

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2017.02.07

中国丽江积分视场光纤光谱仪分辨能力 实验室测试结果

李 欢^{1,2}, 郝 蕾¹

(1. 中国科学院 上海天文台 星系与宇宙学重点实验室, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 中国丽江积分视场光纤光谱仪 (China Lijiang Integral Field Unit, 简称 CHILI) 是中国第一台用于夜天文观测的科学级积分视场光纤光谱仪, 安装在丽江天文观测站 2.4 m 光学望远镜上。CHILI 运输到中国前, 在美国德克萨斯大学奥斯汀分校 (University of Texas at Austin) 进行了实验室测试。本次实验主要针对 CHILI 的蓝端, 主要测试内容有本底、平场、暗场和波长定标。为了明确知道谱线在像素位置上的精准波长和 CHILI 探测器的分辨能力, 对测试数据进行了波长定标和光谱分辨能力的计算。结果显示, CHILI 蓝端的波长范围约为 3 500~5 300 Å, 在此波长范围内, 光谱分辨本领 $FWHM \simeq 5 \text{ \AA}$, 其对应的光谱分辨率 $R = \lambda/\Delta\lambda$ 约为 600~1 000, 符合 CHILI 预期要求。

关 键 词: 积分视场光纤光谱仪; 波长定标; 光谱分辨率

中图分类号: P141.5 **文献标识码:** A

1 引 言

积分视场光纤光谱仪 (Integral Field Unit, 简称 IFU) 是用于天文观测的一种仪器, 可以同时获得观测对象的二维空间信息和光谱信息。对展源观测而言, 传统长缝光谱仪需要跟随长缝位置, 通过每次移动望远镜进行狭缝扫描和记录每个观测点相对应的曝光来完成观测, 不能实现对展源的一次曝光, 而 IFU 极大地提高了观测效率。积分视场光谱仪对于研究星系的运动、金属丰度、恒星形成等特征是一种强有力的工具, 可以为我们提供探索星系形成和演化的重要线索。

中国丽江 IFU (CHILI) 是中国第一台用于夜天文观测的积分视场光纤光谱仪, 它安装在目前我国口径最大的通用光学望远镜——丽江天文观测站 2.4 m 光学望远镜上。CHILI 是

收稿日期: 2016-08-17; 修回日期: 2017-01-17

资助项目: 国家自然科学基金 (11473305)

通讯作者: 郝蕾, haol@shao.ac.cn

中国科学院上海天文台与美国德克萨斯大学奥斯汀分校 (简称 UT Austin) 合作的项目。它的发展来自于国际合作项目 HETDEX (Hobby-Eberly Telescope Dark Energy Experiment)。HETDEX 项目将以红移为 $2 \leq z \leq 4$ 的 Lyman- α 发射线星系为示踪体, 研究遥远宇宙中高红移星系的性质和宇宙中的暗能量^[1]。HETDEX 将在 MacDonalD 天文台 10 m 级望远镜上安装 VIRUS 光谱仪 (Visible Integral Field Replicable Unit Spectrograph, 简称 VIRUS), VIRUS 由 75 个 IFU 光谱仪对组成, 每对将有 448 根光纤, 所以 VIRUS 每曝光一次将获得约 35 000 条光谱^[2]。

2006 年 HETDEX 组完成了一个实验 IFU 的建造, 称之为 Visible Integral Field Replicable Unit Spectrograph-Prototype (简称 VIRUS-P)^[1]。VIRUS-P 安装在 MacDonalD 天文台 2.7 m 望远镜上, 为 HETDEX 巡天提供仪器设备和科学方面的直接测试。VIRUS-P 的视场为 $1.7' \times 1.7'$, 是当时世界上视场最大的积分光谱仪^[3]。VENGA (The VIRUS-P Exploration of Nearby Galaxies) 是利用 VIRUS-P 完成的近邻星系的二维光谱观测, 主要针对 32 个近邻旋涡星系的盘进行恒星形成率、尘埃消光、电子密度、星族参数和动力学特征等二维光谱的研究。VACCINE 为 VENGA 的数据批处理软件, 基于 FORTRAN 程序开发而成。VACCINE 中的许多数据处理步骤与其他光谱仪数据批处理标准步骤是一样的, 但是 VACCINE 的基本要求是在时间上避免处理数据时需要在同一波长刻度的每根光纤光谱进行重新采样, 为此他们^[4] 采用了类似于 Kelson(2003) 为长缝光谱仪所发展的批处理方法, 这种方法在数据重组 (rebinning) 之前准确地扣除不必要的背景光谱^[5]。VACCINE 的主要数据处理流程大致分为扣除本底和平场、波长定标、扣除天光背景、数据并合等。

CHILI 基于 VIRUS 中一对 IFU 光谱仪设计, 并使 VIRUS 的光谱覆盖范围从 350~550 nm 增加至 350~720 nm, 以便 CHILI 可以进行近邻星系的研究。VIRUS 由 3 个主要的子系统组成: 光纤束、准直镜系统和相机^[2]。相机由 UT Austin 生产, 准直镜由 TAMU (Texas A&M University) 生产, IFUs 由 AIP (Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam) 生产, 最后光谱仪的整合、调整与鉴定由 UT Austin 主导完成^[2]。CHILI 的设计使用了 VIRUS 一个单元进行修改, 由两个独立的光谱仪组成, 这两个单独的光谱仪共同分享一束包含 494 根光纤的光纤束以及共同的准直镜外壳和低温恒温箱, CHILI 的结构和光路如图 1 所示。这样的设计优点首先体现在光纤束的重量和截面面积可以更加有效地增加一倍; 其次, 共同的低温恒温箱使得抽真空体积增大, 从而增加了真空状态的维持时间, 并节省了真空阀以及其他固定装置的成本^[2]。CHILI 光谱仪的前端设计采用了光纤与微透镜阵列相结合的手段, 填充因子可大于 96%。CHILI 每一根光纤在天空所占约 $3.2''$, 总视场为 $71'' \times 65''$ 。

开始阶段 IFU 仅在实验室使用, 1978 年, 第一条光纤光谱由 Hubbard 等人通过基特峰上的 Steward 36 英寸望远镜获得; 1979 年, Hill 等人成功实现了第一次多目标源光纤的观测^[6]。1980 年 Vanderriest 研制出了第一台多光纤光谱仪, 主要的科学目标为研究暗的延展源, 填充因子为 75%, 共有光纤 205 根, 其中 36 根光纤用来扣减天光背景^[7]。国内第一台 IFU 样机由中国科学院云南天文台张居甲等人研制, 并获得了初步的观测结果^[8]; 第二台 IFU 是由云南天文台屈中权研究员研制, 用于太阳偏振光谱研究^[9]。CHILI 是中国第一台用于夜天文观测的科学级 IFU, 与世界上其他具有大视场的积分视场光谱仪相比, 大视场

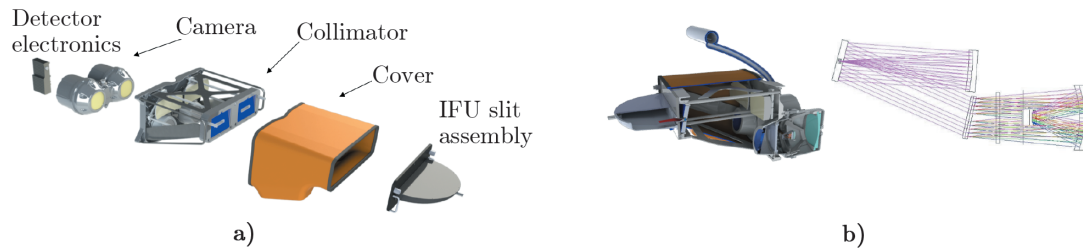


图 1 CHILI 的结构与光路

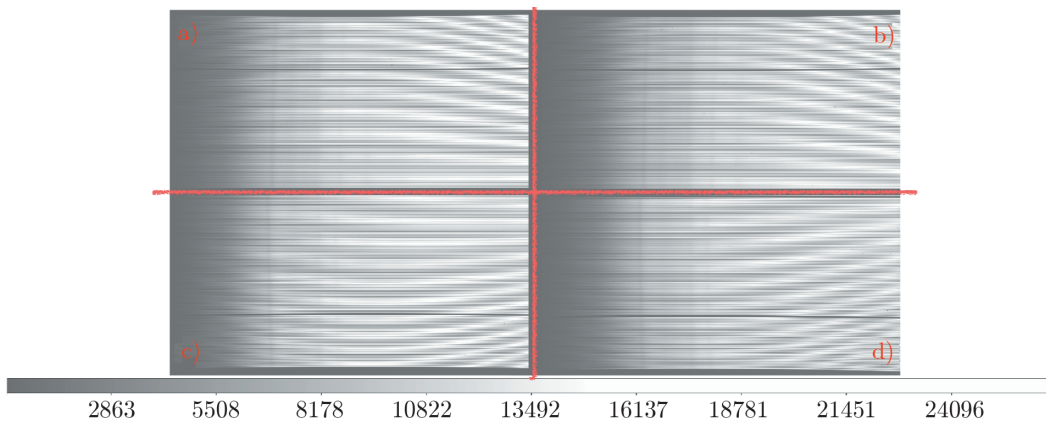
是 CHILI 最明显的优势。相比于覆盖因子同样达到 100% 的积分视场光纤光谱仪, 安装在 4.2 m 威廉赫歇尔望远镜上的 SAURON 具有 $33'' \times 41''$ 的视场^[10], 安装在澳大利亚国立大学 2.3 m 望远镜上的 WiFeS 仅具有 $38'' \times 25''$ 的视场^[11]; 而相比于覆盖因子没有达到 100% 的积分视场光谱仪, 安装在 Siding Spring 天文台 Anglo-Australian 4 m 望远镜上的 SAMI 具有 $14.9''$ 的视场^[12], SDSS-IV 项目 MaNGA 的最大视场范围是 $32''$ ^[13], 两者都比 CHILI 小; 安装在 Calar Alto 3.5 m 望远镜上的 CALIFA 具有 $74'' \times 64''$ 的视场, 虽然总视场和 CHILI 相当, 但是 CALIFA 的覆盖因子只有 60%, 因此对每一片天区需做 3 次抖动观测才能使所观测区域全部覆盖^[14]; VIRUS-P 的覆盖因子为 30%, 需要 3 次抖动才能覆盖整个观测源^[3], CHILI 的有效覆盖因子为 VIRUS-P 的 1.33 倍。因此, 大视场使 CHILI 在巡测近邻星系和观测星系外围的电离气体有明显优势, 同时, 大光纤直径使得 CHILI 在观测低表面亮度星系有很大优势。

CHILI 在 2015 年 11 月 6 号从 UT Austin 运往中国海关, 在此之前我们在 UT Austin 实验室内对 CHILI 进行了本底、平场、暗场和定标灯等测试, 测试期间实验室保持黑暗状态。我们用汞灯、镉灯和氖灯作为定标灯, 由于 CHILI 的最终光纤在测试时未完工, 因此本次实验数据均使用了 VIRUS 的测试光纤 448 根。本文第 2 章描述 CHILI 实验室测的数据采集及处理, 第 3 章将展示 CHILI 测试结果, 第 4 章是对 CHILI 测试的总结及将来投入使用的展望。

2 实验和数据分析

由于 CHILI 有两个 CCD, 并且每个 CCD 各有两个放大器, 因此其展现出来的数据呈现上下左右四部分, 数据上面部分(图 2 中的 a)、b 两部分)为右边 CCD 所采集, 数据下面(图 2 中的 c)、d 两部分)为左边 CCD 所采集, 图 2 展示了 CHILI 对平场进行测试的 CCD 原始数据图像。这些数据共包含 448 根光纤, 平均分布在这四部分, 每个部分各有 112 根光纤。整体图像大小为 $4\ 200 \times 2\ 100$ 像素, 其中有光子通过的图像大小为 $4\ 128 \times 2\ 062$ 像素。

CHILI 采集数据所用软件为 OWL[www.astro-cam.com/index.php]。图 3 展示了 OWL 采集数据的界面。首先, 我们对本底进行了零曝光 21 次, 对平场和暗场进行了时间从 0.5 s 到 60 s 不等的 12 次曝光测试; 其次, 我们分别对汞灯曝光了 3 s 和 5 s 各 3 次, 氖灯曝光了



注：数据格式为 fits 文件，图为通过 DS9 所显示的图像。数据分为四部分，a) 和 b) 是 CHILI 右边 CCD 观测得到，c) 和 d) 是 CHILI 左边 CCD 观测得到。

图 2 CHILI 实验室平场测试的原始 CCD 图像

20 s 和 40 s 各 3 次、镉灯曝光了 5 s 和 10 s 各 3 次；最后，我们对汞灯、镉灯和氖灯一起曝光了 3 s 和 5 s 各 3 次。由于氖灯是红端波段的定标灯，所以氖灯灯谱在此次测试的三种定标灯一起曝光较短时间的光谱中非常暗弱，可忽略不计。我们选用三种定标灯一起曝光 3 s 的光谱（由于氖灯太弱，此光谱相当于汞、镉两种定标灯灯谱）进行波长定标和光谱分辨能力的计算。因为数据分为四部分（如图 2 所示）并且每部分数据处理的方法相同，所以本文中仅对左下角 CCD 的原始数据的 112 条光纤光谱进行波长定标和光谱分辨能力的计算。

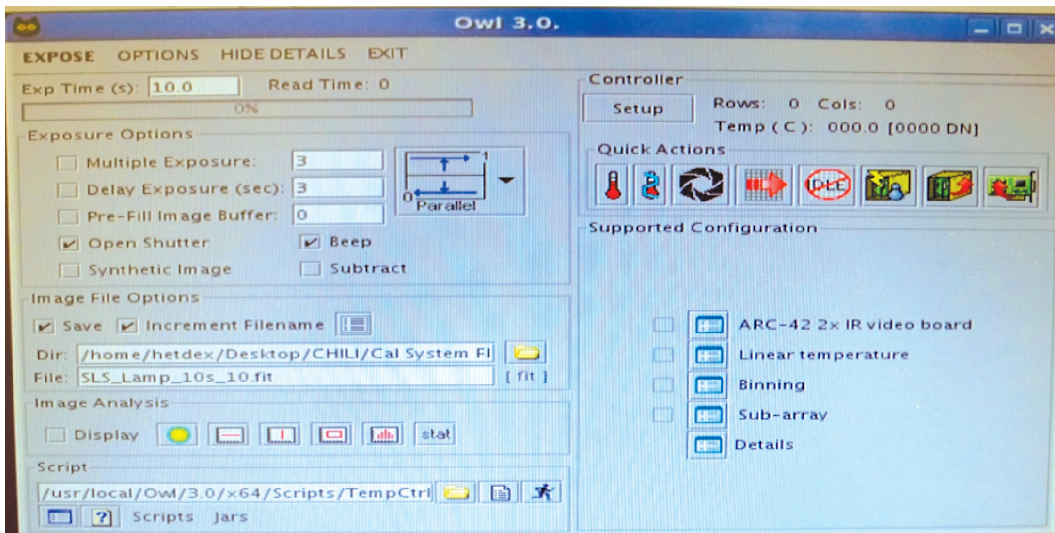


图 3 CHILI 数据采集软件 OWL 界面

CHILI 是基于 VIRUS 设计而成, 因此, 可以借用 VENGA 的数据批处理软件 VACCINE 进行数据处理。CHILI 的数据图像大小和光纤大小与 VIRUS-P 不同, 所以需要 VACCINE 进行适应 CHILI 图像大小和抽谱孔径的修改。这项修改由 CHILI 组成员上海天文台尹君副研究员负责, 目前已接近完成, 我们称这个数据批处理为 VACCINE_CHILI。汞、镉两灯灯谱左边 CCD 所探测到的左下角数据, 经过 VACCINE_CHILI 扣除本底与平场以及光纤跟踪与拉直后的图像如图 4 所示, 此时每条光谱在 CCD 上是平直的, 平均占 7 行。然后对拉直后的左下角 CCD 的 112 条光纤光谱进行了抽取。第 3 章将利用抽取后的光谱进行波长定标和光谱分辨率的计算。

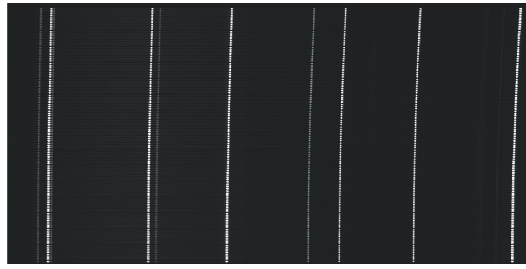


图 4 光谱仪左边 CCD 探测到的定标灯(汞、镉两灯)灯谱左下角数据, 经过修改后的 VACCINE 进行光纤跟踪与拉直后的图像

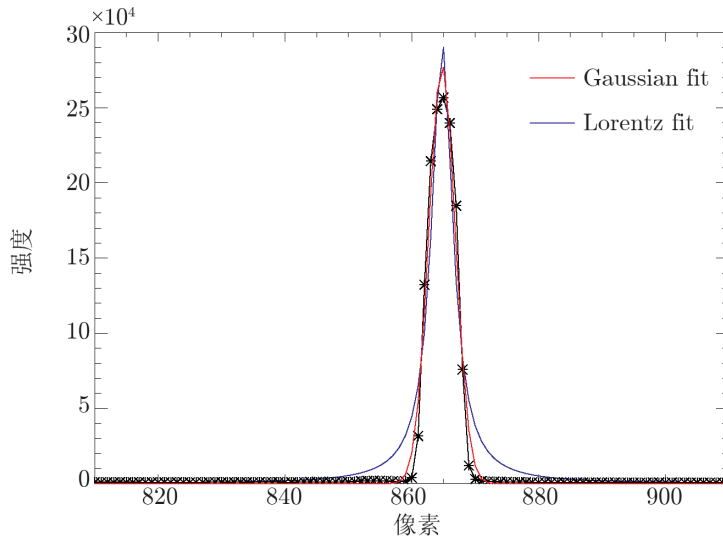
3 测试结果

3.1 波长定标

波长定标在天文观测中特别重要, 其目的是为了明确谱线在像素位置上所对应的精确波长值。因为在环境与时间的影响下光谱会在 CCD 上有稍微的漂移, 所以每晚的观测都需要进行波长定标。对于二维光谱仪这样的仪器, 每根光纤光谱都需要做相应的波长定标, 波长定标一般由谱线特征明显的定标灯灯谱进行。在波长定标过程中, 我们利用多项式对谱线波长及其所在像素位置之间的关系进行拟合。

定标灯灯谱谱线的致宽因素主要包括压强致宽和多普勒致宽。压强致宽是由辐射粒子与其他粒子碰撞所导致的, 这种谱线致宽体现在谱线轮廓变成洛伦兹轮廓; 多普勒致宽则是由于气体中辐射原子的热运动造成, 气体温度越高, 谱线越宽, 这种致宽会导致谱线轮廓成高斯轮廓。因此, 灯谱谱线常用高斯函数或洛伦兹函数拟合。我们对谱线形状进行了洛伦兹拟合与高斯拟合, 并将两个结果做了对比, 图 5 显示了 Hg 灯灯谱发射线在 $4\ 358.325\ 8\ \text{\AA}$ 处的洛伦兹拟合和高斯拟合结果, 图中黑线为原始光谱, 黑色的星形符号代表观测数据点, 蓝线为洛伦兹拟合, 红线代表了高斯拟合结果。从图中可以看出, CHILI 灯谱的谱线轮廓更接近高斯轮廓, 显示灯谱的致宽主要由原子的热运动导致, 因此本文中所有的灯谱拟合都采用高斯拟合结果。

我们利用汞、镉定标灯一起曝光的灯谱做波长定标。对左下角 CCD 的 112 条光纤光谱中的每条发射线谱线选取发射线中心附近约 $100\ \text{\AA}$ 波长范围逐一进行高斯拟合, 并用一条直线来拟合连续谱。高斯拟合的自由参数包括谱线的中心位置、半峰全宽以及谱线强度, 拟合结果如图 6 所示。对每条光谱, 通过这样的高斯拟合确定每条灯谱谱线线心所在的像素位置,



注：黑色曲线代表抽取出来的原始光谱，红色曲线为我们进行高斯拟合后的谱线，蓝线为洛伦兹拟合结果，星形符号代表拟合点。从图可以看出 CHILI 测试灯谱的谱线轮廓更符合高斯拟合结果。

图 5 对汞灯灯谱在 4358.3258 \AA 处的发射线谱线形状进行洛伦兹拟合与高斯拟合后对比测试

如表 1 第二列所示。结合每条光谱中这 10 条发射线谱线的像素位置和实验室静止波长 (参考 VENG 进行波长定标的实验室静止波长值) 信息, 可以拟合得出每条光纤之每个像素位置所对应的波长值。假设波长和像素点之间存在一个四阶多项式关系:

$$\lambda = A + B \times P + C \times P^2 + D \times P^3 + E \times P^4, \quad (1)$$

其中 λ 是波长, 单位为 \AA , P 为 CCD 像素位置值, A 、 B 、 C 、 D 、 E 为拟合系数。以光谱仪左边 CCD 探测到的左下角数据图像最下面一根光纤为例, 表 1 展示了定标灯第一条光纤光谱发射线质心所在的像素位置和对应的实验室静止波长。我们得到第一条光纤光谱的拟合结果, 即定标参数:

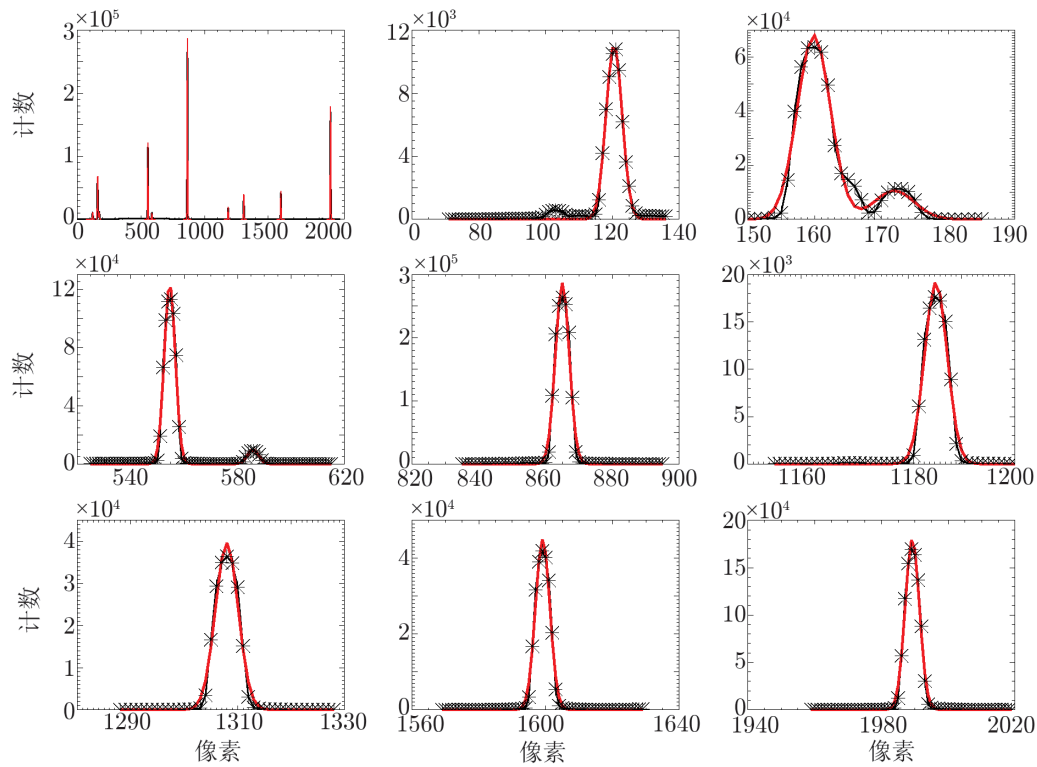
$$A = 3492.06, B = 0.9929, C = 1.83 \times 10^{-5}, D = -9.69 \times 10^{-9}, E = -1.60 \times 10^{-13}. \quad (2)$$

像素值是从 1 到 2064, 所以对这一根光纤而言, 其相应的波长覆盖范围为 3492.06 \AA 到 5530.22 \AA 。按照这种方法, 我们对左下角 CCD 的 112 条光纤光谱进行了波长定标, 所得结果如图 7 所示。因为在 CCD 原始二维图像上, 灯谱展示有一定的曲率, 所以不同光纤的波长-像素关系略有不同, 像素为 1 所对应的波长值从最下面一根光纤到最上面一根逐渐变小, 最下面对应的波长值为 3492.06 \AA , 最上面对应的波长值为 3480.57 \AA 。

3.2 光谱分辨能力的计算

光谱分辨能力是探测器能探测到的光谱辐射能量的最小波长间隔, 一般来说, 波长间隔越小, 光谱分辨能力越高。光谱分辨率的定义如下:

$$R = \lambda / \Delta\lambda, \quad (3)$$

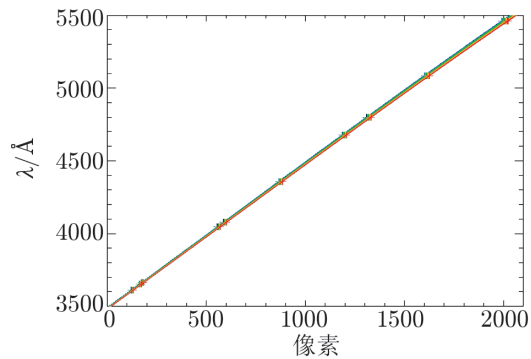


注: 黑色为原始光谱, 红色为进行高斯拟合后的光谱, 星形符号为拟合点。

图 6 对定标灯光谱中最下面第一条光纤光谱进行高斯拟合的结果

表 1 第一条灯谱发射线所在像素位置及其对应波长

定标灯	像素位置	波长/ Å
Cd	120.49	3 611.286 7
Hg	159.90	3 652.106 2
Hg	171.97	3 663.200 0
Hg	554.60	4 046.553 9
Hg	585.72	4 077.829 8
Hg	865.01	4 358.325 3
Cd	1 185.20	4 678.147 4
Cd	1 307.97	4 799.908 0
Cd	1 599.12	5 085.817 3
Hg	1 989.24	5 460.736 6



注: 从蓝色到红色分别代表从最下面一根光纤到最上面一根光纤的波长定标结果, 每根光纤的波长定标稍有不同。十字形符号代表拟合点。波长定标结果显示我们的波长覆盖范围约为 3 500~5 500 Å。

图 7 利用汞、镉两定标灯一起曝光所得光谱所做波长定标结果

$\Delta\lambda$ 是在波长 λ 处探测器能分辨的最小波长差。在本文中

$$\Delta\lambda = K \times N_{FWHM} , \quad (4)$$

K 为相邻两像素位置的波长差, 即单位像素的波长值, 单位为 $\text{\AA}/\text{像素}$, N_{FWHM} 为谱线轮廓半峰全宽所占的像素数目。因此,

$$R = \lambda / (K \times N_{FWHM}) . \quad (5)$$

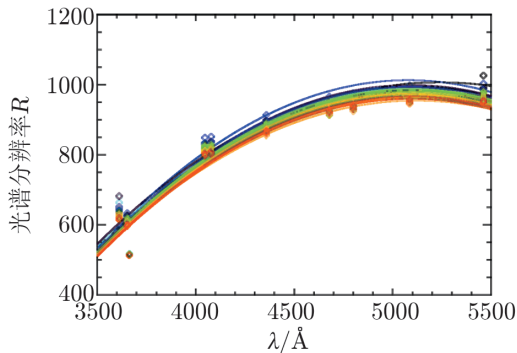


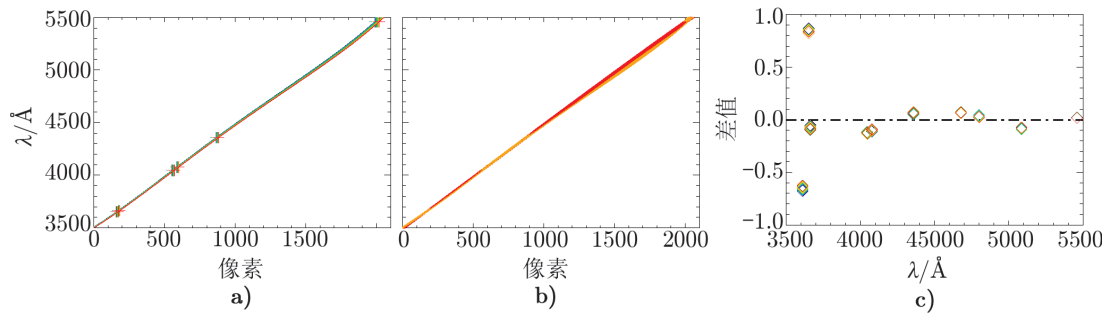
图 8 光谱分辨率随波长的变化

我们利用汞、镉两定标灯一起曝光所得的灯谱发射线计算每根光纤的光谱分辨率。利用光谱分辨率的定义公式, 计算出光谱中各发射线存在处的光谱分辨率, 如图 8 中各菱形所示。图 8 中横轴是波长, 纵轴代表光谱分辨率, 颜色由蓝到红分别代表从下面开始第 1 根到第 112 根光纤。通过对光谱分辨率与对应的实验室静止波长进行二项式拟合, 可以推出光谱分辨率随波长的变化, 图 8 显示光谱分辨率在 $4\ 500\ \text{\AA}$ 波长处大约为 900 ($FWHM \simeq 5\ \text{\AA}$)。

4 讨 论

第 3 章我们描述了如何利用汞、镉两灯一起曝光的灯谱做波长定标。使用两种定标灯是实现高精度波长定标必须的, 特别是镉灯在 $4\ 678.147\ 4\ \text{\AA}$ 、 $4\ 799.908\ 0\ \text{\AA}$ 、 $5\ 085.817\ 3\ \text{\AA}$ 处的谱线填补了汞灯谱线在蓝端 $4\ 500\ \text{\AA}$ 到 $5\ 100\ \text{\AA}$ 波长范围的空白。为了更定量地说明这一点, 我们也进行了仅利用汞灯曝光的灯谱做波长定标, 结果如图 9 a) 所示。我们将利用多个定标灯 (红色) 的计算与利用单个定标灯 (黄色) 所做波长定标结果的比较展现在图 9 b) 上。利用单个定标灯所做波长定标误差较大的地方在像素位置约 1 500 到 1 700 之间, 与多个定标灯情况下拟合所得波长值在约 $1\ 645\ \text{\AA}$ 处最大相差 $37\ \text{\AA}$ 。这样的波长误差对应的多普勒速度测量差别可高达 $2.2 \times 10^3\ \text{km/s}$, 这样的误差一般在科学应用中是不可接受的。

图 9 c) 显示了两个定标灯一起曝光时的拟合结果与实验室静止波长差, X 轴为波长值, Y 轴为差值。利用汞、镉两灯同时曝光的灯谱谱线所做的波长定标在最蓝端 $3\ 611.28\ \text{\AA}$ 处的镉灯灯谱发射线和 $3\ 652.106\ 2\ \text{\AA}$ 处的汞灯灯谱发射线处, 拟合值与实验室静止波长值相差分别约 $0.65\ \text{\AA}$ 和 $0.87\ \text{\AA}$, 相比于其他拟合点差值较大。汞灯灯谱中 $3\ 652.106\ 2\ \text{\AA}$ 和 $3\ 663.200\ \text{\AA}$ 两处发射线有部分重合, 这有可能影响高斯拟合谱线轮廓的精度, 从而导致波长定标在最蓝端有较大偏差。因此, 我们去掉了汞灯灯谱中这两处发射线后重新对汞、镉两灯灯谱进行高斯拟合, 拟合方法与之前相同, 如最下面第一条光纤光谱的高斯拟合结果见图 10



注: a) 图为在仅有汞灯曝光情况下进行的波长定标, 横轴为 CCD 像素位置, 纵轴为波长, 不同颜色代表不同的光纤, 十字形符号代表拟合点; b) 图为仅有汞灯灯谱所做的波长定标 (黄色) 与利用汞、镉两定标灯灯谱所做波长定标 (红色) 之间的比较, 表明利用单个定标灯做波长定标时误差较大; c) 图显示了在 b) 图基础上, 汞、镉两灯灯谱情况下所做的波长定标拟合值与实验室静止波长值的差值, 不同颜色代表不同的光纤。

图 9 不同情况下波长定标及比较

所示。利用重新拟合后的光谱再次做波长定标, 结果如图 11 所示。例如最下面第一条光纤光谱的拟合结果, 即定标参数:

$$A = 3491.25, B = 0.9941, C = 1.90 \times 10^{-5}, D = -1.12 \times 10^{-8}, E = 3.05 \times 10^{-13} . (6)$$

对此波长定标拟合值与实验室波长值进行对比, 结果如图 12 所示。相比于给定的实验室静止波长值, 拟合值与其相差为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$, 因此去掉汞灯灯谱中存在部分重叠的发射线所做的波长定标更加精确。

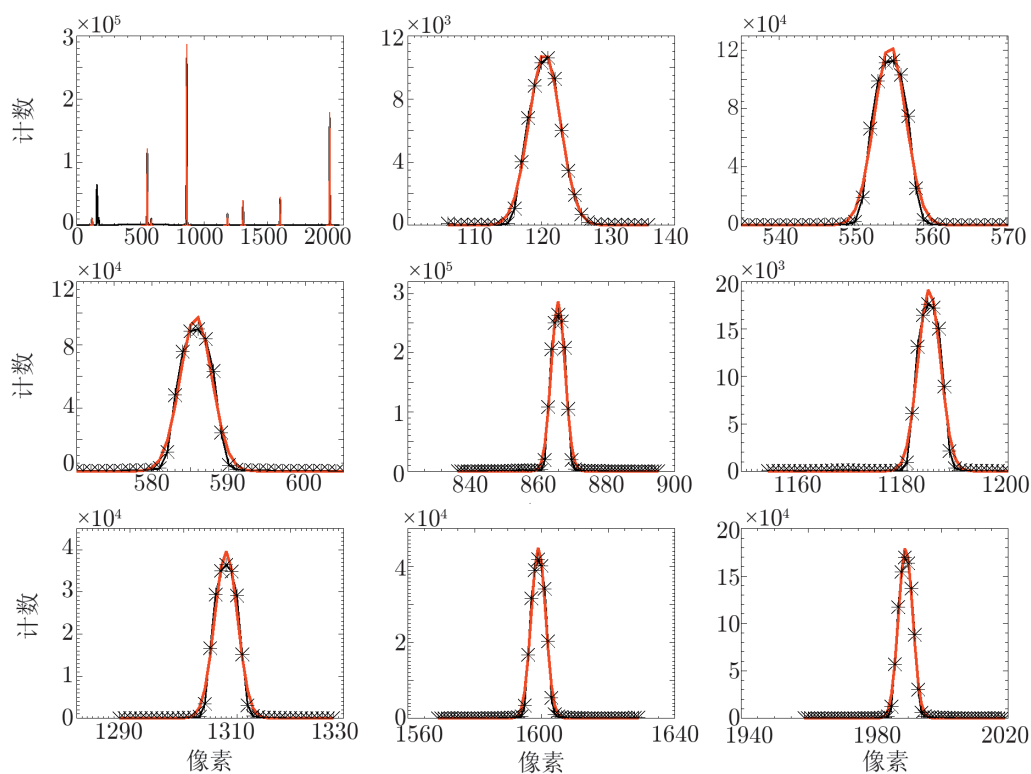
拟合结果和式 (2) 相比, 拟合 A 值差了 $\leq 1 \text{ \AA}$ 。对应的波长覆盖范围为 3491.25 \AA 到 5530.33 \AA 。像素为 1 所对应的波长值, 最下面光纤对应的波长值为 3491.25 \AA , 最上面光纤对应的波长值为 3479.79 \AA 。

计算出的光谱分辨率 R 在 3663.200 \AA 处明显低于拟合值, 如图 8 所示, 可能是两个谱线重叠从而导致高斯拟合结果误差较大。因此, 我们利用图 10 高斯拟合得到的半峰全宽再次计算出各发射线波长处的光谱分辨率, 对光谱分辨率与波长值进行二项式拟合, 结果如图 13 所示。在此波长覆盖范围内光谱分辨率约为 $600 \sim 1000$ 。

HETDEX 的科学目标主要是研究高红移处的 LAEs, 为了尽最大可能找到更多的 LAEs, 要求 VIRUS 技术上设计在波长 $350 \text{ nm} \sim 550 \text{ nm}$ 对应的光谱分辨率为 700 左右^[2]。CHILI 的科学目标主要研究近邻星系, 实验结果显示 CHILI 在蓝端的光谱分辨本领为 $FWHM \simeq 5 \text{ \AA}$, 可以利用 $[\text{O II}]\lambda 3727$ 、 $[\text{O III}]\lambda 5007$ 研究气体动力学, 利用 Mg I b 吸收线、 Ca H+K 吸收线研究恒星动力学, 利用 D_{4000} 研究星族的年龄及其演化等。因此, 本次测试结果符合 CHILI 的预期科学要求。

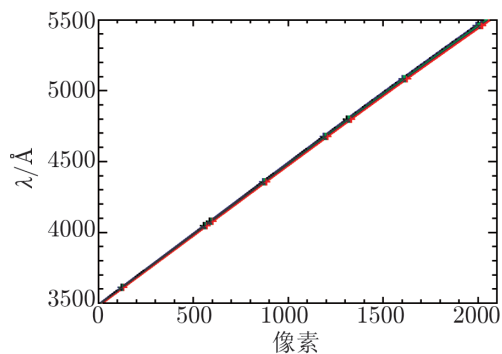
5 总结与展望

通过对中国第一台用于夜天文观测的科学级 IFU 光谱仪出厂前的实验室数据进行分析,



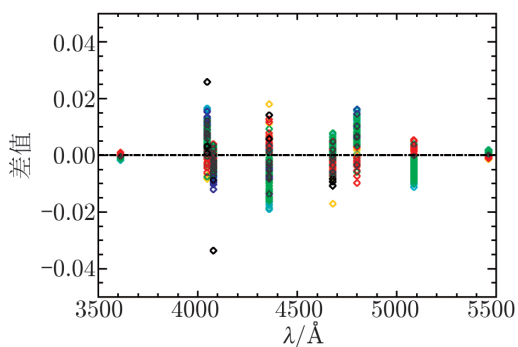
注：黑色线为原始光谱，星形符号为拟合点，红色线为高斯拟合光谱。

图 10 最下面一条光纤光谱去掉汞灯 $3\ 652.106\ 2\ \text{\AA}$ 和 $3\ 663.200\ \text{\AA}$ 两处部分重合的发射线后进行的高斯拟合结果



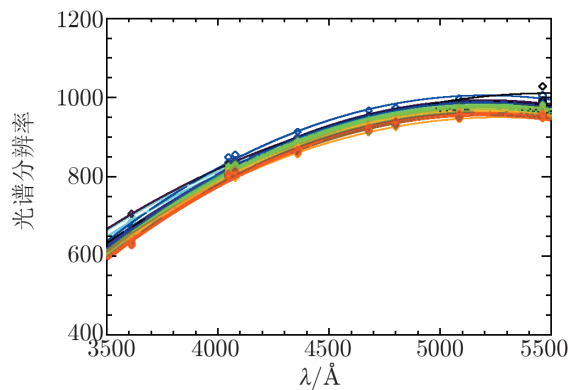
注：星形符号为拟合点，不同颜色代表不同的光纤。

图 11 利用去掉汞灯 $3652.1062\ \text{\AA}$ 和 $3663.2000\ \text{\AA}$ 两处有重合的发射线后所做的波长定标结果



注：不同颜色的菱形分别代表着不同光纤光谱的波长定标拟合值与实验室静止波长值的差值，差值在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 。

图 12 图 10 的拟合所得波长值与实验室静止波长值之差



注: 不同颜色代表不同光纤, 菱形代表拟合点。如图所示光谱分辨率在 4 500 Å 波长处大约为 900。

图 13 光谱分辨率随波长的变化, 此处去掉了汞灯 3 652.106 2 Å 和 3 663.200 Å 两处有重合的发射线

我们检验其光谱覆盖范围以及计算 CHILI 在此波长范围内的光谱分辨率。通过对定标灯灯谱进行高斯拟合, 得到谱线线心中心位置和半峰全宽; 然后对多个定标灯 (汞、镉) 和单个定标灯 (汞) 灯谱以及有无汞灯灯谱中存在部分重叠的两条发射线等情况下所做的波长定标结果进行比较, 最终得出结论: 利用去掉部分重叠的发射线后的多个定标灯灯谱所做的波长定标较为精确。实验结果显示 CHILI 的波长覆盖范围在约 3 500 Å~5 500 Å 之间, 在此波长范围内, CHILI 的光谱分辨率为 600~1 000 ($FWHM \approx 5 \text{ \AA}$)。实验结果表明, CHILI 的波长覆盖范围和光谱分辨率已经符合 $R \approx 800$ 的预期要求。另外, CHILI 最终将使用的光纤直径 (200 μm) 比 VIRUS 的光纤 (266 μm) 更细, 因此最终 CHILI 的光谱分辨率将比本次测试的值更高。

致谢

感谢两位审稿人提出的宝贵意见以及编辑部的帮助。

参考文献:

- [1] Hill G J, MacQueen P J, Smith M P, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II, McLean I S, Casali M M, eds. Bellingham: Proceedings of the SPIE, Proc. SPIE, 2008, 7014
- [2] Hill G J, Tuttle S E, Drory N, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V, RAMSAY S K, MCLEAN I S, TAKAMI H, eds. Bellingham: Proceedings of the SPIE, Proc. SPIE, 2014, 9147
- [3] Blanc G A, Gebhardt K, Heiderman A, et al. New Horizons in Astronomy: Frank N. Bash Symposium 2009, Stanford L M, Green J D, Hao L, et al, eds. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 2010, 432
- [4] Adams J J, Blanc G A, Hill G J, et al. ApJS, 2011, 192: 5
- [5] Kelson D D. PASP, 2003, 115: 688
- [6] Hill J M. Fiber Optics in Astronomy, Barden S C, ed. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 1988, 3
- [7] Vanderriest C. PASP, 1980, 92: 858

- [8] 张居甲, 程向明, 宋佳阳, 等. 天文研究与技术, 2011, 8: 139
- [9] Qu Z Q. Solar Polarization 6, Kuhn J R, Harrington D M, Lin H, et al, eds. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 2011, 437
- [10] Bacon R, Copin Y, Monnet G, et al. MNRAS, 2001, 326: 23
- [11] Dopita M, Hart J, McGregor P, et al. Ap&SS, 2007, 310: 255
- [12] Croom S M, Lawrence J S, Bland-Hawthorn J, et al. MNRAS, 2012, 421: 872
- [13] Bundy K, Bershady M A, Law D R, et al. ApJ, 2015, 798: 7
- [14] Sánchez S F, Kennicutt R C, Gil de Paz A, et al. A&A, 2012, 538: A8

The Test Results of Spectral Resolution of China Lijiang Integral Field Unit

LI Huan^{1,2}, HAO Lei¹

(1. Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Integral Field Unit (IFU) can obtain the spatial and spectral information of the observed sources simultaneously, so it is a strong tool to study kinematics, abundances, star formation, structures of galaxies. China Lijiang Integral Field Unit (CHILI) is the first IFU for astronomical night observation in China which was been installed on the 2.4m telescope in Lijiang. The field-of-view of CHILI is $71'' \times 65''$ and it has 494 fibers. Each fiber corresponds to $3.2''$ on sky and the filling factor is greater than or equal to 96%. We tested CHILI in the University of Texas at Austin before it was shipped to China. This test focus on the blue part of CHILI for which we took bias, flat, dark and lamps data. We applied the wavelength calibration and calculate the spectral resolution of CHILI. The results show that the spectral wavelength coverage of CHILI blue part ranges from 3 500 Å to 5 300 Å and the spectral resolution $R = \lambda/\Delta\lambda$ ranges from 600 to 1 000 in this wavelength range ($FWHM \approx 5 \text{ \AA}$), all satisfying CHILI requirements.

Key words: IFU; Wavelength Calibration; Spectral Resolution