的衍射效应, 所以像切分器由于子像场取样产生的衍射效应极小。(4) 通过适当的设计, 像切分器能减小光学系统的信号损失。微透镜阵和光纤通常会导致系统成像质量降低, 因为它们常常产生焦比衰减。另外, 微透镜阵和光纤系统还会增大天空和望远镜的背景热辐射, 不利于在红外波段上应用。(5) 像切分器有较高的光效率, 特别是在红外波段。对于镀金膜的光学系统, 总传输率能够达到 90% 以上, 而且由于它是全反射式系统, 可覆盖较大的光谱范围。镀上特殊的反射膜, 它的应用也可以拓展到紫外波段。(6) 由于它的传输率高、尺寸小、便于低温冷却, 特别适用于红外光谱仪。

表 1 是 VLT 前期建议建造的使用像切分器的各种 IFU 系统参数, 由此表格可以看出 IFU 能使用到各种不同分辨率和视场大小要求的场合。

在三维光谱技术中由于引入视场积分单元, 无疑会降低系统的通光效率, 像场的重组也带来了数据处理的复杂性。但相比于其他三维成像光谱技术, IFU 的优点是无可比拟的。

表 1 VLT 前期建议建造的使用像切分器的 IFU 系统的参数

仪 器	视场大小 / (")	采样尺寸 / (")
UIST-IFU	28	0.12 × 0.24
GNIRS-IFU	1.0 × 1.4	0.04 × 0.04
GNIRS-IFU	3.2 × 4.9	0.15 × 0.15
ESA-NGST-IFMOS	40 × 46	0.19 × 0.19
ESA-NGST-IFMOS	2.6 × 3.8	0.05 × 0.05
GIRMOS fields	3.0 × 3.0	0.10 × 0.10
MEIFUS	300 × 300	0.15 × 0.30

## 4 展 望

基于科学发展需求的驱动及三维成像光谱的技术优势,自 20 世纪末国际上相继研制出了多种不同类型的三维成像光谱技术系统如光纤系统、小透镜阵系统、光纤加小透镜阵系统、像切分器系统等等,并发展出可供组合使用的 IFU(IFU)。三维成像光谱技术得到欧美主要天文机构的重视,欧洲为此还专门成立一个学术组织 Euro3D。在 8~10 米级地面光学 / 红外望远镜第二代仪器计划中均配置了三维成像光谱仪,现有 2~4 米级中小望远镜也在仪器升级改造中增加三维成像光谱仪器。

国内天文学的发展也有相应的需求,如在北京 2.16m 光学望远镜和云南 2.4m 光学望远镜上配置三维成像光谱仪后就将会提高望远镜的性能,拓展天文学研究的科学目标,较大望远镜如 4m LAMOST、计划中的几十米大望远镜、空间望远镜等都可以配置 IFU 设备。

我国目前的光谱观测仪器和手段相当有限,只有经典的卡焦低分辨率光谱仪和折轴焦点阶梯光栅高分辨率光谱仪。发展新的三维成像光谱技术,既可装备现有的望远镜以拓展科学目标,最大限度发挥现有中小望远镜的作用,也为将来进一步开展天文光谱工作提供技术支持,看来这是应该提上议事日程了。

### 参考文献:

- [1] Content R, Allington-Smith J. SPIE, 2000, 4008: 1181
- [2] Larkin J, Quirrenbach A, Krabbe A, et al. SPIE, 2002, 4841: 1600
- [3] Haynes R, Lee D, Allington-Smith J, et al. PASP, 1999, 111: 1451
- [4] Murray G J, Allington-Smith J, Content R, et al. SPIE, 2000, 4008: 68
- [5] Allington-Smith J, Content R, Dodsworth G, et al. SPIE, 2000, 4008: 1172L
- [6] Weitzel L, Krabbe A, Kroker H, et al. A&AS, 1996, 119: 53
- [7] Tecza M, Thatte N, Eisenhauer F, et al. SPIE, 2000, 4008: 149
- [8] Eisenhauer F, Tecza M, Mengel S, et al. SPIE, 2000, 4008: 29
- [9] Wells M, Ramsay-Howat S K, Hastings P R. SPIE, 2000, 4008: 139
- [10] Content R, Allington-Smith J, Robertson D J, et al. SPIE, 2000, 4013: 99
- [11] Content R. SPIE, 1997, 2871: 1295
- [12] Deqing R, Hegwer S. SPIE, 2003, 4853: 551
- [13] Sharples R M, Bender R, Lehnert M, et al. SPIE, 2004, 5492: 1179

## Techniques for 3D Imaging Spectroscopy in Astronomy

WANG Jun-fan<sup>1,2</sup>, ZHU Yong-tian<sup>1</sup>, HU Zhong-wen<sup>1</sup>

(1. National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Science, Nanjing 210042, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** There are lots of techniques to obtain spectrum of extended celestial objects on a 2D field from which scientific advantages are obvious. Traditional techniques like scanning slit spectroscopy, multiple slit spectroscopy and Fabry-Perot spectroscopy could do it in rather limited cases. Much more observing time is necessary in order to obtain spatial resolution over two directions. Spectral coverage and resolution are both strictly limited. Nowadays the focus of 3D imaging spectroscopy has been on the integral field spectroscopy which samples the 2D field by an array of sub-apertures. The technique facilitates investigating extended objects with larger field size, good 2D spatial resolution and spectral resolution, but with less observing time although with some difficulties brought to data reduction.

This paper gives an overview of various developed integral field technologies. Three basic methods (lenslet array, combination of fibers and lenslet array, image slicing) are described, discussed and compared with each other. Image slicing is a unique technique that retains spatial resolution within each sub-aperture at current time. The types of image-slicers are treated in more detail. Finally, we give a brief view of the application and the development of the integral field unit based on imaging spectroscopy. Future possibilities of building IFU based 3D imaging spectrograph in China are considered as well.

**Key words:** three-dimensional imaging spectrograph; integral field unit; image slicer; lenslet array