

文章编号:1671-4229(2023)05-0072-13

河外星系 NGC 0925 中氢二区的光谱观测研究

王舒婷^{1a,b}, 吴启明^{1a,b}, 袁淇^{1a,b}, 郑映慧^{2,3}, 方凤娜^{3,4}, 毛业伟^{1a,b*}

(1. 广州大学 a. 天体物理中心; b. 物理与材料科学学院, 广东 广州 510006;

2. 中国科学院国家天文台, 北京 100101; 3. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049;

4. 中国科学院高能物理研究所 粒子天体物理重点实验室, 北京 100049)

摘要: 氢二区是星系中恒星形成的场所,最显著的观测特征是光谱中的一系列发射线,光谱观测和分析是研究氢二区性质的主要途径。文章呈现的是利用国家天文台 2.16 m 望远镜对河外星系 NGC 0925 中的一个氢二区进行光谱观测、数据处理和测量以及分析的工作。基于观测到的光谱发射线,采用“巴尔默减幅”法得到星系内消光并作消光改正;利用 H α 发射线的光度得到恒星形成率;利用强发射线方法得到氧元素丰度。结果显示,该氢二区的尘埃消光严重(V波段的尘埃消光 $A(V) = 0.641$ mag)、恒星形成活动性强(恒星形成率面密度 $\sum_{SFR} = 0.104 M_{\odot}/\text{yr}/\text{kpc}^2$)、金属元素丰度高(氧元素丰度 $12 + \log(O/H) = 8.337$ dex)。

关键词: 光谱仪; 光谱学观测研究; 氢二区; 谱线和波段; 个源星系(NGC 0925)

中图分类号: P141.5 文献标志码: A

Spectroscopy of one H II region in the external galaxy NGC 0925

WANG Shu-ting^{1a,b}, WU Qi-ming^{1a,b}, YUAN Qi^{1a,b}, ZHENG Ying-hui^{2,3,4},
FANG Feng-na^{3,4}, MAO Ye-wei^{1a,b*}

(1 a. Center for Astrophysics, b. School of Physics and Materials Science, Guangzhou University,

Guangzhou 510006, China; 2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Key Laboratory for Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: H II regions are where star formation takes place in galaxies. The most prominent observational characteristic of H II regions is a series of emission lines in a spectra. Spectral observations and analysis are the main approach to investigating H II regions. This paper presents the work on a spectral observation of one H II region in the external galaxy NGC 0925, taken with the 2.16 m telescope at the National Astronomical Observatories, as well as data reduction, measurement and analysis. On the basis of the observed emission lines, for this H II region, we obtain dust attenuation and make attenuation correction by using the “Balmer Decrement” method; we derive star formation rate from the luminosity of the H α emission line; we estimate the oxygen abundance with the strong-line diagnostics. The results show that, this H II region is heavily obscured (the dust attenuation at the V band $A(V) = 0.641$ mag), actively forming stars (the star formation rate surface density $\sum_{SFR} = 0.104$

收稿日期: 2022-06-21; 修回日期: 2023-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2031106, U2031201); 广州大学省级大学生创新训练资助项目(S202011078107)

作者简介: 王舒婷(1998—),女,硕士. E-mail:wangshuting@e.gzhu.edu.cn

*通信作者. E-mail:ywmao@gzhu.edu.cn

引文格式: 王舒婷, 吴启明, 袁淇, 等. 河外星系 NGC 0925 中氢二区的光谱观测研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2023, 22(5): 72-83, 封二.

$M_{\odot}/\text{yr}/\text{kpc}^2$), and rich in metal content (the oxygen abundance $12 + \log(O/H) = 8.337$ dex).

Key words: instrumentation; spectrographs-techniques; spectroscopic telescopes-H II regions-ISM; lines and bands-galaxies; individual (NGC 0925)

天体的电磁辐射携带着许多重要的物理信息,是天体信息主要的载体。天体的电磁辐射从天体发出,经过星际介质和地球大气,再被地球观测者的接收设备接收。在这个过程中,天体的辐射被气体吸收或散射,可能使得天体辐射的强度和成分发生改变。地球大气对天体辐射的方向、强度以及辐射成分都会有影响。天体辐射会受到地球大气的吸收和散射,即大气消光,不同波段的电磁波受大气消光的影响也不尽相同,其中可见光和射电波段受影响最小。因此,地面观测主要以射电观测和光学观测为主。

可见光观测主要包括成像观测、偏振观测和光谱观测。成像观测是通过望远镜和探测器对天体直接成像以获取天体的二维空间信息,包括天体的分布、动态变化和形态结构等。成像观测往往需要追求更多的细节,这要求设备有较高的空间分辨率。空间分辨率对于望远镜来说,一般是望远镜的成像衍射极限,通过瑞利判据确定最小的分辨角。在地面观测中,空间分辨率往往还受大气视宁度的影响。偏振观测是对天体电磁辐射偏振特性的观测研究,在观测上通常以斯托克参数讨论偏振问题。偏振观测可以获取天体的电磁场环境、天体的辐射机制等物理信息。光谱观测是认识天体物理性质的核心研究手段。通过对天体的光谱观测,可以获得天体的许多信息,如天体的表面温度、压力、元素种类和元素丰度、天体的电磁场等物理信息^[1]。

天体光度测量也叫测光,是通过望远镜和探测器对天体某一特定波段的电磁辐射流量的测量。对天体的光度测量可以得到天体星、色指数、光谱能量分布和尘埃消光等信息。目前,光学观测中的辐射探测器主要为电荷耦合器件(Charge-Coupled Device,简称 CCD)。CCD 主要有量子效率高、线型响应好等优点。CCD 是由硅二极管组成的阵列,这些二极管在受到光照时,光子的能量使其产生光电子。光电子被储存、转移,经过电荷放大器转化为电压输出,最后转化为数字信号。在这个过程中,这些光电子成比例转化为以模数转换单元(Analog-Digital Unit,ADU)的数字信号(counts)输出,而这个比例系数称为增益(gain)。CCD 收集的信号在转移、放大等过程中都会引入噪声,这类噪声称为读出噪声(read noise)^[2-3]。以 CCD 为辐射探测器的观测是将

天体辐射转化为数字信号,这些数字信号还要通过一系列的数据处理将数字信号定标为真实的天体辐射强度等信息。

天体分光测量是应用光谱分析的方法研究天体的物理性质。天体分光测量的基本器件是光谱仪,光谱仪主要由准直系统、分光系统和成像系统组成。在分光系统中,基于色散原理的光谱仪分光器件主要有棱镜光谱仪和光栅光谱仪,而基于干涉原理的光谱仪主要有傅里叶变换分光仪和 F-P 干涉仪等。长缝-光栅光谱仪主要由狭缝、准直器与光栅组成。天体的复色光辐射进入望远镜后先通过狭缝再经过准直器再到光栅,此时,由于衍射现象发生色散分光,最后被终端的 CCD 接收。光栅光谱仪的色散系统是衍射光栅,衍射光栅是单缝衍射和多缝衍射组合的综合效果。衍射光栅主要包括平面光栅和定向光栅(又称闪耀光栅)。平面光栅的能量主要集中在没有色散的零级光谱上,色散的效率低。定向光栅是具有许多确定形状刻槽的反射面,定向光栅可以将 90% 以上的能量集中在应用的那一级的波段范围内。光栅光谱范围是指相邻两个光谱级次之间重叠的波长差,但实际的光谱工作范围还受 CCD 尺寸大小和大气窗口等因素限制。光谱的分辨率定义为 $\lambda/\Delta\lambda$,其中, λ 为光谱中的某一波长位置, $\Delta\lambda$ 为最小可分辨波长间隔,实际的 $\Delta\lambda$ 受光栅刻度、采用的光谱级数、入缝宽度以及 CCD 像元尺寸等影响^[4-5]。

在天文光谱观测中,天体复色光通过光谱仪后色散在 CCD 上,此时,波长信息储存在 CCD 像素坐标上,光谱的流量转化为数字信号。天体的信号在被探测时也携带了许多噪声。这些噪声主要来源于天体的背景辐射、天体辐射在到达探测器时经过的介质以及探测器本身的噪声。介质的影响主要包括星系内部的消光、银河系消光、地球大气的消光、宇宙线噪声、天光背景污染及望远镜收集辐射带来的消光和其他影响等。作为探测器的 CCD 在接收天体辐射时的噪声来源主要有本底、暗流电和平场。本底噪声是由于 CCD 工作时的偏置电压影响,在无曝光时也会储存一些电子噪声;暗电流噪声是 CCD 工作时产生的热电流,这类噪声与温度有关,在天文上可以通过制冷来降低这类噪声;平场噪声又称空间噪声,这类噪声主要是由于 CCD 每个像元

之间的量子效率不同引起^[6]。因此,要获取天体的光谱信息,往往还需要对接收的信号进行处理,这些处理包括对各种噪声的扣除和对波长与流量的定标。

电离氢区(氢二区)有非常明显的光学波段的光谱发射线特征,这些谱线主要来自被电离的激发气体。当 H 离子俘获电离的光电子时,这些电子会发生一系列的级联辐射,最终返回基态。在发生级联辐射过程中将辐射出 H 的复合线,这些复合线在光学波段为 H α 、H β 、H γ 等巴尔默线系的谱线。若电离电子与离子发生碰撞相互作用,则会使得 O、N、S 等元素的离子发生碰撞激发。在氢二区的低密度条件下,这些被激发的离子在被下一次碰撞激发前已经发生辐射衰变,辐射出一系列如 [OII] λ 3727、[OIII] λ 4959, 5007、[NII] λ 6549, 6583、[SII] λ 6717, 6731 等禁线。通过对氢二区的光谱观测,能得到氢二区电离气体的一些性质,如电离态、尘埃消光、化学元素丰度、恒星形成率等物理/化学参数^[7-9]。

本研究使用国家天文台 2.16 m 望远镜^[10] 对河外星系 NGC 0925 的一个氢二区观测原始光谱数据进行数据处理和光谱测量,利用测量得到的谱线流量进一步计算氢二区的一些物理/化学参数。NGC 0925 是一个晚期(late-type)SABd 型的棒旋星系,该星系的长轴方位角为 102°,正对视向方向的倾角为 $i = 57^\circ$,位于赤道坐标赤经 $02^h 27^m 16.8^s$,赤纬 $+33^\circ 34' 45.0''$,到地球的距离为 9.12 ± 0.17 Mpc^[11-13]。

本文的第一部分将介绍观测的数据以及观测情况;第二部分将展示原始光谱数据的处理;第三、第四部分将对一维的光谱进行银河消光改正、谱线证认、谱线流量测量以及一些物理/化学参数的计算;第五部分对本工作进行讨论;第六部分将对本文的工作进行总结。

1 光谱观测

本工作中 NGC 0925 的氢二区光谱观测数据是由国家天文台兴隆观测站 2.16 m 望远镜于 2007 年到 2008 年间观测获得^[14]。观测时选用的光谱仪是 Optomechanics Research Inc(OMR)卡焦低色散长缝-光栅光谱仪,它安装在 2.16 m 望远镜卡塞格林焦点上。在本次观测中的光栅为 300 刻线/mm,色散分辨率约 4.8 Å/pix,狭缝出缝宽度为 2.5",狭缝长度为 4',光栅的闪耀波长为 5 500 Å,观测波长覆盖在 3 600 ~ 8 000 Å^[10,14]。对 NGC 0925 氢二区观测的狭缝曝光时间为 1 800 s \times 2 或 1 800 s \times 3。

本底是在 CCD 关闭快门下 0 秒曝光的图像,圆顶平场的观测是在关闭天文圆顶时,由望远镜对平场灯漫反射制造的均匀光源观测得到。本底和平场图像在当晚的观测开始前和观测结束后各拍摄 5 份。为提高光谱的观测效率,在观测时尽量调整狭缝方位角(北偏东),使狭缝同时覆盖多个氢二区。目标源观测结束后,在不改变望远镜指向和狭缝方位角的情况下,对 He - Ar 灯拍摄标准灯谱图像。由于 OMR 的 CCD 在工作时采用液氮制冷,暗流很小,因此,在观测时通常不再拍摄暗流图像。标准星和标准星的标准灯谱的观测也是在不改变狭缝方位角的条件下观测得到。流量定标中标准星的光谱来自国际参考星库(Internation Reference,简称 IRS)^[15] 中的光谱。

本文展示的是笔者对 NGC 0925 中的一个氢二区进行的工作。这个氢二区在星系中的位置和对对其进行光谱观测的狭缝位置见图 1。对该氢二区的观测于 2007 年 10 月 13 日进行。该氢二区的赤经为 $02^h 27^m 00^s$,赤纬为 $+33^\circ 34' 34''$,狭缝的方位角为 49°,观测曝光时间为 1 800 s \times 2。观测时选用的标准星为 HD19445(赤经 $03^h 08^m 26.42^s$,赤纬 $26^\circ 2' 34.9''$),对标准星进行观测的曝光时间为 300 s。对标准灯进行观测的曝光时间为 30 s,对平场灯进行观测的曝光时间为 120 s。观测当晚的视宁度约为 3.0"。图 2 从上至下展示了目标源、标准星 HD19445、目标源的标准灯、其中一张本底和平场的原始观测数据。每幅图的横向为色散方向,纵向为空间方向。

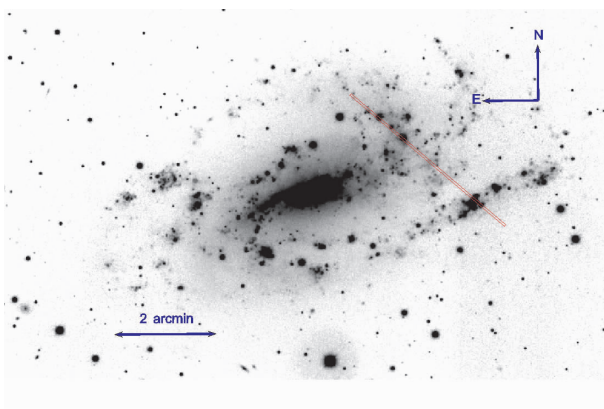


图 1 基特峰天文台 2.1 m 望远镜观测得到的 NGC 0925 H α 窄带图像

Fig. 1 H α narrowband image for NGC 0925 obtained with the 2.1 m telescope at the Kitt Peak Observatory

注:图中红色方框是利用国家天文台兴隆观测站 2.16 m 望远镜观测时的狭缝示意图,图中标记了方向(右上角)和比例尺(左下角)。

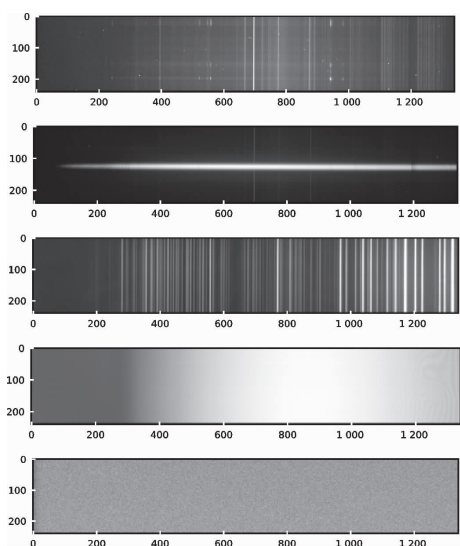


图2 观测得到的原始数据

Fig. 2 Observed raw data

注:坐标轴均为图像像元的位置坐标(pixel numbers)。

2 对原始数据的处理

2.1 CCD 二维数据的改正

观测得到的原始光谱数据是二维的 FITS 文件,使用 PyRAF^① 对原始数据进行标准化的处理。对于 OMR 光谱仪观测的光谱,原始数据的处理主要包括减本底、平场改正和宇宙线的剔除^[16-17]。光谱 CCD 二维数据

的改正由下式进行:

$$\text{天体 + 背景像强度} = \frac{\text{CCD 天体像强度} - \text{本底}}{\text{平场} - \text{本底}} \quad (1)$$

在进行原始数据处理之前,先对数据进行预处理。预处理包括裁减图像边缘、图像检查和头文件的添加。通过 DS9^② 和 PyRAF 检查图像,对目标源和标准星的 FITS 文件添加名字、坐标、观测时间、大气质量等头文件^③。

2.1.1 本底改正

对观测的本底图像进行 maxmin 的平均值合并,获得一个主本底文件,再对目标源、标准星、标准灯和平场的二维图像进行本底改正。PyRAF 中的 zerocombine 和 ccdproc 任务包用于进行本底图像的合并和本底的改正。

2.1.2 平场改正

圆顶平场灯谱呈现近似黑体辐射的光谱,由于圆顶平场灯的漫反射光在狭缝的空间方向上可能存在比较大的照明梯度,因此,还需要消除平场灯照度不均匀性。平场改正的整个流程包括对平场文件进行合并;对合并后的平场图像进行色散方向的拟合和归一化,如图 3(a);将色散方向的归一化生成的图像分成 5 个 bin 并分别进行空间方向的拟合和归一化如图 3(b)左;将两幅归一化的平场相除,以消除平场灯照度不均匀性,生成一幅标准的平场文件^[18](图 4)。最后对目标源、标准星和标准灯进行平场改正,消除不同像元之间的量子效率不同带来的响应不均匀性。

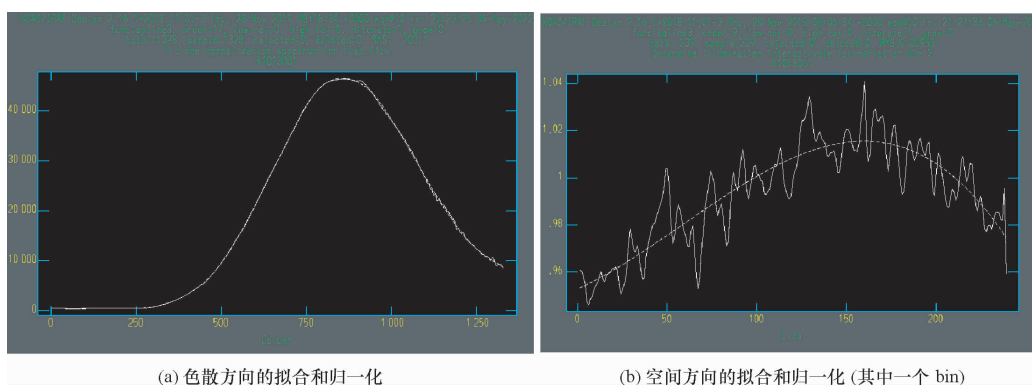


图3 圆顶平场轮廓

Fig. 3 Dome flat-field profiles

注:图(a)是色散方向平场轮廓的拟合结果,纵坐标是图像的强度计数(counts),横坐标为色散方向的像元坐标(pixels);图(b)是空间方向平场轮廓的拟合结果(色散方向归一化后的平场),图中展示了其中一个 bin 的拟合结果,纵坐标是归一化后的强度计数,横坐标为空间方向的像元坐标(pixels)。

① PyRAF 是基于 PYTHON 的脚本语言编写的用于代替 IRAF CL 的命令语言。PyRAF 自 1999 年起由太空望远镜科学研究所(STS-cI)开发。IRAF 是用于天文数据处理与分析的通用软件系统,这个软件是由亚利桑那州的图森的国家光学天文台编写的。

② SAO Image DS9 是一款天文成像和数据可视化应用程序。它支持 FITS 图像和二进制表读取、多帧缓冲区、区域操作以及多尺度算法和色彩表。

③ 本工作使用兴隆观测站提供的 readlog.cl 脚本文件执行批量添加。

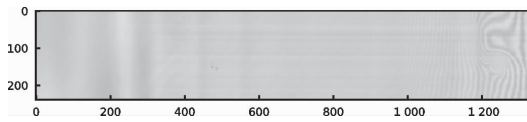


图 4 色散和空间方向均归一化后的标准平场图像

Fig. 4 Image for the standard flat-field image after normalization in both of dispersion and spatial directions

注:坐标轴均为图像像元的位置坐标(pixel numbers)

平场图像合并、色散方向归一化、空间方向归一化和平场改正通过使用 PyRAF 中的 twospec 下的 flatcombine、response、illumination 和 ccdproc 任务包实现。

2.2 宇宙线的去除

由于观测目标的曝光时间比较长,一些随机的宇宙线会不可避免地打到 CCD 上,从而被错误地记为观测信号。被记入观测数据的每一个宇宙线在二维图像中表现为随机分布的一个占据 2~3 个像素的亮点。宇宙线的剔除可以通过合并图像自动完成,也可以手动去除。在去除宇宙线的过程中,通常使用周围几个像素强度的平均值代替宇宙线噪声的点。

2.2.1 合并图像

通过观测得到了两张目标源的图像,先采用图像合并的方式去除宇宙线。两张目标源图像使用 PyRAF 中 imcombine 包的 minmax 拒绝算法(rejection)合并成一个假图像;将假图像头文件修改 ncombine = 0, exposure = 0;在 imcombine 包上设定以曝光时间为权重和 avsigclip 的拒绝算法方式选择合并方式将两张目标源和假图像合并成一副图像。在此过程中自动去除了包括大部分宇宙线在内的无效信号。

2.2.2 手动去除宇宙线

合并图像过程中去除了大部分宇宙线,但还存在小部分宇宙线需要手动去除。这一过程在 PyRAF 中的 cosmicrays 任务包下反复进行,图 5 为 PyRAF 交互图上显示的宇宙线的直方图。宇宙线去除的二维图像见图 6(b)。图 6 见封二。

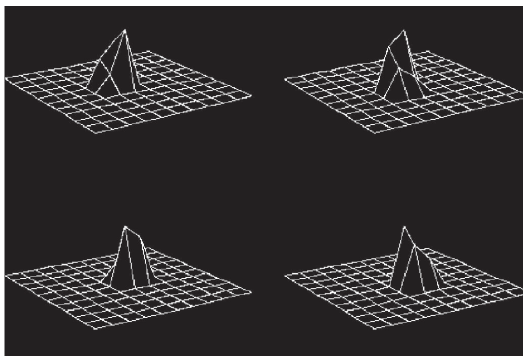


图 5 PyRAF 交互界面上的宇宙线直方统计图

Fig. 5 Cosmic-ray histogram on the PyRAF interface

2.3 一维光谱数据的抽取和定标

为了获取天体的光谱信息(即色散数据),需要对二维空间-色散数据进行光谱的抽取(以下简称抽谱),即获得特定空间位置的一维色散数据。抽谱过程中需要确定抽谱孔径,包括孔径位置、孔径大小、光谱的色散轨迹(对色散轨迹进行追踪)。抽谱后的一维色散数据还需要进行波长定标和流量定标。波长定标是将像素坐标转换成波长,流量定标是将光谱的 CCD 的电子计数转化为标准单位的辐射流量。这一节将展示一维光谱数据的处理,内容包括抽谱、波长定标和流量定标^[19]。

2.3.1 标准星、目标源、标准灯光谱的抽取

先对标准星进行抽谱并获得其光谱在 CCD 图像上的轨迹。抽谱的孔径的中心位置选择在光谱的峰值,孔径大小约 25 pixels。选择标准星周围的天光背景采用 2 阶的切比雪夫多项式(Chebyshev)拟合作为标准星的天光背景并扣除(具体操作可参见下面氢二区光谱的抽取)。光谱的色散轨迹采用 3 次样条插值拟合,拟合结果见图 6(e)。

氢二区的光谱具有非常明显的发射线特征,尤其是 $H\alpha$ 谱线,而连续谱通常比较弱,因此,在二维数据上依照 $H\alpha$ 发射线的空间位置设定孔径进行抽谱,这样抽谱界面信噪比高,从而使孔径误差最小。抽谱孔径的位置设为二维数据上的 $H\alpha$ 发射线的像素坐标。图 6(a)和 6(b)分别展示了抽谱孔径在星系图像和观测得到的空间-色散二维数据中的位置和大小,在图 6(b)中同时标出了 $H\alpha$ 和 $[NII] \lambda\lambda 6548, 6584$ 发射线的位置。孔径的尺度需要不小于观测台站所在地的视宁度。对于这个氢二区,笔者设定的孔径大小为 $20'' \times 2.5''$ 。在抽谱前还需要测量背景,采用二阶的切比雪夫多项式(Chebyshev)对孔径周围没有发射线的区域进行拟合得到。拟合得到的背景用于对光谱进行背景扣除。图 6(d)展示了对背景区域的拟合。由于氢二区的连续谱相比于发射线来说比较弱,容易受到背景以及同一狭缝中其它氢二区的影响而不利于对色散轨迹进行追踪,因此,在抽取氢二区的光谱时,参照标准星的色散轨迹对目标氢二区的色散轨迹进行追踪。目标源的抽谱结果展示在图 6(f)中,横坐标为像素代号(尚未波长定标),纵坐标为 CCD 电子计数(尚未流量定标)。

本工作的目标源和标准星都已通过观测得到相应的标准灯光谱,在数据处理时也需要分别对目标源和标准星的标准灯光谱进行抽取。标准灯光谱的孔径位置、大小以及光谱轨迹参照相应的目标源或标准星的孔径。对于标准灯来说抽谱时不进行背景扣除。

光谱的抽取通过 PyRAF 中的 twospec-apextract-apall 任务包完成。

2.3.2 波长定标

如图 6(f) 所示,通过抽谱得到目标源的一维光谱中,色散方向的坐标为像素代号,还需要进行波长定标,将其转化为波长。波长定标是通过确定的波长 - 色散关系将观测的光谱的像素代号转化为波长。这里的波长 - 色散关系由 He - Ar 标准灯谱得到。

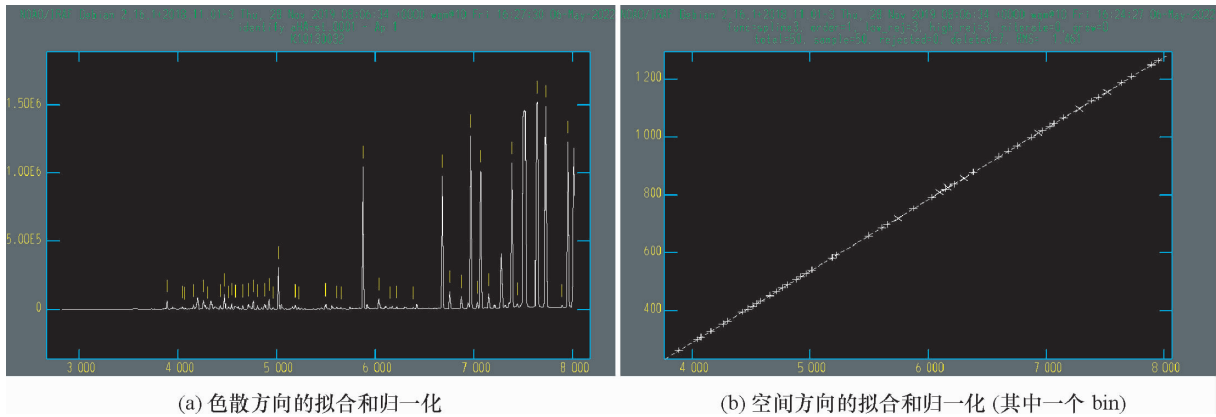


图 7 波长定标图解

Fig. 7 Illustration of wavelength calibration

注:图 7(a)是 He - Ar 灯谱线标识的结果,横轴为波长(Å),纵坐标为强度计数(counts);图 7(b)是根据 He - Ar 灯谱线标识得到的波长 - 色散关系的拟合结果,图中横坐标表示波长(Å),纵坐标表示像元位置(pixels)。

标准灯谱的证认标识利用 PyRAF 中的 onspec-identify 任务包完成。

(2) 波长 - 色散关系拟合

在证认标识谱线完成后,需要对波长 - 色散关系(波长 - 像素关系)进行拟合。本工作中采用 spline3 3 次样条函数进行插值拟合,拟合中需要剔除残差大于 0.5。图 7(b)展示了拟合得到的波长 - 色散关系,通过这个关系,可以把上面抽谱得到的目标源和标准星的一维光谱数据的横坐标由像元坐标转化为波长(单位为 Å),从而完成波长定标。

波长定标利用 PyRAF 中的 onedspec-refspectra 任务包完成。

2.3.3 流量定标

(1) 大气消光

地球大气对天体辐射具有消光(吸收和散射)作用。在不同的地点,大气消光往往是不同的。对于完成波长定标的目标源和标准星的光谱需要进行大气消光的改正。

大气消光定义为消光前后天体的某个波段的星等差,由辐射波长和大气质量决定,数学表达式为

(1) 灯谱谱线标识

在波长转化前需要分别对标准星和目标源的标准灯谱进行波长证认标识。采用兴隆观测站提供的 He-Ar 灯谱图^[20]对标准灯谱进行证认。通过证认并手动标识部分谱线后再自动标识其他谱线。图 7(a)为观测得到的标准灯谱示意图,其中的谱线已经证认表示完成,图中黄色短线代表标识的谱线。

$$m_{\lambda} - m_{\lambda_0} = K_{\lambda} M(z), \quad (2)$$

其中, m_{λ} 和 m_{λ_0} 分别为某天体在 λ 波长处大气消光后的星等和大气外(大气消光前的)星等; K_{λ} 为 λ 波长处的 Bouguer 消光系数; $M(z)$ 为天定距 z 处的大气质量^[21]。

本工作的大气消光曲线(消光 - 波长关系曲线)由兴隆观测站提供^[22](图 8)。

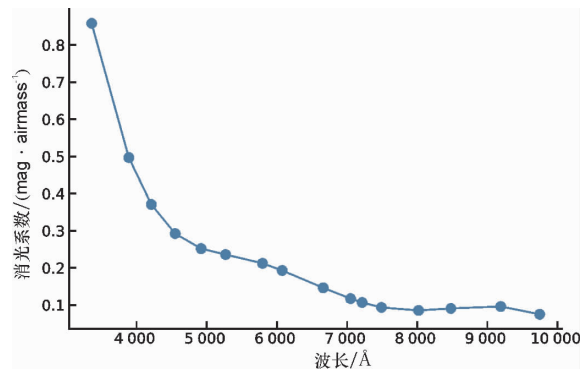


图 8 国家天文台兴隆观测站大气消光曲线

Fig. 8 Atmospheric extinction curve at the XingLong station of the National Astronomical Observatories

(2) 响应函数的生成和光谱流量改正

为了获得光谱的辐射流量,需要使用大气消光曲线和当晚观测得到的标准星光谱(以电子计数为单位)与从标准星库(International Reference, IRS^[15])中得到的标准星光谱(以标准流量为单位)进行对比,结合大气消光曲线,从而得到观测当晚的光谱响应函数,见图 9。这个光谱响应函数用来把目标源的光谱单位由电子计数转化为标准流量,这样就完成了流量定标。图 9 橙色实线光谱展示的是流量定标后目标氢二区的光谱,横坐标是波长(单位为 Å),纵坐标为标准流量密度(单位为 $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Å}^{-1}$)。

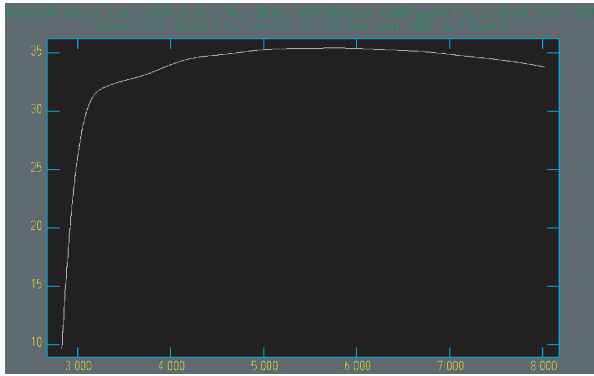


图 9 光谱流量响应函数

Fig. 9 Sensitivity function of Spectrophotometric flux

响应函数的生成借助 PyRAF 中 onedspec-standard 和 sensfunc 任务包完成;标准流量单位的转化借助 PyRAF 中的 onedspec-calibra 任务包完成。

3 光谱数据的进阶处理和测量

3.1 银河消光改正

定标后的氢二区光谱需要进行银河消光改正。银河消光是银河系内星际介质(包括气体和尘埃)对目标天体辐射的减弱作用,主要由星际介质的吸收和散射造成。对于光谱来说,消光程度随波长减小而增大。消光程度随波长关系的量化就是消光曲线。

本工作采用 Cardelli 等^[23]得到(后文简称 CCM)的消光曲线对 NGC 0925 的氢二区光谱进行银河消光改正。银河系的消光比率为 $R_V = A(V)/E(B - V) = 3.1$, NGC 0925 在 V 波段的银河消光为 $A(V) = 0.208 \text{ mag}$ ^[24]。CCM 消光曲线的数学表达式为

$$\frac{A(\lambda)}{A(V)} = a(x) + \frac{b(x)}{R_V}, \quad (3)$$

式中, $A(\lambda)$ 是波长为 λ 处的银河消光; $a(x)$ 和 $b(x)$ 是由 CCM 中与波长相关的系数。其中, $x = 1/\lambda$, 令 $y = (x - 1.82)$, 在 $1.1 \mu\text{m}^{-1} < x < 3.3 \mu\text{m}^{-1}$ 时,

$$\begin{aligned} a(x) &= 1 + 0.17699y - 0.50447y^2 - \\ &\quad 0.02427y^3 + 0.72085y^4 + 0.01979y^5 - \\ &\quad 0.77530y^6 + 0.32999y^7, \\ b(x) &= 1.41338y + 2.28305y^2 + 1.07233y^3 - \\ &\quad 5.38434y^4 - 0.62251y^5 + 5.30260y^6 - \\ &\quad 2.09002y^7. \end{aligned} \quad (4)$$

图 10 展示的是银河消光改正前后的光谱比较。

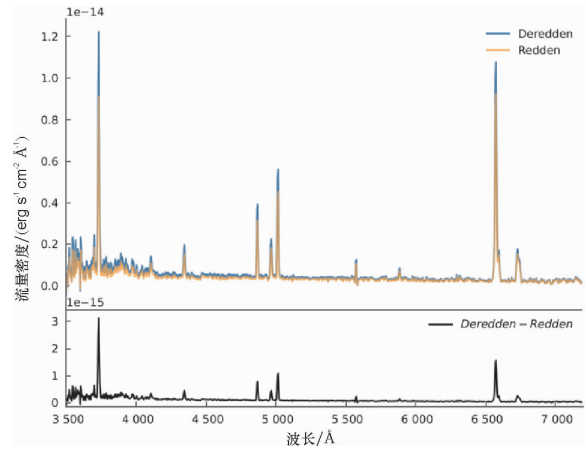


图 10 氢二区银河消光改正前后光谱比较图

Fig. 10 The comparison of the spectra for the target HII region before and after the correction for Galactic extinction

注:图中橙色线表示银河消光改正前的光谱,蓝色线表示银河消光改正后的光谱,黑色线表示银河消光改正后与银河消光改正前的差值光谱(即蓝色线与橙色线的差值)。

从图 10 可见,银河消光改正后的光谱与银河消光改正前的光谱比较,改正后的光谱流量密度变高了,连续谱的整体斜率变得更陡了。通过 PyRAF 中的 deredden 任务包完成。

3.2 光谱发射线测量

3.2.1 谱线证认

银河消光改正完成以后,就可以测量光谱中的发射线了。在测量发射线之前,对光谱发射线进行了证认。如图 11,目标氢二区的光谱中,包含 $\text{H}\alpha$ 、 $\text{H}\beta$ 、 $\text{H}\gamma$ 等氢元素的复合线, $\text{HeI } \lambda 5877$ 等氦元素的复合线,以及 $[\text{OII}] \lambda 3727$ 、 $[\text{OIII}] \lambda\lambda 4969, 5007$ 、 $[\text{N II}] \lambda\lambda 6549, 6583$ 、 $[\text{S II}] \lambda 6717$ 、 $[\text{S II}] \lambda 6731$ 等金属元素的碰撞激发线。

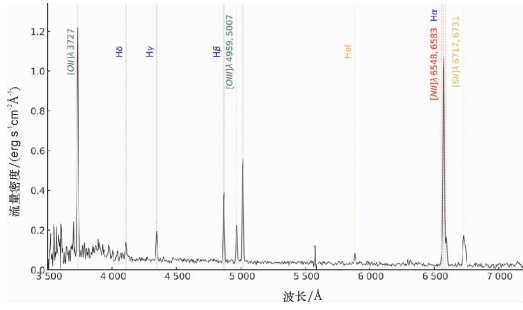


图 11 目标氢二区光谱

Fig. 11 The spectrum for the target HII region

注:图中黑色线表示光谱,其中的主要光谱发射线已被标注。

3.2.2 谱线轮廓拟合和流量估计

发射线的流量是发射线轮廓包围的光谱区域的面积。谱线的轮廓由谱线的自然宽度、粒子间的碰撞以及粒子热运动相对于观测者的速率不同而发生的多普勒效应共同决定。理论上的谱线轮廓是由洛伦兹轮廓(自然线宽和碰撞致宽的合成效应而产生的轮廓)和多普勒轮廓(多普勒效应产生的轮廓)卷积得到的沃伊特轮廓^[25-26]。实际工作中,高斯分布函数通常能够很好地刻画观测到的谱线轮廓。本工作中,采用高斯分布函数拟合的方法来估计光谱发射线的流量。

对于氢二区,因为光谱中包括连续谱,所以发射线并不是以零流量水平为基础。在发射线附近的连续谱可以近似地视为线性函数。因此,在拟合某一条发射线的轮廓时,采用一个高斯分布函数加一个线性函数进行

拟合。高斯分布函数的数学表达式为

$$f(\lambda) = Ae^{\frac{-(\lambda-\lambda_0)^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

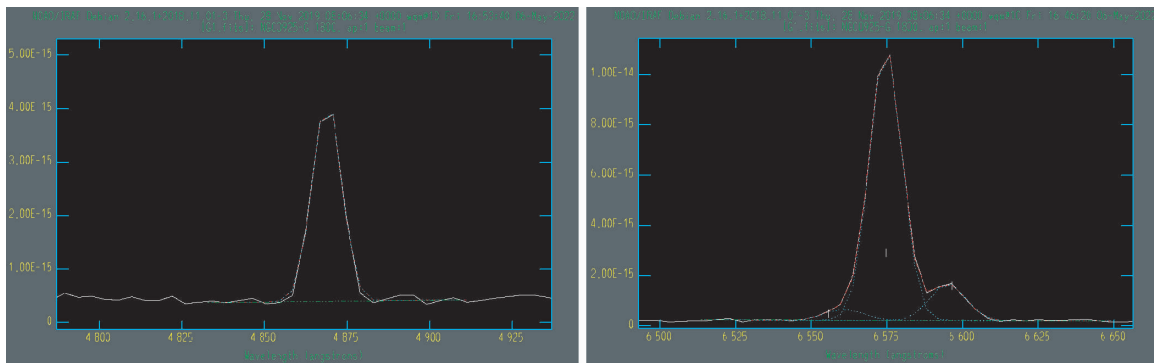
式中, λ 为波长; λ_0 为高斯分布的中心(峰值)处的波长; σ 是高斯分布函数的方差; A 为常数。

发射线的流量为高斯分布函数轮廓包围区域的面积:

$$Flux = A\sigma \sqrt{2\pi}. \quad (6)$$

在 PyRAF 的 `splot` 包中采用高斯核函数对谱线两边拟合时会自动采用高斯核函数加一次函数的模型。除了谱线的流量,还测量了谱线的线心波长(central wavelength)、谱线的半高全宽(Full Width at the Half Maximum, FWHM)、谱线的等值宽度(Equivalent Width, EW)等信息。谱线的线心波长是高斯分布函数轮廓的中心位置,FWHM 是高斯分布函数轮廓最高点的一半对应的轮廓高度,等值宽度是与谱线和连续谱所包围的面积相等但长度为 1 的矩形宽度(谱线流量与相应波长范围的连续谱流量的比值)。

测量的发射线包括 [OII] λ 3727、H β 、[OIII] λ 4959、[OIII] λ 5007、[NII] λ 6548、H α 、[NII] λ 6583、[SII] λ 6717、[SII] λ 6731,其中,[NII] λ 6548、H α 、[NII] λ 6583 以及 [SII] λ 6717、[SII] λ 6731 由于相距较近而出现位置耦合,分别采用三高斯轮廓拟合和双高斯轮廓拟合来解开谱线位置耦合。图 12 作为示例展示了单高斯轮廓拟合和三高斯轮廓拟合的结果。



(a) H β 发射线的测量:单高斯轮廓拟合

(b) H α 和 [NII] λ 6549,6583 发射线的测量:三高斯轮廓拟合

图 12 发射线轮廓拟合示意图

Fig. 12 Emission-line profile fitting

注:两幅图中横轴表示波长(单位是 \AA),纵轴表示流量密度(单位是 $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$),白色实线是观测数据,红色虚线是拟合函数的合成轮廓,蓝色虚线为每条发射线各自的拟合轮廓,绿色虚线是连续谱。

3.2.3 测量误差的估计

对于测量得到的发射线流量还需要估计测量误差。发射线流量的测量误差由下式得到:

$$\sigma_{line} = \sigma_{con} \sqrt{N_{pix} \left(1 + \frac{EW_{line}}{N_{pix} \Delta\lambda}\right)}, \quad (7)$$

其中, σ_{line} 是发射线流量的测量误差; σ_{con} 为发射线附

近连续谱的标准偏差(即连续谱涨落噪声); N_{pix} 是发射线覆盖的像素数目; EW_{line} 为发射线的等值宽度; Δ_λ 为光谱数据的色散分辨率($\text{\AA}/\text{pixel}$)^[27-28]。其中, N_{pix} 可以用拟合的高斯轮廓覆盖像素数目代替:

$$N_{pix} = 6\sigma/\Delta_\lambda, \quad (8)$$

式中, $\sigma = FWHM/2.355$,是高斯轮廓的方差; 6σ 为高斯轮廓的宽度。对式(7)进行换算得到最终的发射线流量估计公式:

$$\sigma_{line} = \frac{\sigma_{con}}{\sqrt{\Delta_\lambda}} \sqrt{6\sigma \left(1 + \frac{EW_{line}}{6\sigma}\right)}, \quad (9)$$

式中, σ 是高斯轮廓的标准偏差; EW_{line} 是发射线的等值宽度。其中, $\sigma = FWHM/2.355$, $FWHM$ 和 EW_{line} 在拟合高斯轮廓时输出。

使用 DS9 软件在 NGC 0925 的 H α 窄带图像和狭缝放置图确定该氢二区的赤经 $2^h 27^m 10.5^s$, 赤纬 $+33^\circ 36' 12.5''$ 。谱线的测量结果见表 1。

表 1 NGC 0925 中一个氢二区的谱线流量测量结果

Table 1 Spectral line flux measurements in the HII region of the NGC 0925 $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$

氢二区 发射线	测量谱线流量	消光改正后谱线流量
[O II] λ 3727	$1.367\text{E} - 13 \pm 3.524\text{E} - 15$	$3.390\text{E} - 13 \pm 1.407\text{E} - 14$
H γ	$1.644\text{E} - 14 \pm 2.734\text{E} - 16$	$3.640\text{E} - 14 \pm 1.199\text{E} - 15$
H β	$4.160\text{E} - 14 \pm 2.718\text{E} - 16$	$8.270\text{E} - 14 \pm 2.103\text{E} - 15$
[O III] λ 4959	$2.131\text{E} - 14 \pm 2.954\text{E} - 16$	$4.160\text{E} - 14 \pm 1.152\text{E} - 15$
[O III] λ 5007	$6.169\text{E} - 14 \pm 3.498\text{E} - 16$	$1.200\text{E} - 13 \pm 2.906\text{E} - 15$
[N II] λ 6548	$5.050\text{E} - 15 \pm 1.093\text{E} - 16$	$8.200\text{E} - 15 \pm 2.271\text{E} - 16$
H α	$1.460\text{E} - 13 \pm 4.788\text{E} - 16$	$2.370\text{E} - 13 \pm 4.156\text{E} - 15$
[N II] λ 6583	$2.129\text{E} - 14 \pm 3.134\text{E} - 16$	$3.440\text{E} - 14 \pm 7.795\text{E} - 16$
[S II] λ 6717	$1.949\text{E} - 14 \pm 2.996\text{E} - 16$	$3.120\text{E} - 14 \pm 7.083\text{E} - 16$
[S II] λ 6731	$1.551\text{E} - 14 \pm 3.016\text{E} - 16$	$2.480\text{E} - 14 \pm 6.348\text{E} - 16$

3.3 星系内消光改正

观测得到的河外星系氢二区的光谱还受星系内部当地尘埃消光(星系内消光)的影响,因此,还需要对光谱发射线流量的测量值进行星系内消光改正。本工作中,采用“巴尔默减幅”(Balmer Decrement)的方法改正星系内消光。

“巴尔默减幅”的消光改正方法基于光致电离的 Case B 假设。在 Case B 中,电离气体产生的 H α 与 H β 发射线的本征流量比($(\text{H}\alpha/\text{H}\beta)_{int}$)在一定的电子温度和电子密度条件下是定值。当电子温度 $T_e = 10\,000\text{ K}$ 、电子密度为 $n_e = 100\text{ cm}^{-3}$ 时, $(\text{H}\alpha/\text{H}\beta)_{int} = 2.86$ ^[8,29,30]。

当观测到的 $(\text{H}\alpha/\text{H}\beta)_{obs} > 2.86$ 时,被认为是由尘埃消光造成,这时对光谱进行尘埃消光改正;当观测到的 $(\text{H}\alpha/\text{H}\beta)_{obs} \leq 2.86$ 时,则不进行尘埃消光改正。

根据 $(\text{H}\alpha/\text{H}\beta)_{int} = 2.86$ 结合 CCM 消光曲线得到 H α /H β 的改变与尘埃消光的关系为

$$E(B-V) = \frac{2.5}{k_{\text{H}\alpha} - k_{\text{H}\beta}} \log\left(\frac{(\text{H}\alpha/\text{H}\beta)_{obs}}{2.86}\right). \quad (10)$$

由 $E(B-V)$ 可以得到消光改正后的发射线流量:

$$F(\lambda)_{int} = F(\lambda)_{obs} 10^{k_\lambda E(B-V)}, \quad (11)$$

式(11)中, $E(B-V)$ 是色余值; $F(\lambda)_{int}$ 为消光改正后的发射线流量; $F(\lambda)_{obs}$ 为观测到(消光改正前)的发射线流量; $k_\lambda = R_V a(x) + b(x)$ (其他参数定义见第 4.1 节)。对于本工作中研究的氢二区,由式(10)得到 $E(B-V) = 0.207 \pm 0.007\text{ mag}$,再由式(11)得到各条发射线消光改正后的流量。表 1 列出了消光改正前后每条发射线的流量值。

4 氢二区物理参数的计算和结果呈现

从第 3 节中得到的光谱发射线的流量可以获得氢二区的一系列物理参数,包括星系内消光、恒星形成率、氧元素丰度等。这一节呈现的是如何通过发射线流量计算这些物理参数,以及对这些物理参数的分析。

4.1 星系内消光

由第 3.3 节中的式(10),可以得到色余 $E(B-V) = 0.207 \pm 0.007\text{ mag}$,再利用消光比率 $R_V = 3.1$ 得到 V 波段的消光 $A_V = 0.641 \pm 0.023\text{ mag}$,说明这个氢二区约 55% 的 V 波段辐射被星系 NGC 0925 中的尘埃介质吸收或散射了。

4.2 恒星形成率

氢二区是恒星形成的场所,恒星形成活动的强弱是氢二区的重要性质。反映恒星形成活动强弱的参数是恒星形成率(Star Formation Rate,简称 SFR),它指每年形成的恒星质量,通常以太阳质量为单位($M_\odot \text{ yr}^{-1}$)。SFR 的大小与 H α 发射线的光度($L(\text{H}\alpha)$)相关。利用 $L(\text{H}\alpha)$ 与 SFR 的定标关系就可以通过 H α 发射线获得 SFR 的数值。在本工作中,采用如下定标关系计算 SFR^[31],这个定标是被最广泛应用的 SFR 定标关系:

$$\text{SFR}(M_\odot \text{ yr}^{-1}) = 7.9 \times 10^{-42} L(\text{H}\alpha) (\text{erg s}^{-1}), \quad (12)$$

式中, $L(\text{H}\alpha)$ 的单位是 erg s^{-1} 它与 H α 发射线的流量之

间的关系如下:

$$L(H\alpha) = 4\pi D^2 F(H\alpha), \quad (13)$$

式中, D 为 NGC 0925 到地球的距离(以 cm 为单位), $F(H\alpha)$ 是 $H\alpha$ 发射线的流量。

由上式得到本工作中研究的氢二区的恒星形成率 $SFR = 0.019 \pm 0.001 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ 。这个结果表示该氢二区每年产生 0.019 个太阳质量的恒星。

SFR 的大小与测量面积相关。为方便比较不同天体,人们通常把 SFR 归算到单位测量面积,即恒星形成率面密度 $\sum_{SFR} = SFR/Area$, $Area$ 指测量的面积(单位为 Kpc)。本工作中,计算了所研究氢二区的恒星形成率面密度,其中的测量面积为抽谱孔径的面积(对应星系 NGC 0925 当地的实际面积。该区域在 NGC 0925 上的面积可以近似用平面几何投影改正并计算^[32-33] :

$$\begin{aligned} Area_{project} &= s_l s_w D^2, \\ Area &= Area_{project} / \cos(i), \end{aligned} \quad (14)$$

式中, $Area_{project}$ 是 NGC 0925 在天球投影面积大小; s_l 、 s_w 、 i 分别是狭缝中抽谱时的孔径长度、狭缝的宽度、星系的倾斜角(角度的单位均取弧度制)。由以上算式计算得到氢二区 $\sum_{SFR} = 0.104 \pm 0.006 M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}$ 。也就是说,每年该氢二区 1 000 平方秒差距里约产生 0.104 个太阳质量的恒星。

4.3 氧元素丰度

在天文学中,氢和氦以外的元素都称为金属元素。宇宙中,氧元素的含量相比于其他金属元素占比更高,所以星系与星际介质的金属元素通常是指氧元素丰度。氧元素丰度是氧的数密度相对于氢的数密度之比,即 $12 + \log(N_O/N_H)$, 记为 $12 + \log(O/H)$ 。

在观测上,通常是通过测量电子温度来确定氧元素丰度,这也是目前最直接的方法。确定电子温度,需要同时测量到极光线和较低激发态的碰撞激发线,如 $[O\text{I-}II] \lambda 4363$ 极光线和 $[O\text{III}] \lambda 4959, 5007$ 碰撞激发线,通过它们之间的关系确定电子温度。但随着金属丰度的升高, $[O\text{III}] \lambda 4363$ 的辐射通量会衰减,甚至无法被观测到。因此,还需要其他的方法来计算氧丰度——强线法,强线法是通过 H 的复合线以及 O、N、S 等较强的碰撞激发线来确定氧的金属丰度^[9]。对于太阳, Asplund 等^[34] 得到太阳光球层的氧丰度为 $12 + \log(O/H)_{\odot} = 8.69 \pm 0.05 \text{ dex}$ 。Dopita 等^[35] 基于光致电离模型提出 $N2S2H\alpha$ 的强线法计算氧丰度,该方法几乎不依赖电离参数和尘埃消光。本文也将以 Dopita 等提出的 $N2S2H\alpha$

方法计算氧丰度。Dopita 中的 $N2S2H\alpha$:

$$\begin{aligned} 12 + \log(O/H) &= 8.77 + N2S2H\alpha + \\ &0.45(N2S2H\alpha + 0.3)^5, \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $N2S2H\alpha = \log([NII] \lambda 6583/[SII] \lambda \lambda 6717, 6731) + 0.264 \log([NII] \lambda 6583/H\alpha)$ 。

由上式得到该氢二区的氧元素丰度为 $12 + \log(O/H) = 8.337 \pm 0.014 \text{ dex}$ 。该氢二区的氧元素丰度低于太阳丰度,约为太阳丰度的 0.44 倍。

5 讨论

在以上结果中,除了已经量化的误差,在观测、数据处理、计算过程中还可能引入额外误差未被记入量化结果的情况。现对这些额外误差进行如下讨论:

(1) 观测当晚的实测视宁度约 3", 而狭缝宽度约 2.5" (狭缝宽度设为观测台址平均视宁度), 这可能将会对观测目标的辐射流量造成一定的损失。

(2) 选择氢二区狭缝中的一些弱信号部分作为背景, 这一部分背景可能涵盖其他比较暗弱的氢二区, 扣除这样的背景将导致发射线流量和流量比的额外误差。然而在抽谱时, 背景区域在 $H\alpha$ 空间轮廓图上没有明显可见的突出信号, 猜测是由于背景区域的选取而产生的误差小于已经量化的误差的原因。

(3) 抽谱时的色散追踪选用了标准星的色散轨迹, 由于不是同一次观测, 望远镜的指向和狭缝的转角都发生了变化, 因此, 标准星的色散轨迹可能并非与目标源的色散轨迹一致。然而参照标准星对于当前数据来说是唯一适合并可用的对目标源的色散轨迹进行追踪的方法。这一额外误差(如有)很难估计其影响, 但是不采用这种方法, 产生的误差只会更大。

(4) 星系内消光改正采用的“巴尔默减幅”方法是假定了一定的电子温度和密度下 $(H\alpha/H\beta)_{int} = 2.86$ 而进行的, 但实际的氢二区中的电子密度和温度可能并不与假设完全一致, 在这种情况下 $(H\alpha/H\beta)_{int}$ 不一定为 2.86, 如果仍然用 $(H\alpha/H\beta)_{int} = 2.86$ 就会产生额外误差。这一点可能广泛存在于很多工作中, 尤其是大样本研究。在未来的工作中, 将深入、细致研究这种传统的尘埃消光改正方法在河外星系光谱学研究中产生的额外误差究竟有多大。

(5) 本工作的氧元素丰度的误差小于 1%。采用了 van Zee 等^[36] 测量的该氢二区发射线流量用相同的方法计算的氧元素丰度为 $8.238 \pm 0.030 \text{ dex}$, 结果相差约

0.1 dex。该结果之间的差异可能来自于观测条件不同和数据处理过程中存在的差异。而观测条件的不同主要包括望台址的大气消光、观测设备、观测当晚视宁度、天光背景、观测狭缝的大小和观测时狭缝覆盖氢二区的位置等。数据处理过程中存在的差异包括光谱背景选取、孔径大小和位置的选择、光谱色散轨迹的追踪以及消光曲线的选择等因素。

6 总 结

本文呈现的工作是利用国家天文台 2.16 m 望远镜对河外星系 NGC 0925 中的氢二区进行的光谱观测,以及对观测得到的原始数据进行的处理、测量、分析。对原始数据的处理包括本底改正、平场改正、宇宙线的剔除、一维光谱的抽取、波长定标、流量定标以及银河系消光改正。对于处理完成的氢二区的光谱,测量了一系列光谱发射线的流量,这些发射线包括 $H\alpha$ 、 $H\beta$ 、 $H\gamma$ 等氢元素的复合线,以及 $[OII] \lambda 3727$ 、 $[OIII] \lambda 4959$ 、 $[OIII]$

$\lambda 5007$ 、 $[NII] \lambda 6549$ 、 $[NII] \lambda 6583$ 、 $[SII] \lambda 6717$ 、 $[SII] \lambda 6731$ 等金属元素的碰撞激发线。通过采用“巴尔默减幅”的方法,估计了氢二区的星系内消光,并对谱线流量进行了星系消光改正。

基于观测光谱,本工作获得了该氢二区的星系内消光、恒星形成率、氧元素丰度等物理参数的值。在 V 波段的星系内消光 $A_V = 0.641 \pm 0.023$ mag; 恒星形成率 $SFR = 0.019 \pm 0.001 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$, 恒星形成率面密度 $\sum_{SFR} = 0.104 \pm 0.006 M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}$; 氧元素丰度 $12 + \log(O/H) = 8.337 \pm 0.014$ dex, 为太阳丰度的 0.44 倍。

截至目前,已经观测了 NGC 0925 中近 30 个氢二区,接下来将用同样的数据处理和测量方法获得谱线流量,进一步研究光谱特征和物理参数在星系中的空间分布,以及氢二区的性质在星系中的空间变化,并由此推断星系的形成和演化过程。

致谢:感谢兴隆 2.16 m 望远镜全体工作人员的支持。本文部分工作得到中国科学院光学天文重点实验室开放课题资助。

参考文献:

- [1] 谭徽松,李银柱,金振宇. 实测天体物理[M]. 北京:国防工业出版社,2014.
- [2] 林胜利. 科学级 CCD 成像系统关键技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2016.
- [3] 王传晋,叶彬浔,孟新民. 电荷耦合器件(CCD)及其在天文学中的应用[J]. 天文学进展,1983(2):222-233.
- [4] Kitchin C R. 天体物理方法[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [5] 黄佑然,唐玉华,徐敖敖,等. 实测天体物理学[M]. 北京:科学出版社,1987.
- [6] 皮埃尔·莱纳,丹尼尔·鲁昂,弗朗索瓦·勒布伦,等. 观测天体物理学[M]. 北京:中国科学技术出版社,2015.
- [7] Binney J. 星系天文学[M]. 北京:中国科学技术出版社,2004.
- [8] Osterbrock D E, Ferland G J. Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei[M]. Sausalito:University Science Book,2006.
- [9] Maiolino R, Mannucci F. De re metallica: The cosmic chemical evolution of galaxies[J]. APPR,2019,27(1):3.
- [10] Fan Z, Wang H, Jiang X, et al. The Xinglong 2.16-m telescope: Current instruments and scientific projects[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific,2016,128(969):115005.
- [11] De Vaucouleurs G, de Vaucouleurs A, Corwin J, et al. Third reference catalogue of bright galaxies[M]. New York:Springer-Verlag,1991.
- [12] Moustakas J, Kennicutt J, Robert C, et al. Optical spectroscopy and nebular oxygen abundances of the spitzer/SINGS galaxies[J]. Astronomical Journal Supplementary Series,2010,190(2):233-266.
- [13] Freedman W L, Madore B F, Gibson B K, et al. Final results from the Hubble space telescope key project to measure the Hubble constant[J]. The Astrophysical Journal,2001,553(1):47-72.
- [14] Kong X, Lin L, Li J R, et al. Spectroscopic observations of the star formation regions in nearby galaxies[J]. Acta Astronomica Sinica,2014,55(1):29-39.
- [15] Corbin T E, Warren J. International reference stars catalog (Corbin 1991). Documentation for the machine-readable version [M]. Washington: Naval Observatory,1991.
- [16] Massey P. A user's guide to CCD reductions with iraf[EB/OL]. (1997-02-15)[2022-06-21]. <http://iraf.nao.ac.jp/iraf/ftp/iraf/docs/ccduser3.ps.2>.

- [17] 张居甲. IRAF 一维光谱处理入门[EB/OL]. (2016-01-15)[2022-06-21]. <http://wiki.gmg.org.cn/download/attachments/557104/IRAF%E4%B8%80%E7%BB%B4%E5%85%89%E8%B0%B1%E5%A4%84%E7%90%86%E5%85%A5%E9%97%A8.%E4%BF%AE%E8%AE%A2%E7%89%88.pdf?version=1&modificationDate=1510626328000>.
- [18] 黄磷, 吴宏, 李红斌. BFOSC 使用说明[EB/OL]. (2015-04-26)[2022-06-21]. http://chjaa.bao.ac.cn/attached/File/20150426/BFOSCmanualv2.2_chinese.doc.
- [19] Massey P, Valdes F, Barnes J. A user's guide to reducing slit spectra with iraf[EB/OL]. (1992-04-15)[2022-06-21]. <https://noirlab.edu/science/sites/default/files/media/archives/documents/scidoc0479.pdf>.
- [20] 任娟娟, 李红斌, 赵勇, 等. OMR 定标灯谱线证认手册[EB/OL]. (2018-10-17)[2022-06-21]. http://chjaa.bao.ac.cn/attached/File/20181017/201810171358358_285.pdf.
- [21] 胡波. 高美古观测站大气消光系数测定的初步结果[J]. 天文学报, 2010, 51(4): 422-431.
- [22] Kong X, Zhou X, Chen J, et al. Spatially resolved spectrophotometry of M81: Age, metallicity, and reddening maps[J]. The Astronomical Journal, 2000, 119(6): 2745-2756.
- [23] Cardelli J A, Clayton G C, Mathis J S. The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction[J]. The Astrophysical Journal, 1989, 345: 245.
- [24] Schlafly E F, Finkbeiner D P. Measuring reddening with sloan digital sky survey stellar spectra and recalibrating SFD[J]. The Astrophysical Journal, 2011, 737(2): 103.
- [25] Karttunen H, Kröger P, Oja H, et al. Fundamental astronomy[M]. Berlin: Springer, 2007.
- [26] Léna P, Rouan D, Lebrun F, et al. Observational astrophysics[M]. Belin; Springer, 2021.
- [27] Castellanos M, Díaz A I, Terlevich E. A comprehensive study of reported high-metallicity giant H II regions-I. Detailed abundance analysis[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2002, 329(2): 315-335.
- [28] Mao Y W, Lin L, Kong X. Internal variations in empirical oxygen abundances for giant H II regions in the galaxy NGC 2403[J]. The Astrophysical Journal, 2018, 853(2): 151.
- [29] Hummer D G, Storey P J. Recombination-line intensities for hydrogenic ions-I. Case B calculations for H I and He II. [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1987, 224: 801-820.
- [30] 毛业伟. 近邻星系中星族和尘埃的紫外红外观测特征研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- [31] Kennicutt J, Robert C. Star formation in galaxies along the Hubble sequence[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1998, 36: 189-232.
- [32] Wei P, Zou H, Kong X, et al. Physical properties of H II regions in M51 from spectroscopic observations[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2020, 132(1015): 094101.
- [33] Kennicutt J, Robert C, Calzetti D, et al. Star formation in NGC 5194 (M51a). II. The spatially resolved star formation law[J]. The Astrophysical Journal, 2007, 671(1): 333-348.
- [34] Asplund M, Grevesse N, Sauval A J, et al. The chemical composition of the sun[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2009, 47(1): 481-522.
- [35] Dopita M A, Kewley L J, Sutherland R S, et al. Chemical abundances in high-redshift galaxies: A powerful new emission line diagnostic[J]. Astrophysics and Space Science, 2016, 361: 61.
- [36] van Zee L, Salzer J J, Haynes M P, et al. Spectroscopy of outlying H II regions in spiral galaxies: Abundances and radial gradients[J]. The Astronomical Journal, 1998, 116(6): 2805-2833.

【责任编辑: 陈 钢】

(内文见第 76 页)

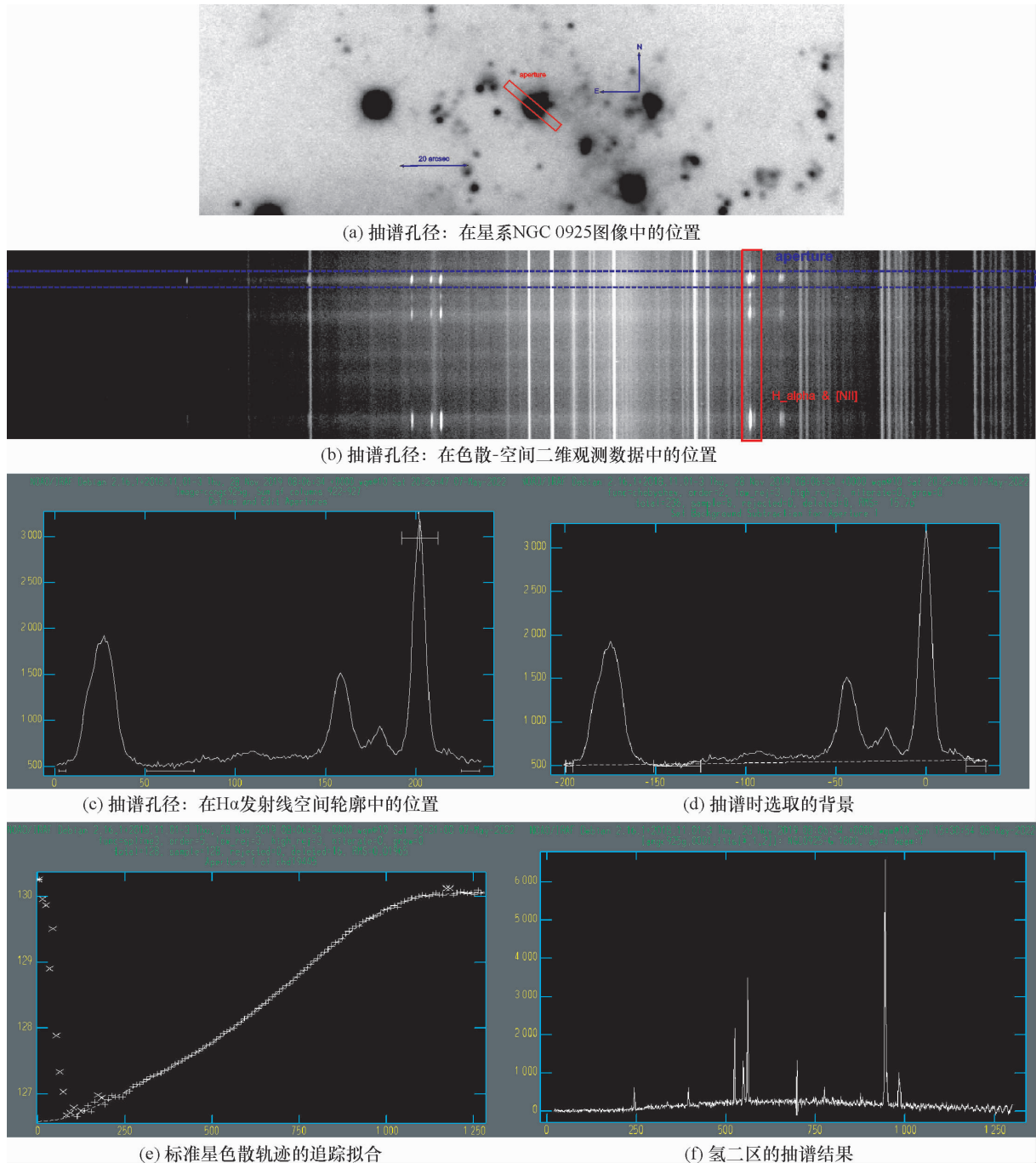


图 6 一维光谱的抽取

Fig. 6 Extraction of one-dimensional spectra

注：图(a)：NGC 0925 中目标氢二区的 H α 窄波段图像，其中红色方框为抽谱时孔径。图(b)：剔除宇宙线后的色散 - 空间二维观测数据，其中红色实线矩形框标记了 H α 和 [NII] $\lambda\lambda$ 6548, 6584 发射线所在位置，蓝色点线矩形框标记了目标氢二区光谱的色散方向（抽谱孔径所在位置）。图(c)和图(d)：观测数据中 H α 发射线空间轮廓，图(c)中标出了抽谱孔径位置和大小（目标氢二区），图(d)标出了背景区域及背景拟合结果；图中横轴是二维光谱图像空间方向的像素坐标 (pixels)，图(d)横轴以孔径中心为起点，纵轴是 H α 色散方向附近几个像强度之和 (counts)。图(e)：标准星色散轨迹的拟合结果，横轴是色散方向的像元坐标 (pixels)，纵轴是空间方向的像元坐标。图(f)：氢二区抽谱的结果，横轴是色散方向的像元坐标，纵轴是图像的强度 (counts)。