

猎户座分子云团中弥散电离介质的视向速度及线强度比分布*

吴金泰^{1,2†} 蒋思艺^{1,2} 雷磊^{1,2} 陈丙秋^{2‡}

(1 云南大学物理与天文学院 昆明 650500)

(2 云南大学中国西南天文研究所 昆明 650500)

摘要 恒星形成区是研究恒星形成物理过程最重要的天体物理实验室. 猎户座分子云团是研究各种质量恒星形成和相关年轻恒星性质的一个著名天区. 通过对恒星形成区的光学光谱分析, 可以获取其内部热电离气体的运动学和化学性质. 基于国家大科学装置郭守敬望远镜(LAMOST)的光谱观测数据, 从LAMOST I期光谱巡天数据中筛选出8个指向猎户座分子云团的观测面板, 获取了1300多条针对猎户座分子云团内弥散电离介质的有效光谱. 选取不受星际介质污染的背景天光光谱构建超级天光, 对这些光谱数据做减天光处理, 并进一步测量其发射线性质, 包括 $H\alpha$ 、 $[N\ II]\ \lambda\ 6584$ 、 $[S\ II]\ \lambda\lambda\ 6717$ 和 6731 等发射线的中心波长和积分流量等. 最后给出猎户座分子云团内弥散电离介质的视向速度和线强度比分布情况.

关键词 恒星: 形成, 星际介质: 云, 星际介质: 运动学和动力学, 技术: 光谱学

中图分类号: P155; **文献标识码**: A

1 引言

猎户座分子云团(Orion Molecular Cloud Complex)是目前人们了解最多、研究也最为深入的恒星形成区^[1]. 它是研究恒星形成过程和恒星形成区自身演化的重要实验室, 对研究不同质量恒星形成的物理机制, 周围气体云的产生、演化和塌缩, 星际介质的动力学与能量, 年轻的大质量恒星和星际气体相互作用等有重要作用^[2-3]. 猎户座分子云团主要位于赤经(RA) 73° – 102° 、赤纬(Dec) -12° – -13° 范围内, 距离太阳400 pc左右^[4], 由Orion A、Orion B、 $\lambda\ Ori$ 、 $\sigma\ Ori$ 等多个子结构组成.

猎户座分子云团是一个气尘比较小的巨分子云复合体(Giant Molecular Cloud Complex). 它是距离太阳系最近的大质量恒星形成区^[5-6]. 其中, 位于Orion A子结构中的猎户座大星云(M42, Orion Nebula Cluster)是此区域中著名的发射星云, 也是全天最明亮的气体星云, 含有大量的弥散气体和年轻恒星. García-Díaz等^[7]利用光谱中的低电

2020-04-29收到原稿, 2020-08-01收到修改稿

*云南大学校级大学生科研创新训练项目(201804115)资助

†jtwu_sci@163.com

‡bchen@ynu.edu.cn

离发射线描绘出了猎户座大星云的速度结构. 猎户座分子云团内大量的大质量O型星和B型星组成了OB星协, 比如Ori OB1a星协和Ori OB1b星协^[4]. 在Ori OB1星协的相邻位置上年轻星团 σ Ori, 其与Ori OB1星协的关系尚不明确^[8]. 过去的测光和低分辨率光谱观测(如Zapatero Osorio等^[9])表明, 在 σ Ori内部有大量的低质量恒星形成. 在 σ Ori和Ori OB1星协的外围有一个巨大的弧状发射星云结构, 这就是巴纳德环(Barnard's Loop)^[10]. 巴纳德环的起源有多种解释, 一些研究认为这是曾经发生过的超新星爆炸^[11-12]所产生的泡状结构(bubble), 另外的研究则认为这是由于Ori OB1星协中大量OB型星的光电离所致^[13]. 在整个猎户座区域的上方也有一个OB型星的聚集区域, 它们与周围的气体云团形成了 λ Ori星团. 天文学家推测, 大约1 Myr前在其中心曾经发生过一次超新星爆炸, 其激波推动了周围的分子云塌缩和新恒星诞生^[14]. 过去的研究在 λ Ori周围还发现了直径约为 9° 的尘埃环状结构^[15], 界定了其中心恒星电离周围气体所形成电离氢区的范围. 而猎户座尘埃环(Orion Dust Ring)是猎户座复合体中另一个著名的泡状结构^[16], 但其中心区域内并没有发现大质量恒星聚集的星团. 我们比较熟悉的Orion A和Orion B就是由于这个泡状结构的膨胀所产生的纤维化分子云.

研究表明, 猎户复合体起源于银河系南半球的高速云团与周围星系盘的碰撞^[17]. 其内部恒星形成活动已经持续了一千多万年, 在长时间的演化下, 剧烈的恒星形成过程使得整个复合体区域演化到较大的空间尺度(> 100 pc)^[18]. 而其内部也有着复杂的演化过程和多种形式的驱动力, 其中大质量的年轻恒星, 如OB型星等天体在塑造恒星形成区的结构上起着主要作用, 促进了包括电离氢区(H II region)在内的多种气体星云类型的产生. 研究发现猎户座分子云团内部存在着年龄在7-10 Myr之间的恒星形成时留下的古老激波^[19], 其吹散原有分子云并形成了特定的气体云结构. 此外, 这些大质量恒星可以将周围的气体电离形成弥散电离介质(Diffuse Ionized Medium). 研究恒星形成区内的弥散电离介质有助于理解恒星形成区内的恒星形成过程和星际气体相互作用的物理图像.

位于河北兴隆的郭守敬望远镜(又称大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜, LAMOST)是我国首个天文大科学装置^[20], 对我国的天文学发展产生了巨大的推动力. 目前LAMOST正在进行第II期正式光谱巡天观测, LAMOST I期巡天已经产生了海量的天体光谱数据, 完成了有关银河系的一系列前沿课题, 产生了众多国际上领先的重要成果. 作为一台反射施密特望远镜, LAMOST有着4 m的有效口径和直径 5° 的大视场. 其焦面分布了16台各含有250根光纤的摄谱仪, 可对目标天区的 20 deg^2 视场内获取4000条覆盖整个光学波段(3700-9000 Å)的低色散(光谱分辨率 $R = 1800$)光谱. LAMOST I期巡天包括银河系巡天和河外星系巡天两部分, 其中LAMOST反银心方向光谱巡天(LSS-GAC)^[21]就是LAMOST银河系巡天的重要组成部分. LSS-GAC的观测天区包括反银心方向银纬 $|b| \leq 30^\circ$, 银经 l 介于 150° - 210° 天区(主巡天)和M31、M33及其邻近天区(LAMOST M31/M33巡天)等.

LAMOST独特的光谱巡天优势可以给恒星形成区的研究提供宝贵机遇, LSS-GAC巡天数据覆盖了部分猎户座分子云团区域. 本文将利用LSS-GAC的光谱数据, 分析研究猎户座分子云团内弥散电离介质的运动学与线强度比分布性质.

2 光谱样本的筛选

基于LAMOST I期光谱巡天数据, 本文挑选了完全或部分覆盖猎户座分子云团区域的8个观测面板. 这8个观测面板在天空中的位置如图1 (a)所示, 其中有两个观测面板的观测天区范围基本一致(但具体光纤指向实际上并不相同). 7个观测面板的观测时间为2017年, 另1个观测面板的观测时间为2013年, 每个观测面板均有3次曝光. 这些观测面板的名称、观测时间、中心坐标、视宁度和曝光时间等详细信息见表1. 我们从这8个观测面板的数据中挑选出了分布在 $74.1^\circ \leq \text{RA} \leq 91.1^\circ$ 、 $-11.2^\circ \leq \text{Dec} \leq 12.7^\circ$ 区域内的有效光纤数据. 如图1 (b)所示, 这些光纤覆盖到了大部分的 σ Ori, 部分的 λ Ori和Ori OB1星协, 小部分的Orion A、Orion B、Barnard's Loop等结构.

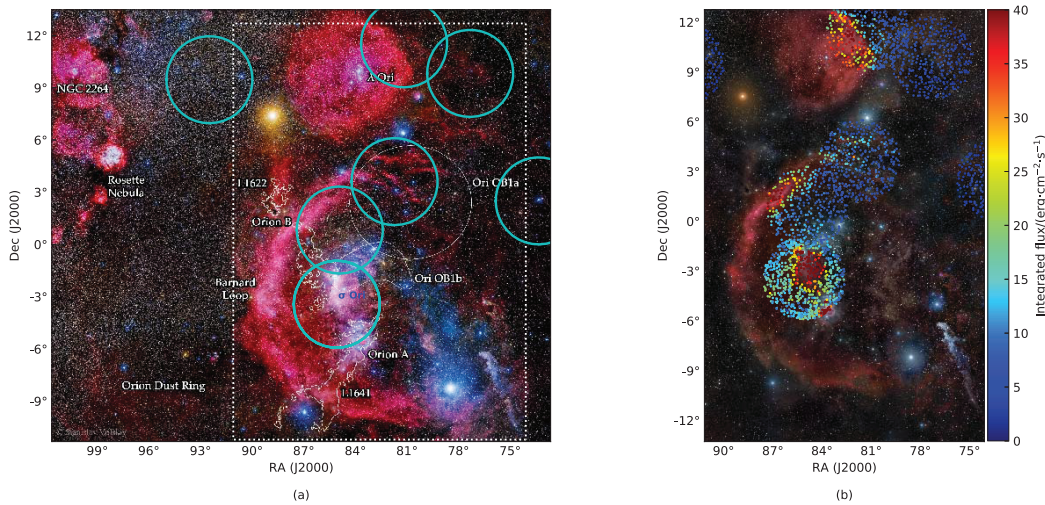


图 1 本文所选的LAMOST观测面板及对应光纤的空间分布. 图(a)的青色大圆代表8个观测面板在天空中的分布, 其中白色虚线方框划出了本工作在猎户座分子云团内的研究区域. 背景图来自Stanislav Volskiy^[4]. 图(b)显示了在本研究的天区内8个观测面板中所筛选光纤的指向分布, 数据点的色标反映了每根光纤的光谱数据在单位曝光时间内H α 发射线的积分流量(以每个观测面板的第1次曝光数据为例). 背景图来自Rogelio Bernal Andreo¹.

Fig. 1 Spatial distributions of the selected LAMOST plates and the corresponding fibers. The cyan circles in panel (a) show the spatial distribution of the 8 selected plates. White dotted box marks the region of the Orion Molecular Cloud Complex that we study in this work. Background image is from Stanislav Volskiy^[4]. Panel (b) shows the spatial distribution of the fibers in the individual plates. The color scale of the individual points represents the flux of H α emission line per second for the individual fibers (the first exposure of each plate). Background image is from Rogelio Bernal Andreo¹.

对于LAMOST每个观测面板观测的原始光谱, 首先都要经过LAMOST光谱处理流程2D流水线程序(LAMOST 2D pipeline)^[22-23]. 标准的光谱处理流程中包括了扣除本底、改正平场、去除宇宙线、抽取一维光谱、波长定标、减天光和合并曝光等步骤. 由于LAMOST标准的2D流水线程序并没有考虑到恒星形成区这样具有弥散电离介质区域的特殊情况, 所以本文所采用的光谱数据是在减天光和合并曝光之前的一维光谱数据,

¹ <http://deepskycolors.com/deepsky.html>

即包含了背景天光的单次曝光光谱.

表 1 本文所选的LAMOST观测面板信息
Table 1 The selected LAMOST plates

Plate ID	Observation date	RA/°	Dec/°	Seeing/''	Exposure time/s
VB081N11V1	2013-10-02	81.1728520	11.5293650	3.00	600, 600, 600
GAC085S03B1	2017-01-01	85.0821830	-3.4270755	3.70	1500, 1500, 1500
GAC085S03M1	2017-01-01	85.0821830	-3.4270750	3.30	1800, 1800, 1800
GAC081N03M1	2017-01-02	81.7261500	3.6146730	2.60	1800, 1800, 1800
GAC084N00M1	2017-01-03	84.9082900	0.8338490	2.70	1800, 1800, 1800
GAC077N09M1	2017-01-24	77.3318410	9.8295790	2.70	1800, 1800, 517
GAC092N09B1	2017-01-30	92.4864550	9.4677598	2.80	1500, 1500, 1500
GAC073N02B1	2017-02-02	73.3448860	2.5082250	2.60	1500, 1500, 1500

LAMOST的所有光纤主要有3种类型, 即目标光纤、天光光纤和无用光纤. 其中目标光纤对准的是恒星等目标天体, 而无用光纤为坏数据不可使用. 每个观测面板约10%–15%的光纤设为天光光纤, 它们观测的一般是天区中的空白区域, 这些空白区域内没有恒星等天体, 可以反映背景天光的性质, 所以被用来构建背景天光光谱以对目标天体做扣除天光处理. 本文所关注的猎户座分子云团的弥散电离气体光谱与普通的恒星等目标光谱不一样, LSS-GAC选源的时候, 并没有把星际介质当做目标源选进去. 因此我们需要从LAMOST的观测面板中挑选出包含星际介质的光谱. 这包含两类, 其中一类是天光光纤. 在挑选空白区域做天光的时候, 没有考虑到星际介质的分布. 因此部分天光光纤指向了星际介质区域, 这些光纤的光谱中就包含了星际介质的信息. 此外对于部分目标光纤光谱, 由于光纤定位不准或者天气等原因, 光谱信噪比非常低, 其光谱信息中不包含目标天体光谱或者目标天体光谱信息非常微弱, 所以这类光谱也可以用来作为天光光纤的光谱进行处理^[24]. 具体地, 在本文中我们挑选蓝端(4600–4700 Å波段内)信噪比低于10的目标光纤作为天光光纤来处理. 我们在筛选出的8个观测面板中挑选出这两类光谱, 然后剔除其中流量异常的坏光谱, 最终得到了不受目标天体光谱污染的包含了星际介质和背景天光信息的光谱样本. 在8个观测面板的第1次曝光数据中, 挑选出了2408条光谱, 其中2119条为天光光纤光谱, 289条属于低信噪比的目标光纤光谱, 其具体指向可见图1 (b). 第2次曝光数据中, 共挑选了2419条光谱, 天光光纤光谱和低信噪比的目标光纤光谱分别为2119条和300条, 第3次曝光数据中, 共挑选了3803条光谱, 两类光谱则分别为2093条和1710条.

3 光谱数据处理

3.1 扣除背景天光

我们挑选得到的光谱样本中包含有背景天光的信息, 因此我们首先对这些光谱进行减天光处理. 在标准的LAMOST光谱数据处理中, 光谱处理流程中将每个观测面板的所有天光光纤利用B样条曲线拟合方法(B-spline fitting)^[23]合并得到可作为夜天光扣除的

超级天光, 并结合主成分分析法(PCA)对其进行修正. 这种处理策略对于没有星际介质污染的天区是有效的, 但对于像猎户座分子云团这样的天区来说, 弥漫状和高度纤维化的气体发射线会对生成的超级天光产生污染. 为了扣除这些污染, Ren等^[24]通过选取未经星际介质污染的天光光谱来构建超级天光, 成功获取了超新星遗迹S147内的气体光谱. 此工作将沿用Ren等^[24]的研究思路, 采用一种新方法重构超级天光. 在猎户座分子云团内, 部分天光光纤(包括低信噪比的目标光纤)指向的区域是弥散气体区域(后面简称气体光纤), 这些区域的光谱受气体影响而产生显著的发射线. 而其余光纤指向的区域则是没有气体或者气体非常微弱的空白区域(后面称为纯天光光纤). 在本文中, 气体光纤包含了星际介质信息, 是我们的研究对象. 而纯天光光纤没有星际介质污染, 可用来构建超级天光, 并对目标光纤做减天光处理.

在猎户座分子云团内, 热电离气体会强烈的H α 发射线, 其中暖电离介质(Warm Ionized Medium)探测的主要依据也是H α 发射线. 因此本文采用H α 的发射线强度来判断该光纤指向区域是否包含弥散电离介质. H α 线强的光纤受弥散电离气体云影响, 因此作为气体光纤, 反之则不受污染以作为纯天光光纤处理. 我们首先计算所有天光光纤光谱H α 发射线的信噪比与流量, 将H α 发射线信噪比大于5且单位曝光时间内H α 流量值大于10的光谱作为气体光谱, 将H α 发射线信噪比小于5或单位曝光时间内H α 流量值小于10的光谱作为纯天光光谱. 图2 (a)和(b)分别给出了这两类光谱的一个例子.

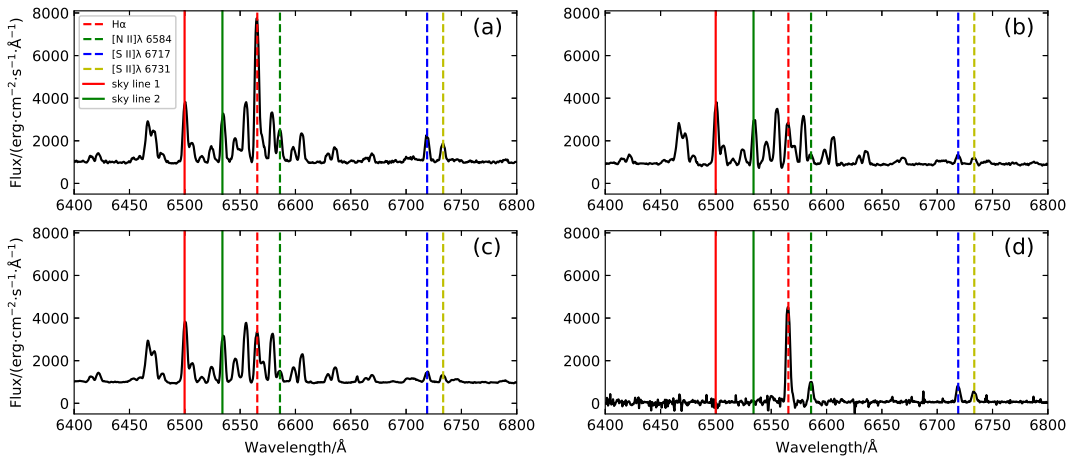


图2 不同类型光谱示例: (a)气体光谱, LAMOST光谱ID为20170103-GAC084N00M1-15-28, (b)纯天光光谱, LAMOST光谱ID为20170103-GAC084N00M1-15-231, (c)超级天光光谱, 对应观测面板为GAC084N00M1的第15个摄谱仪的第1次曝光观测以及(d)纯气体光谱, LAMOST光谱ID为20170103-GAC084N00M1-15-28. 图中实线和虚线分别表示了两条天光线和4条发射线的位置.

Fig. 2 Example spectra of: (a) gas spectrum with LAMOST spectral ID 20170103-GAC084N00M1-15-28, (b) sky light spectrum with LAMOST spectral ID 20170103-GAC084N00M1-15-231, (c) initial super-sky spectrum of the first exposure of the 15th spectrograph of the plate 20170103-GAC084N00M1, and (d) the pure gas spectrum with LAMOST spectral ID 20170103-GAC084N00M1-15-28. Solid and dashed vertical lines mark the positions of the two sky lines and four emission lines, respectively.

接下来我们将利用纯天光光谱构建超级天光并对气体光谱做减天光处理. 这一步与Ren等^[24]的工作类似, 是对不同观测面板中的不同摄谱仪所记录的不同曝光数据分别进行处理. 我们首先对单次曝光数据中每个摄谱仪的所有纯天光光谱以信噪比为权重缩放(scale)到平均值水平. 这个缩放过程分为连续谱缩放和天光线缩放两个部分^[24]. 本文采用的连续谱波段为6400–6800 Å, 天光线为6498 Å和6533 Å两条天光发射线. 然后对缩放后的所有纯天光光谱取平均值作为超级天光. 为使超级天光不受个别异常光纤的干扰, 我们去除了发射线强度异常的纯天光光谱. 最后我们将每个摄谱仪中的气体光谱减去对应的超级天光, 剩下的光谱成分就只包含了弥散气体介质所贡献的光谱(后面称为纯气体光谱). 图2 (c)和(d)则分别展示了超级天光和纯气体光谱的例子. 个别摄谱仪由于完全覆盖在弥散电离气体上(图1), 无法找到纯天光光纤. 我们选取临近摄谱仪的超级天光来扣除背景天光. 最后合并3次曝光的数据后我们得到了1304条纯气体光谱, 用作分析猎户座分子云团中弥散电离介质的性质.

3.2 发射线拟合

弥散电离介质的光学光谱中除了电离气体中强度很大的H α 发射线外, 还有较强的[N II]和[S II]发射线^[24]. 故本文基于上面处理得到的纯气体光谱, 选取了H α 、[N II] λ 6584、[S II] $\lambda\lambda$ 6717和6731共4条发射线(表2)进行相应参数测量.

表 2 本文所挑选的光谱发射线
Table 2 The emission lines selected in this paper

Emission-line	$\lambda_{\text{rest}}^{\text{a}}/\text{\AA}$	Passbands/ \AA
H α	6564.632	6557.6–6571.6
[N II] λ 6584	6585.271	6575.3–6595.3
[S II] λ 6717	6718.294	6711.3–6725.3
[S II] λ 6731	6732.674	6725.7–6739.7

^a Rest wavelengths in vacuum from the National Institute of Standards and Technology²

LAMOST的光谱数据在前期处理过程中需要进行波长定标, 波长定标的精确度直接影响了拟合的可靠性. 光谱的波长定标主要借助弧光灯的发射线实现, 所以波长定标误差的产生主要来自于对弧光灯发射线的中心波长测定^[23]. 在这些发射线里, 有些线还属于双线或者三线. 因此, 这就给波长定标过程中的单峰拟合带来很大的不确定性. 平均统计来说, LAMOST波长的定标误差在0.02 Å以内, 相当于产生约1 km·s⁻¹的速度误差. 另外, 波长定标的误差也会来自日心改正, 即会因为国际标准时和北京本地时的差异在测定速度上产生约0.36 km·s⁻¹的误差. 这里考虑的波长定标产生误差主要会影响发射线拟合出的中心波长即测定气体的视向速度. 下文拟合中估算视向速度误差时并没有考虑此类误差, 但是可以发现, 这种误差对气体视向速度的测量影响是比较小的.

本文通过对发射线进行高斯轮廓拟合来获取发射线的中心位置与流量信息. 我们分别在每个发射线波段范围内利用马尔科夫链-蒙特卡洛方法(MCMC)对相应的发射线进

² <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/Html/help.html>

行高斯曲线拟合, 以获取相应参数和误差. 图3给出了对纯气体光谱中[S II] λ 6731发射线拟合的例子. 我们通过肉眼筛查剔除异常结果. 最终通过测量的谱线中心波长与其静止波长相比得到气体相对太阳的径向运动速度, 并根据得到的高斯轮廓积分计算出谱线的流量.

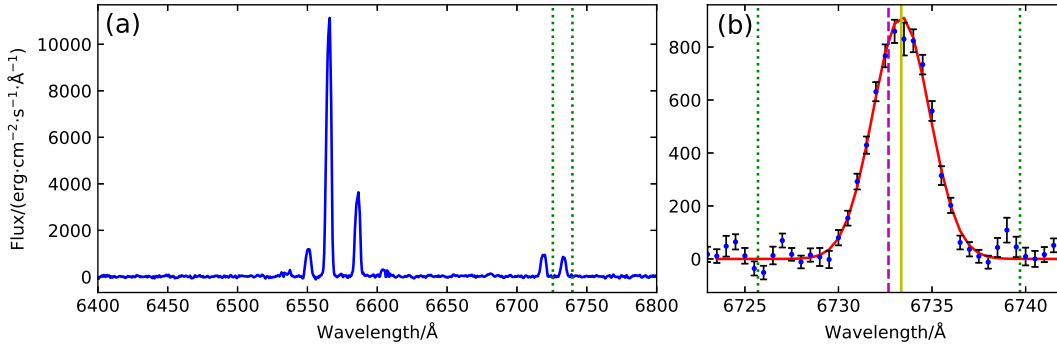


图3 对LAMOST ID为20170101-GAC085S03M1-2-102的纯气体光谱中[S II] λ 6731线的拟合情况. 图(a)展示了该发射线在整段光谱(6400–6800 Å)中的位置, 而图(b)则为对该发射线放大显示的拟合细节图. 图(a)中蓝色线为整段光谱. 图(a)和(b)中绿色虚线标示了高斯轮廓拟合的范围. 图(b)中, 蓝色带误差棒的点和红色实线分别为观测值和拟合曲线, 紫色和黄色竖线分别为发射线静止波长和观测波长.

Fig. 3 Gaussian fitting of the [S II] λ 6731 emission line for the pure gas spectrum with LAMOST ID 20170101-GAC085S03M1-2-102. Panel (a) shows the position of this emission line in the whole spectrum (6400–6800 Å), while panel (b) magnifies the fitting details of the emission line. The blue line in panel (a) is the whole spectrum. The green dashed lines in panels (a) and (b) show the wavelength ranges of Gaussian fitting. In panel (b), the blue points with error-bars and the red solid line are respectively the observation spectrum and the fitting curve. The purple and yellow vertical lines mark the rest and observed wavelength of the emission line, respectively.

热电离气体中各种元素的电离发射线的线强比可以表征电离气体内的化学性质. Daltabuit等^[25]发现超新星遗迹中 $H\alpha/[N II] \lambda\lambda$ 6548和6584、 $H\alpha/[S II] \lambda\lambda$ 6717和6731、 $[S II] \lambda 6717/[S II] \lambda 6731$ 有稳定的关系, 其随超新星遗迹尺度演化也会发生系统性的变化. 这些线强比还被用来研究银河系、M31等近邻星系中如元素丰度梯度, 超新星气体云及相关天体的化学性质. 其中 $H\alpha/[N II] \lambda 6584$ 可以表征氮和氢的丰度比(N/H)变化情况, $H\alpha/[S II] \lambda\lambda$ 6717和6731可用来从光致电离气体星云(photoionized nebulae)中区分激波星云(shocked nebulae), 而 $[S II] \lambda 6717/[S II] \lambda 6731$ 对电子密度高度敏感^[24]. 过去对恒星形成区内相关化学性质的研究还是十分有限的. 本文基于获得的4条发射线流量, 分别得到 $H\alpha/[S II] \lambda\lambda$ 6717和6731、 $[S II] \lambda 6717/[S II] \lambda 6731$ 、 $H\alpha/[N II] \lambda 6584$ 这3种线强比, 进一步探索猎户座分子云团内弥散电离介质的不同化学性质.

4 电离气体视向速度与线强度比的空间分布

经过肉眼检查, 最终我们分别成功地获取了1181、982、915和836条纯气体光谱的 $H\alpha$ 、 $[N II] \lambda 6584$ 、 $[S II] \lambda 6717$ 和 $[S II] \lambda 6731$ 发射线参数信息. 这些纯气体光谱的位置、信噪比、各发射线的视向速度和线强比等结果可通过网站下载(下载地址为http://paperdata.china-vo.org/Paperdata_wjt/catalogue1_orion.csv). 表3详细描述

了供下载的表格中每一列的含义.

表 3 本文结果表格中每列的描述
Table 3 Description of the columns in our resulted catalogue

Column	Name	Description
1	ID	LAMOST spectral ID
2	Type	Fiber type of the pure gas spectrum
3	RA	Right Ascension (J2000)
4	Dec	Declination (J2000)
5	SNR	Signal to noise ratio at 6400-6800 Å
6	VrH6563	Radial velocity derived from H α line ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
7	VrH6563err	Uncertainty of radial velocity derived from H α line ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
8	VrN6584	Radial velocity derived from [N II] λ 6584 line ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
9	VrN6584err	Uncertainty of radial velocity derived from [N II] λ 6584 line ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
10	VrS6717	Radial velocity derived from [S II] λ 6717 line ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
11	VrS6717err	Uncertainty of radial velocity derived from [S II] λ 6717 line ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
12	VrS6731	Radial velocity derived from [S II] λ 6731 line ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
13	VrS6731err	Uncertainty of radial velocity derived from [S II] λ 6731 line ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
14	H6563divS6717S6731	Value of line intensity ratio for H α /[S II] $\lambda\lambda$ 6717, 6731
15	S6717divS6731	Value of line intensity ratio for [S II] λ 6717/[S II] λ 6731
16	H6563divN6584	Value of line intensity ratio for H α /[N II] λ 6584

4.1 视向速度的空间分布

图4给出了以H α 发射线测定的视向速度为基准, 与通过其他发射线计算得到的视向速度差的分布状况. 对于大部分的光谱数据来说, 利用不同发射线测定的视向速度之间具有高度的一致性, 速度差的平均值可以忽略, 弥散约为 $5.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 这表明我们所测视向速度内部误差仅为 $\sim 4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 另外, 可以发现[S II]的两条发射线与H α 发射线测定的视向速度差离群值(outlier)明显多于[N II]发射线与H α 发射线测定的视向速度差离群值, 这主要是[S II]发射线比较弱, 测定的视向速度误差较大造成的.

图5显示了利用H α 发射线测定的弥散电离气体速度在猎户座分子云团内不同位置处的空间分布情况. 此结果显示猎户座内的弥散电离气体整体在远离我们, 平均值为 $30.3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 弥散为 $11.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 我们详细研究了复合体内不同子结构的气体运动情况. 其中 σ Ori区域内的气体视向速度相对Orion A上侧、Orion B下侧及其右上方的Ori OB1b星协部分区域普遍偏大, 这可能是Orion A和Orion B中对应位置的弥散电离气体

正在发生膨胀导致的结果. 同时 σ Ori也仿佛是在远离太阳方向做收缩运动, 其内部进行着活跃的恒星形成活动. 如图5中区域③所示, 特别是在Orion B下侧中有一个比较明显的膨胀核心区(以紫红色的圆标出). 然而Orion B整体上呈现出收缩运动的速度分布特征, 这与Kounkel等^[18]对此结构中研究恒星运动的结论是一致的. 在 σ Ori的左侧和下侧, 气体可能正在发生剧烈的相互作用使得测量值中未呈现出比较规律性的速度梯度. 同时, 在M42的左侧同样发现了一个正在膨胀的区域(图5区域③中用橙色的圆标出). 这些致密星云区域的膨胀运动也促进了周围恒星的诞生. 部分光纤也覆盖到了Barnard's Loop的一块天区, 从图5区域②中可以发现此天区有比较明显的速度梯度存在, 靠近外侧(用红色的椭圆标出)的气体存在着比较明显速度偏低的情况, 而靠近圆弧里侧的速度则较大, 如果扣掉整个猎户座复合体区域的整体本征速度, 这表明此结构的外侧气体要比内侧速度值要大, 运动方向为朝向太阳系. 这比较符合Barnard's Loop可能是一个膨胀的气泡的说法, 即它起源于一次超新星的爆炸. 在Barnard's Loop上侧圆弧的尽头区域, 图5中区域②的右侧, 即与Ori OB1a星协上部分几乎重合的区域, 光谱也探测到了一些零散的弥散气体, 它们的情况跟Barnard's Loop类似, 但速度值并没有很强的规律性. 这可能表明此区域和Barnard's Loop曾经是一体的, 后来由于其他天体产生的激波等因素被吹散. 本文光谱最后一个覆盖的天区是 λ Ori区域, 其速度值呈现两团分开的特点. 如图5中区域①所示, 黑色椭圆中的气体速度值偏大, 白色椭圆中的气体速度值偏小. 如果同样扣掉猎户座复合体的本征速度, 说明此天区的气体正在发生剧烈的相对运动. 对比Kounkel等^[18]关于 λ Ori中恒星在径向方向上膨胀运动的发现, 印证了此星团起源于核心发生的超新星爆炸. 同时过去的研究指出, 这个年轻星团内众多的低质量恒星已经丢掉了在恒星形成阶段曾经环绕恒星的星周盘(circumstellar disk)^[26]. 因此, λ Ori区域的弥散电离气体在小区域内其速度值更容易形成比较明显的各向同性.

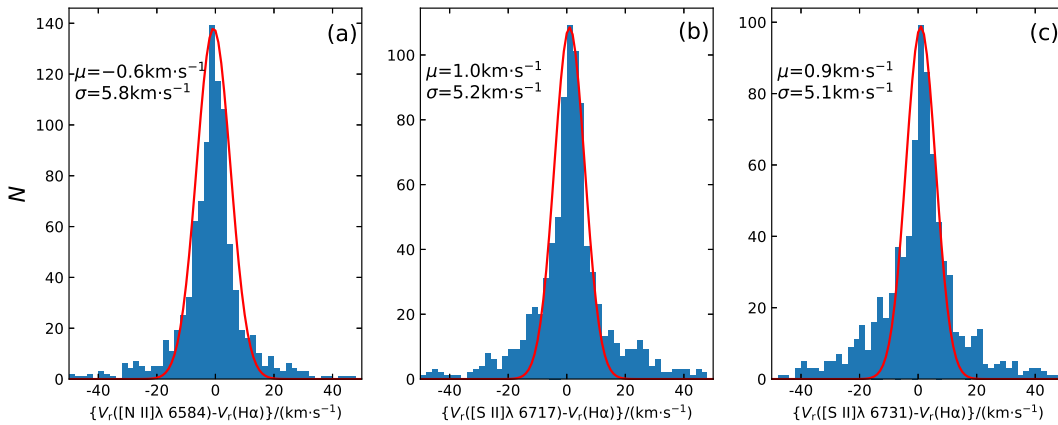


图 4 通过不同发射线测出的视向速度与 $H\alpha$ 测出的速度差分布图, 红色实线为高斯拟合曲线. 其中 V_r 表示各发射线所测出的视向速度, N 表示对应视向速度差值区间的统计个数. 而 μ 和 σ 分别表示高斯分布的平均值和标准差.

Fig. 4 Distributions of the differences between the radial velocities estimated from $H\alpha$ line and those from other three emission lines. The red solid lines are the Gaussian fitting of the distributions. V_r is the radial velocity estimated from the emission lines, N is the statistical number for the range of radial velocity differences, while μ and σ represent the mean values and standard deviations of the Gaussians, respectively.

4.2 线强度比的空间分布

基于筛选出来的4种发射线的有效强度, 计算出的3种线强比($H\alpha/[S II] \lambda \lambda 6717$ 和 6731 、 $[S II] \lambda 6717/[S II] \lambda 6731$ 、 $H\alpha/[N II] \lambda 6584$)用来表征对应位置处弥散电离介质的化学性质. 在去除了一些线强度比异常(极大或负值)的光谱情况之后, 统计到这些光谱中 $H\alpha/[S II] \lambda \lambda 6717$ 和 6731 的有效测定有704条, $[S II] \lambda 6717/[S II] \lambda 6731$ 的有效测定有736条, $H\alpha/[N II] \lambda 6584$ 的有效测定有940条.

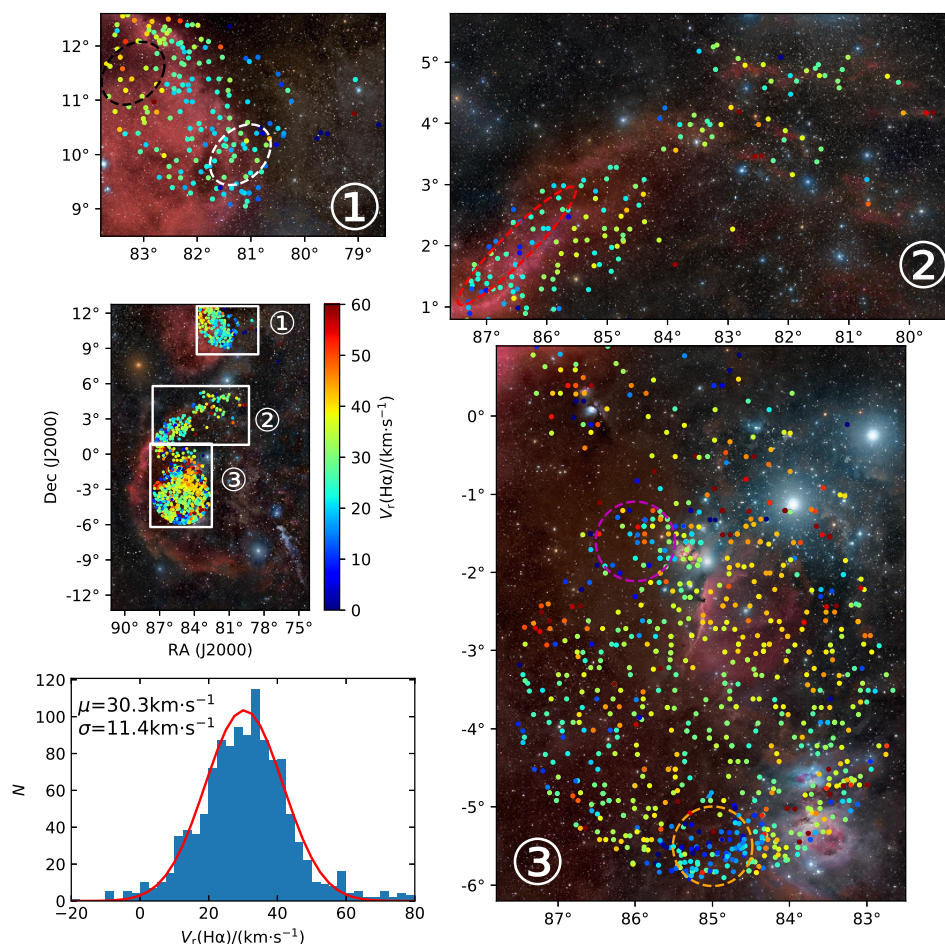


图 5 图中描绘了由 $H\alpha$ 发射线得到的猎户座分子云团内弥散电离气体的视向速度空间分布. 背景图来自 Rogelio Bernal Andreo. 区域①②③分别作了放大展示, 其中不同颜色虚线划出了文中讨论的一些特殊区域. 左下角的图为此视向速度的统计直方图. 其中红线高斯拟合曲线.

Fig. 5 Spatial distribution of the radial velocities derived from the $H\alpha$ emission line of the diffuse ionized gas in the Orion Molecular Cloud Complex. Background image is from Rogelio Bernal Andreo. Regions ①, ②, and ③ are magnified in the figure, in which the dashed lines with different colors mark the regions of special interest discussed in the text. The bottom left panel shows the histogram of the radial velocity, in which the red curve shows the Gaussian fit.

图6给出了不同电离线强度比的空间分布, 3种线强度比分布略有不同, 它们揭示了此区域内弥散电离气体的不同化学性质. σ Ori的3种线强度比都处于较高的水平, 特别是 $H\alpha/[S II] \lambda\lambda 6717$ 和 6731 处于很高的水平. 而 σ Ori下侧及其他周围区域的线强度比则处于较低的状态. σ Ori的电子密度处于较高的水平. 猎户座大星云(M42)处在 $H\alpha/[S II] \lambda\lambda 6717$ 和 6731 的高线强度比也是比较明显的, 其他两种线强度比的显著性较弱, 说明此位置有强烈的激波星云成分. 对Orion B下侧、 σ Ori和M42之间的区域及其左侧, 3种线强度比都呈现出普遍偏低的结果. Barnard's Loop及Ori OB1a的上侧区域内3种线强度比, 特别是 $H\alpha/[N II] \lambda 6584$, 相对来说是很高的. 尤其可以看到比较规则的密度梯度, 即越靠近中间的地方线强度比越高. λ Ori的线强度比分布也类似于Barnard's Loop, 主要是 $H\alpha/[S II] \lambda\lambda 6717$ 和 6731 、 $H\alpha/[N II] \lambda 6584$, 距离气体云中心越近的地方越是处于高线强度比的状态. 而 $[S II] \lambda 6717/[S II] \lambda 6731$ 表征的电子密度分布则没有很强的规律性. 这些线强度比的分布特征说明 σ Ori、M42、Barnard's Loop、 λ Ori等气体云的中心温度都较高, 大量的粒子处于自由电离状态, 有的区域则应该存在着较明显的电离氢区. λ Ori和Barnard's Loop在气体状态上有着明显的空间结构, 这与其周围的大质量恒星有关, 这可能也在暗示其起源和演化.

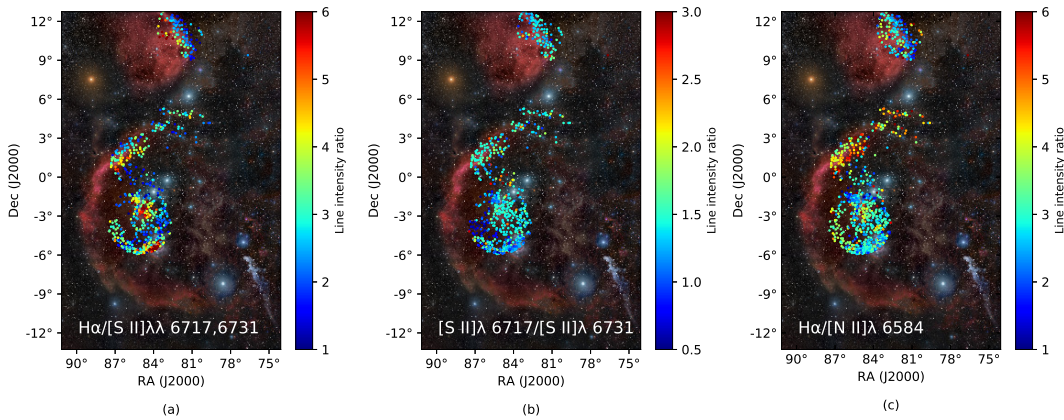


图6 猎户座分子云团内弥散电离介质的不同谱线线强比在空间上的分布. 背景图来自Rogelio Bernal Andreo.

Fig. 6 Spatial distribution of different line intensity ratios of diffuse ionized medium in the Orion Molecular Cloud Complex. Background image is from Rogelio Bernal Andreo.

5 总结

本文从LAMOST I期光谱巡天数据中挑选了完全或部分覆盖猎户座分子云团区域的8个观测面板, 并从中挑选出了不受目标天体光谱污染并包含了星际介质和背景天光信息的光谱样本. 通过选取不受星际介质光谱污染的纯天光光谱来构建超级天光, 并对包含星际介质信息的气体光谱做减天光处理, 从而得到了超过1300条只包含弥散电离介质光谱的纯气体光谱. 再对这些光谱的不同发射线进行高斯拟合, 最终分别得到了1181、982、915和836条纯气体光谱的 $H\alpha$ 、 $[N II] \lambda 6584$ 、 $[S II] \lambda 6717$ 和 $[S II] \lambda 6731$ 发射线的视向速度和线强比等信息. 这些信息可以通过网站下载(下载地址为<http://>

//paperdata.china-vo.org/Paperdata_wjt/catalogue1_orion.csv).

基于得到的视向速度和线强比, 本文对猎户座分子云团内弥散电离介质的气体运动情况和电子密度等化学性质的空间分布进行了详细的讨论. 在这些结构中, σ Ori 星团中可能有剧烈的恒星形成, 造成了其内部气体有一定的收缩运动, 线强度比的值相比周围区域也出现了明显的起伏. Orion A 和 Orion B 中不同位置气体运动具有膨胀和收缩的特征, 这与其周围的大质量恒星的星风密切相关. M42 中有很强烈的激波星云成分, 暗示其内部强烈的恒星活动. 而 Barnard's Loop 明显具有超新星爆炸所留下的特征, 视向速度和线强度比都出现比较强的规律性. λ Ori 星团的气体速度和线强度比则揭示了其中心大质量恒星和周围环状区域的物理图景. 本文基于光学波段的发射线研究猎户座恒星形成区的电离气体成分, 可与其他最新的观测成果相对照, 揭示猎户座复合区域的气体运动和化学性质等情况. 本文的成果也能进一步对恒星形成区的不同质量恒星和气体相互作用等理论提供重要的观测支持.

不同于超新星遗迹等小尺度的单一气体星云结构, 猎户座分子云团内的速度场和线强度比分布复杂, 这也是整个猎户座恒星形成区的成分复杂性造成的. 猎户座恒星形成区内有各种分子和原子气体, 在小尺度和大尺度上有不同形式的分布, 与此区域内不同质量的恒星形成也存在着密切的关系. 猎户座分子云团存在着密集的纤维状(filaments)、薄片状(sheets)、团簇状(clumps)星云, 并且融合着各种低密度的泡状和空洞结构. 特别是超新星的压力波, 恒星的星风和外流以及区域内的辐射和磁场导致了猎户座区域内星云高度动态的演化^[27]. 这些复杂的成分可以被不同的发射线探测到, 并以此揭示相应成分气体的运动情况. 对猎户座复合体各区域的分析既需要对不同子结构的性质进行广泛的调查研究, 也需要根据不同结构之间的物理环境互相对照以寻找其联系. 此外, 这些分析还需要结合其他波段如射电和X射线等观测数据, 来进一步详细讨论猎户座分子云团内部气体的运动过程及其对恒星形成过程的影响.

致谢 本工作利用了郭守敬望远镜(LAMOST)的数据产品. 衷心感谢中国科学院国家天文台任娟娟副研究员、云南大学李广兴副教授和北京师范大学苑海波副教授在本工作中提供的帮助. 同时也非常感谢审稿人对本文提出的宝贵意见.

参 考 文 献

- [1] Kang M J, Lee J E, Choi M, et al. ApJS, 2013, 209: 25
- [2] Maddalena R J, Morris M, Moscowitz J, et al. ApJ, 1986, 303: 375
- [3] Bally J. Overview of the Orion Complex//Reipurth, B. Handbook of Star Forming Regions: Volume I: The Northern Sky. San Francisco: ASP Monograph Publications, 2008: 459-482
- [4] Kounkel M. Distances, Kinematics, and Structure of Nearby Star-forming Regions. Ann Arbor: University of Michigan, 2017: 1-10
- [5] 吕张盼, 姜碧涛, 李军. 天文学报, 2017, 58: 18
- [6] Lv Z P, Jiang B W, Li J. ChA&A, 2018, 42: 213
- [7] García-Díaz M T, Henney W J. AJ, 2007, 133: 952
- [8] Walter F M, Sherry W H, Wolk S J, et al. The Sigma Orionis Cluster//Reipurth B. Handbook of Star Forming Regions: Volume I: The Northern Sky. San Francisco: ASP Monograph Publications, 2008: 732-756
- [9] Zapatero Osorio M R, Béjar V J S, Pavlenko Y, et al. A&A, 2002, 384: 937

- [10] Barnard E E. PA, 1894, 2: 151
- [11] Madsen G J, Reynolds R J, Haffner L M. ApJ, 2006, 652: 401
- [12] Ochsendorf B B, Brown A G A, Bally J, et al. ApJ, 2015, 808: 111
- [13] O'Dell C R, Ferland G J, Porter R L, et al. ApJ, 2011, 733: 9
- [14] Dolan C J, Mathieu R D. AJ, 2002, 123: 387
- [15] Zhang C Y, Laureijs R J, Chlewicki G, et al. A&A, 1989, 218: 231
- [16] Schlafly E F, Green G, Finkbeiner D P, et al. ApJ, 2015, 799: 116
- [17] Franco J, Tenorio-Tagle G, Bodenheimer P, et al. ApJ, 1988, 333: 826
- [18] Kounkel M, Covey K, Suárez G, et al. AJ, 2018, 156: 84
- [19] Briceño C, Calvet N, Hernández J, et al. AJ, 2005, 129: 907
- [20] Cui X Q, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. RAA, 2012, 12: 1197
- [21] Liu X W, Yuan H B, Huo Z Y, et al. Proceedings of the IAU Symposium. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 298-310
- [22] Luo A L, Zhang H T, Zhao Y H, et al. RAA, 2012, 12: 1243
- [23] Luo A L, Zhao Y H, Zhao G, et al. RAA, 2015, 15: 1095
- [24] Ren J J, Liu X W, Chen B Q, et al. RAA, 2018, 18: 111
- [25] Daltabuit E, Dodorico S, Sabbadin F. A&A, 1976, 52: 93
- [26] Barrado y Navascués D, Stauffer J R, Morales-Calderón M, et al. ApJ, 2007, 664: 481
- [27] Genzel R, Stutzki J. ARA&A, 1989, 27: 41

Mapping the Radial Velocities and Line Intensity Ratios of Diffuse Ionized Medium in the Orion Molecular Cloud Complex

WU Jin-tai^{1,2} JIANG Si-yi^{1,2} LEI Lei^{1,2} CHEN Bing-qiu²

(1 School of Physics and Astronomy, Yunnan University, Kunming 650500)

(2 South-Western Institute for Astronomy Research, Yunnan University, Kunming 650500)

ABSTRACT Star formation region is the best astrophysical laboratory for the studies of the physical processes in the formation of stars. The Orion Molecular Cloud Complex is one of the most famous regions to study the formation of stars with different masses, and to reveal the properties of the corresponding young stars. The kinematic and chemical properties of the warm ionized gas of the star forming regions can be obtained by the analysis of their optical spectra. Using the spectroscopic data from the Chinese large astronomical facility Guoshoujing Telescope (also called LAMOST), we have selected eight plates which target the Orion Molecular Cloud Complex. 1,300 spectra from these plates are overlapping with the diffuse ionized gas of the Orion Molecular Cloud Complex. We re-constructed the super-sky spectra with the spectra from the uncontaminated sky fibers for the following sky subtraction. The central wavelength and integrated flux of several emission lines, such as the $H\alpha$, $[N\ II] \lambda 6584$, $[S\ II] \lambda\lambda 6717$ and 6731 , are then calculated. Finally we present maps of radial velocities and line intensity ratios covering the diffuse ionized medium in the Orion Molecular Cloud Complex.

Key words stars: formation, ISM: clouds, ISM: kinematics and dynamics, techniques: spectroscopic