

W51M分子云中H和He复合线的 观测研究*

张燕坤^{1,2†} 朱逢尧³ 唐孟尧⁴ 秦胜利⁴ 汪敏^{1,2}

(1 中国科学院云南天文台 昆明 650011)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

(3 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(4 云南大学天文系 昆明 650011)

摘要 W51M (W51 Main)是一个和H_{II}区成协的大质量恒星形成区,在其中可以探测到众多的分子谱线和H、He射电复合线.中国科学院上海天文台基于天马65 m望远镜对W51M的观测数据,证认了主量子数在74–117之间的H、He复合发射线,其中主量子数在74–78之间的H和He的 α 复合线均被探测到.结合H和He复合线的多普勒致宽,算出该H_{II}区的电子温度约为7400 K, He⁺/H⁺的离子丰度比约为0.09,这与已有的研究基本吻合.考虑高信噪比的复合线,即H(n) α ($74 \leq n \leq 78$),计算得出W51M的平均湍动速度是13.767 km·s⁻¹.通过确定W51M或其他H_{II}区中的复合线,获取电子温度、湍动速度以及其他物理参量,在电子数密度、元素丰度、恒星形成率等方面进行了探讨,对分子谱线以及其他波段的复合线研究具有借鉴意义.

关键词 谱线: 复合线, 星际介质: H_{II}区, 星际介质: 云, 星际介质: 分子, 厘米: 星际介质
中图分类号: P144; 文献标识码: A

1 引言

对分子云进行宽带谱线观测所得的数据已成为获取大量关于星际化学和天体物理的重要信息源.谱线强度与密度、温度等有关,从谱线信息中能得到分子的丰度、旋转温度等,有助于了解分子云的物理、化学环境.在天体化学中,W3、Orion、Sgr A、Sgr B2、W51和IRC10216等无疑是天文学家和学者们比较感兴趣的区域,其中,人们的很多天体化学知识来源于对Orion KL、Sgr B2、W3 (OH)、W3 (H₂O)、W51M (W51 Main)等分子云的观测和分析^[1–2].在具有分层结构的星云中,越靠近云核中心气体温度越高,因此星云中分子或原子能够被激发并辐射出光子或电磁波.当它们穿越外层介质并向地球传播时,可能会被吸收.由于射电波具有较强的穿透能力,所以谱线的射电观测对揭示星云成分、结构以及演化具有重要作用.

2019-07-02收到原稿, 2019-11-13收到修改稿

*国家自然科学基金项目(U1631121)资助

†zhangyankun@ynao.ac.cn

本文关注的是W51M. 它在1962年被观测到, 是W51复合体中的一个致密分子云, 也是一个大质量恒星形成区, 大约有 $5 \times 10^4 M_{\odot}$ 的气体^[3]. 目前已知它离地球的距离是 $(7.0 \pm 1.5) \text{ kpc}$ ^[4], 赤道坐标赤经 $RA = 19^{\text{h}}23^{\text{m}}43.86^{\text{s}}$, 赤纬 $DEC = +14^{\circ}30'29.4''$. 在过去的射电观测中, 已探测到了 $\text{H}(77)\alpha$ 、 $\text{H}(110)\alpha$ 复合线^[5-6]以及一些有机分子, 比如 CH_3OH 、 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ 和 CH_3OCH_3 的转动能级跃迁^[7]和 H_2O 脉泽^[3]. 观测表明, W51M云核具有旋转动力学特征, 而且正在膨胀, 其中包裹着一颗质量约为 $15 M_{\odot}$ 的年轻恒星, 伴随着高速的脉泽喷流. 脉泽抽运主要受速度为 $2000\text{--}3000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 星风的影响^[8]. 在Remijan等^[9]的文章中, W51M星云的平均系统速度是 $56.00 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. 但是, 该速度并不确定: 部分复合线研究中得到的系统速度约为 $58 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[5]. 根据 H_2O 脉泽观测可知, 强发射线给出的速度范围是 $50\text{--}65 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 而由弱发射线得到的系统速度范围是 $65\text{--}110 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[4].

作为典型的致密电离氢区, W51M中有很多元素的复合线, 比如H和He复合线. 原子中的电子从激发态连续多次跃迁才到基态的机制称为级联跃迁. 离子与自由电子复合时的级联跃迁会发射复合谱线, 在 H_{II} 区比较显著. 对于主量子数 $n + 1 \rightarrow n$ 的跃迁, 称为 α 线; $n + 2 \rightarrow n$ 的跃迁, 称为 β 线; $n + 3 \rightarrow n$ 的跃迁, 称为 γ 线, 以此类推. 根据探测到的复合线参数, 可以研究行星状星云、射电星系核、银道面电离气体分布、星际磁场、系外星云的化学元素丰度、银河系动力学结构等^[10]. 在纯粹的氢云中, 波长 $\lambda < 912 \text{ \AA}$ 的恒星光子能够电离中性氢, 一段时间后, 气体会达到复合与电离平衡的状态. 射电复合线都比较弱, 并且低频射电观测显示复合线有碰撞致宽. 对于H复合线, $n \sim 100$ 时才能在低频射电中探测到^[10]. 另外, 星际气体中的氦气约占10%, 电离它要比电离氢的难度大(电离能较高), 因而探测到的He复合线都较弱^[11]. 在真实的电离氢区, 往往包含有H、He和一些更重的元素, 比如C、N和O.

在确定诸如W51M这样的 H_{II} 区的视向速度和电子温度 T_e 等方面, 测量复合线是一种合理且简单的方法. 但是, 这涉及到一系列的计算工作. 从天体物理的角度而言, 这些工作一般包括谱线证认、建模预测和观测验证模型可靠性. 本文描述的是最基本的谱线证认. 对于复合线来说, 准确无误的证认, 尤其是对约化质量较大元素的谱线证认比较困难, 因此我们参考Snyder等^[12]在2005年提出的方法, 在观测频率与实验室频率极其接近并且径向速度在误差允许范围内, 认为观测所得的谱线是对应的复合线. 相比于丰度较低的复杂大分子, 这些谱线更易于分析. 在本文第2节中, 介绍了数据来源和观测参数; 在第3节中则详细描述了数据处理过程和细节; 第4节中, 本文针对数据的处理过程和结果进行了一系列讨论和分析; 在文章的最后是总结和对未来相关工作的展望.

2 天文观测与数据处理

中国科学院上海天文台天马65 m望远镜配有分子谱线与脉冲星终端DIBAS (DIgital BAckend System). 该终端支持多种观测模式, 其中有19个单窗口模式, 10个8窗口模式. 模式1-19在 $11.7\text{--}1250 \text{ MHz}$ 间有多种频谱带宽; 模式20-24的带宽是 23.4 MHz ; 模式25-29的带宽是 15.6 MHz ^[13]. 它可以实现对谱线不同频率或速度分辨率的观测, 最低 1464.8 kHz/通道 , 最高到 22 Hz/通道 .

W51M的复合线观测采用Ku波段($12\text{--}18.3 \text{ GHz}$), 观测模式2. 该观测模式有16384个

通道, 谱线分辨率为91.553 kHz, 在14.8 GHz处的速度分辨率为 $1.9 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. 为了有效去除假信号, 还观测了一个校准源1925+211.

使用GILDAS/CLASS (Grenoble Image and Line Data Analysis System/Continuum and Line Analysis Single-dish Software)数据处理软件, 可以很方便地获取谱线信息, 如天线温度、峰值频率、LSR (Local Standard of Rest)速度、半峰全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)等物理量. 这次处理的频率区间是12748–16048 MHz, 共分为3个文件, 每个文件频率覆盖约为1500 MHz, 即每50 MHz约对应500个通道. 针对这样的数据, 我们将每个文件细化为50 MHz/窗口, 这样就可以看到很多细节. 对于谱线较集中的频谱部分, 我们将频谱窗口设置得更小以更好地拟合参数. 之后我们按照Luisi等人提供的一般方法^[11, 14], 将每个频谱图基线拟合, 叠加并求平均, 以降低每次scan随机误差的影响, 并提高信噪比. 这样, 我们可以获得基线拟合的RMS (Root Mean Square)值, 同时标记出谱线峰值对应的频率. 在上述步骤之后, 就可以展开谱线证认, 从谱线中获得一些基本信息了. 根据标记的频率值, 在天文分子分类目录—splatalogue (一个收集JPL (Jet Propulsion Laboratory)、CDMS (Cologne Database for Molecular Spectroscopy)和Lovas/NIST (National Institute of Standards and Technology)分子谱线数据的网站)选出可能的分子数据, 然后用高斯方法拟合, 获得复合线拟合参数.

在保证不影响复合线轮廓和流量值的情况下, 我们对不好的scan或数据段进行了筛选或剔除. 对于谱线附近的坏道数据, 比如没有宽度的细线, 我们剔除后再利用CLASS填充. 对于难于分辨是否是谱线、有一定宽度的频谱片段, 考虑到分子云环境很复杂, 跃迁线可能被“污染”或是“重叠”, 所以拟合完后, 还要与背景源的谱形作对比, 如果某区间上, 目标源和背景源都有发射(吸收)线, 则将其视为背景源的辐射(吸收). 除此之外, 我们对比了所有scan的频谱, 发现部分scan的数据质量很差, 因此利用其他scan的流量峰值对应的频率以及该scan的RMS, 如果天线温度 $|T_L| \leq 3\text{RMS}$, 则剔除该scan的数据.

本工作的一个重点是谱线证认, 这需要根据一定的原则进行. 本工作中, 我们严格按照以下描述的要求进行处理, 获得了较好的结果(见第3、第4节):

(1)天体的系统速度造成观测到的分子谱线频率相对于静止频率有一个频率漂移. 如果观测到多条谱线, 那么它们应该有相同的频移量;

(2)在消除频移后, 各个需要证认的复合线频率和静止频率精确一致^[12], 但实际上有一些偏差, 且偏差相近. 这是因为星云系统速度是定值, 但是内部湍动会使得不同分子的运动速度不太一样;

(3)证认的跃迁应该具有一致的线宽. 窄线辐射主要的考虑因素一般是多普勒致宽, 而自然致宽和斯塔克效应相比之下可以忽略;

(4)对于有争议的跃迁, 我们应该尽量考虑跃迁概率较高、上能级能量较低的分子, 因为它们易于激发.

另外, 由于本文采用的W51M的系统速度是 $56.00 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 因此修正后的流量峰值对应的频率与静止频率误差应该在小数点后3位, 考虑到星云复杂的热力学和运动学特征, 我们将该误差控制在0.05 MHz范围内; 在获取参数的工作中, 我们利用已有文献或参考书提供的计算公式, 对 T_e 、湍动速度 V_t 等物理量进行计算. 考虑到本文处理的部分复合

线的跃迁能级所对应的 n 稍大于100, 因此也只考虑了多普勒致宽, 将它们按较高频率处理.

3 结果

按照谱线证认的基本要求, 我们获得了W51M中复合线的一些信息, 比如频域和速度域的积分流量、线宽、天线温度等. 在数据处理中, 若去除频移后谱线频率与实验室频率之间的偏差绝对值在0.05 MHz以内, 我们认为观测所得的谱线是对应的复合线. 信噪比用下式^[11, 14]计算:

$$\frac{S}{N} = 0.7 \left(\frac{T_L}{\text{RMS}} \right) \left(\frac{\Delta V}{\Delta V_k} \right)^{0.5}, \quad (1)$$

其中, RMS的单位为K; ΔV 为速度展宽; ΔV_k 为观测的速度分辨率. 一般要求 $\frac{S}{N}$ 大于5, 而我们的计算结果表明, 本工作中证认的所有谱线信噪比都高于该值.

表1是拟合结果和从splatalogue中查询到的对应的谱线数据, 其中还包括速度域的天线温度积分值 A_V 、频率域的天线温度积分值 A_F 、频率展宽 $\Delta\nu$ 以及它们对应的误差值(每条谱线对应的第2行数据). 可以看出, 所有复合线给出的系统速度范围介于55–60 km·s⁻¹, 拟合误差不大于0.7 km·s⁻¹. 由于它描述了星云相对于本地静止标准的运动, 所以对每个跃迁线拟合出来的速度应该接近56.00 km·s⁻¹, 而实际获得的平均值约为57.47 km·s⁻¹, 误差为2.6%, 如图1所示. 谱线中心频率相对于静止频率的最大偏差为0.15 MHz, 虽然大于阈值0.05 MHz, 但是数据库中没有更好的复合线数据, 所以仍然认为证认可靠. 从全部数据来看, 谱线拟合误差最大约为0.046 MHz, 最小为0.002 MHz. 频域展宽的平均值约是1.392 MHz, 最大拟合误差约为0.11 MHz, 最小为0.005 MHz; 速度展宽范围平均值为28.390 km·s⁻¹, 最大拟合误差约为2.33 km·s⁻¹, 最小为0.05 km·s⁻¹.

拟合结果如图2所示, 所有拟合的RMS平均值是0.05 K. 文字标注的复合线天线温度较高且满足以上4个判据. 在该图中, 可以看到大多数复合线拟合得很好. $n = 74$ 、75、76、77、78这5个数的 α 复合线天线温度较高, 最高可到7 K左右. 它们也是主量子数最小的几条复合线, 并且对应量子数的H、He复合线均显示在频谱中. 少量的复合线拟合得不够好, 最明显的就是H和He的高能级跃迁对应的谱线轮廓, 它们展宽较大, 天线温度较低, 甚至可以低到0.4 K以下.

我们利用讨论部分提到的展宽与电子温度、湍动速度的关系, 从 $n = 74$ –78的复合线拟合结果出发, 对该H II区的 T_e 、 V_t 进行计算. 用 $N_{(\text{He}^+)}$ 和 $N_{(\text{H}^+)}$ 分别表示He⁺和H⁺粒子的数密度, 还可以获得He和H的电离丰度比 $\frac{N_{(\text{He}^+)}}{N_{(\text{H}^+)}}$, 结果见表2. 从表2中可以看出, 由各复合线计算得出的 T_e 介于6158–8506 K之间, 平均值为7361.46 K; V_t 介于13299–14408 km·s⁻¹之间, 平均值为13767.408 m·s⁻¹; $\frac{N_{(\text{He}^+)}}{N_{(\text{H}^+)}}$ 介于0.082–0.097之间, 平均值约为0.09. 由于具备同一跃迁的H和He复合线数量较少, 我们为了使计算可靠, 还将H、He复合线的不同跃迁分开计算, 并把谱线数目Num、频域展宽 $\Delta\nu$ 、速度展宽、电子温度、湍动速度等结果列到了表3中. 从表3中可以看出H复合线比He复合线多, 并且H复合线的频域展宽和速度域展宽都比He复合线的大一些, 由它们算出的湍动速度也呈现同

样的趋势. 较大的差别在于电子温度, 由H复合线算出的电子温度均值为8488.246 K, 但是由He复合线给出的电子温度平均值为17513.875 K.

表 1 W51M复合线高斯拟合结果
Table 1 Gaussian fitting results for the recombination lines in W51M

A_V /($K \cdot km \cdot s^{-1}$)	Velocity /($km \cdot s^{-1}$)	ΔV /($km \cdot s^{-1}$)	A_F /($K \cdot Hz$)	Frequency ^a /MHz	$\Delta\nu$ /MHz	Lab.Freq. ^b /MHz	Fitting Results
14.56573	58.830841	27.605917	0.636056	-0.123613	1.205489	13088.851	H(79) α
0.626137	0.580823	1.426583	0.025126	0.023144	0.057118		
27.293478	59.391754	30.895195	1.229044	-0.152737	1.391217	13497.519	H(112) γ
1.216556	0.657082	1.664081	0.046976	0.025382	0.064329		
36.764122	56.949245	29.159334	1.663036	-0.043024	1.319053	13557.561	H(98) β
0.422505	0.163672	0.382857	0.026828	0.010345	0.024603		
109.81142	56.964031	29.047419	4.979859	-0.037515	1.316934	13595.488	H(78) α
0.314257	0.003772	0.096357	0.015396	0.001986	0.004712		
9.257092	56.144485	24.917694	0.420113	-0.045791	1.129518	13601.029	He(78) α
0.296066	0.372777	0.968197	0.014552	0.019496	0.048363		
20.982077	56.283875	31.781252	0.97028	-0.013144	1.469603	13860.748	H(111) γ
0.877833	0.645475	1.583921	0.042997	0.031818	0.077544		
36.684284	55.810974	30.209324	1.710668	0.008744	1.408876	13976.897	H(97) β
0.488916	0.196214	0.468427	0.03308	0.013254	0.031724		
141.16222	58.187138	29.347303	6.653961	-0.103088	1.383345	14128.615	H(77) α
0.212953	0.021724	0.051527	0.025085	0.002567	0.005873		
11.245579	58.85553	24.206007	0.530103	-0.096663	1.140908	14134.372	He(77) α
0.194676	0.203456	0.488588	0.023464	0.025767	0.058105		
13.898205	58.271473	30.048801	0.660145	-0.107906	1.427245	14237.129	H(110) γ
0.263976	0.276971	0.668889	0.034464	0.036336	0.087267		
34.933685	57.602276	29.069874	1.679828	-0.077106	1.397883	14413.706	H(96) β
0.228527	0.09443	0.220684	0.013212	0.005646	0.012519		
2.533786	56.453278	20.535442	0.121882	0.040449	0.987914	14419.58	He(96) β^c
0.184263	0.781981	1.615848	0.010878	0.045748	0.0925		
12.006454	58.793819	28.411596	0.585921	-0.13634	1.386483	14627.262	H(109) γ
0.340915	0.400301	0.897	0.021253	0.024955	0.056068		
131.77733	56.735764	29.015278	6.458368	-0.036055	1.422029	14689.985	H(76) α
0.40369	0.043834	0.103865	0.035307	0.003818	0.009085		

表 1 续
Table 1 Continued

A_V /(K·km·s ⁻¹)	Velocity /(km·s ⁻¹)	ΔV /(km·s ⁻¹)	A_F /(K·Hz)	Frequency ^a /MHz	$\Delta\nu$ /MHz	Lab.Freq. ^b /MHz	Fitting Results
11.41066	56.960648	24.130444	0.559224	0.02823	1.182623	14695.971	He(76) α
0.373624	0.40959	0.88672	0.031718	0.033024	0.075073		
28.123127	55.787838	28.958981	1.395088	0.010525	1.436555	14868.909	H(95) β
0.22338	0.113725	0.262654	0.012846	0.00652	0.015003		
26.890013	57.862785	28.92638	1.34853	-0.093432	1.450631	15031.781	H(108) γ
0.744743	0.398652	0.917886	0.034155	0.018229	0.042082		
238.74646	57.313675	30.3388	12.15699	0.031277	1.494537	15281.493	H(75) α
4.476749	0.476175	0.376042	0.03224	0.001867	0.004482		
16.35845	57.16114	25.086868	1.241868	0.077496	1.422134	15287.72	He(75) α
4.476749	0.496082	0.796102	0.031277	0.017347	0.043345		
68.648552	57.649376	31.156897	3.514273	-0.084345	1.595101	15343.484	H(94) β
0.737212	0.16166	0.390881	0.032807	0.007217	0.017576		
20.846533	57.180706	27.44018	1.074642	-0.060858	1.414536	15451.356	H(107) γ
0.552749	0.360093	0.832875	0.030681	0.020007	0.046087		
15.059971	58.126423	32.791164	0.784733	-0.11081	1.708746	15618.274	H(117) δ
0.85711	0.902814	2.326871	0.04262	0.045135	0.115815		
51.117138	58.440018	28.656134	2.700251	0.008756	1.51372	15838.472	H(93) β
0.584672	0.162047	0.368724	0.029723	0.00822	0.019025		
212.33719	55.865993	29.316946	11.26983	0.00707	1.555896	15905.19	H(74) α
0.81684	0.055142	0.132017	0.072056	0.004859	0.011462		
18.59482	57.579796	25.469906	0.9848	0.05724	1.349628	15911.671	He(74) α
0.773551	0.53256	1.250096	0.067746	0.046214	0.110188		
15.709402	55.733959	31.604656	0.839569	0.014217	1.689076	16018.877	H(116) δ
0.580554	0.559271	1.411399	0.031399	0.030553	0.075796		

^a The fitting value of the frequency corresponds to the peak flux density in the spectrum. The minus value means the fitting value is smaller than the rest frequency measured in the laboratory.

^b The laboratory frequency of the molecules has been checked from the splatalogue website.

^c A recombination line of lower flux that is visible at almost all scans with the $\frac{S}{N}$ value of 6.90.

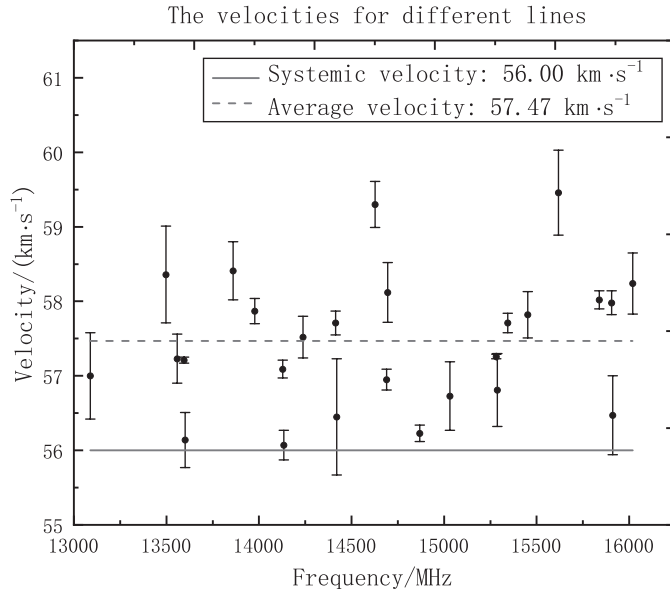


图 1 不同谱线对应的速度拟合值. 对各复合线拟合后的值用点表示; 实线对应W51M的系统速度 $56.00 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 虚线对应的是平均拟合速度值, 约为 $57.47 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$; 误差棒表示拟合误差, 介于 $0.003\text{--}0.903 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间.

Fig.1 The velocity fitting values corresponding to different spectral lines. The fitted values of the recombination lines are represented by dots. The solid line corresponds to the systemic velocity of W51M, which is $56.00 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. The dashed line corresponds to the average fitting velocity value, which is about $57.47 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. The error bars correspond to the fitting errors, which are between 0.003 and $0.903 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

表 2 解算的W51M参数

Table 2 Calculated parameters of W51M

n	T_e/K	$V_t/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\frac{N_{(\text{He}^+)}}{N_{(\text{H}^+)}}$
74	6158.62	14408.176	0.0925
75	8505.70	13804.278	0.0892
76	7585.75	13323.686	0.0965
77	8045.24	13299.243	0.0818
78	6512.00	14001.655	0.0884
Average Value	7361.462	13767.408	0.08966

4 讨论

W51M是一个大质量恒星形成区. 它的中心区域是一颗较高质量的原恒星, 根据“斯特龙根球”假设, 在这颗原恒星的周围, 必然有一层温度较高的致密电离区域, 即 UCH_{II} 区. 再往外温度越来越低, 分别形成离子、分子过渡部分和分子较多的部分^[15]. 其中被激发的分子或原子会由内而外辐射出电磁波. 由于射电波的长波特性, 它几乎不会被星际尘埃吸收, 因此射电频谱中含有很多天体物理信息. 通过单天线的分子谱线、复合线和连续谱观测, 我们能够进一步获得该源的物理和化学信息, 完善恒星演化理论.

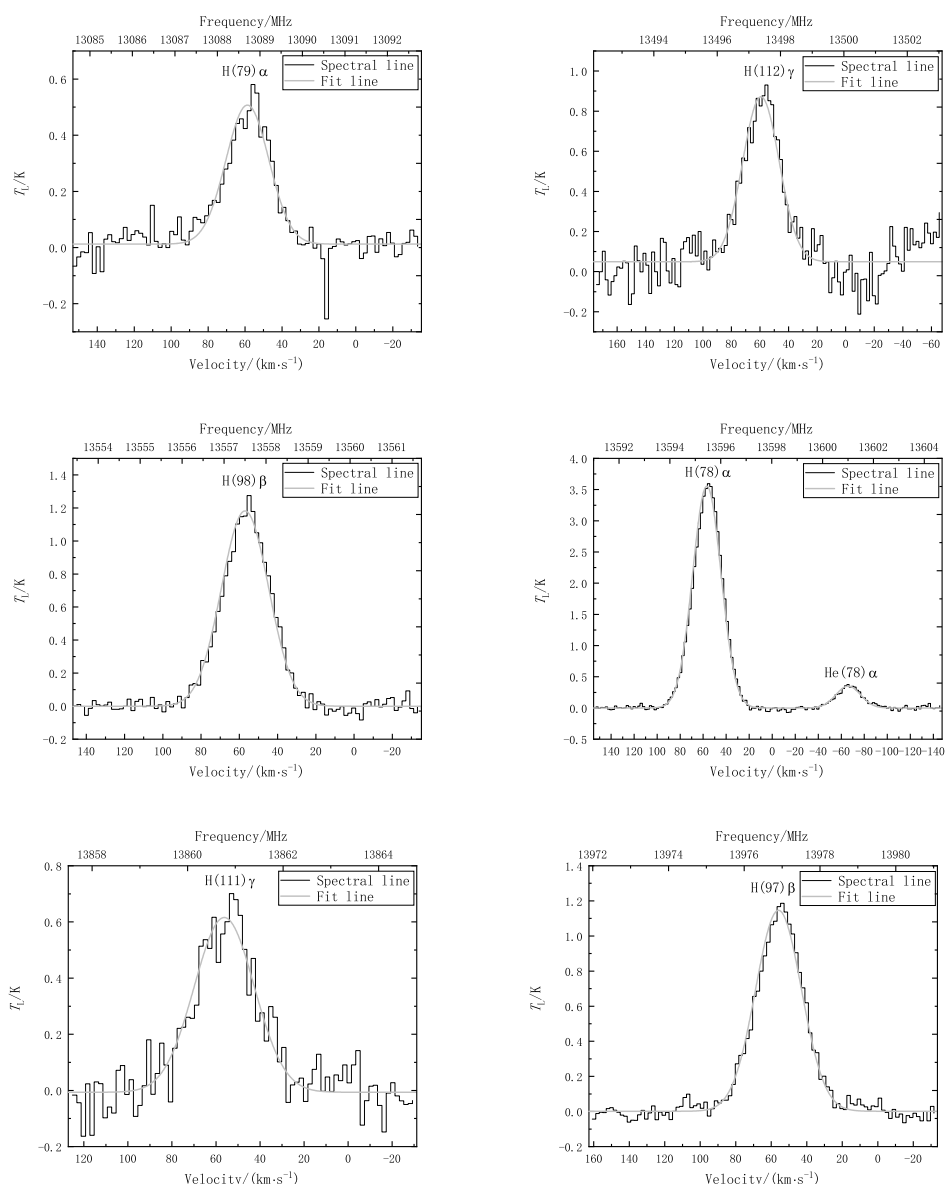


图 2 证认结果图。图中横轴为速度，单位为 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，上沿的坐标为频率，单位为 MHz 。以上图片已经过基线拟合和高斯拟合，并已在各频率窗口内标示了相应的复合线。从图中可见，主量子数 $n=74$ 、 75 、 76 、 77 、 78 这5个数的氢复合线天线温度较高，它们也是主量子数最小的几条复合线，并且对应量子数的氦复合线均显示在频谱中。

Fig. 2 A diagram of the verification results. The lower horizontal axis in the graph is for velocity, whose unit is $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, and the upper horizontal axis is for frequency, whose unit is MHz . The above panels have been fitted by the baseline and Gaussian fitting, and the corresponding recombination lines have been marked in each frequency window. It can be seen from the figure that the antenna temperature of the hydrogen recombination lines are relatively high when those five main quantum numbers are $n=74$, 75 , 76 , 77 , and 78 . They are also the recombination lines with the smallest main quantum numbers, and the helium lines corresponding to common quantum numbers are all displayed in the spectra.

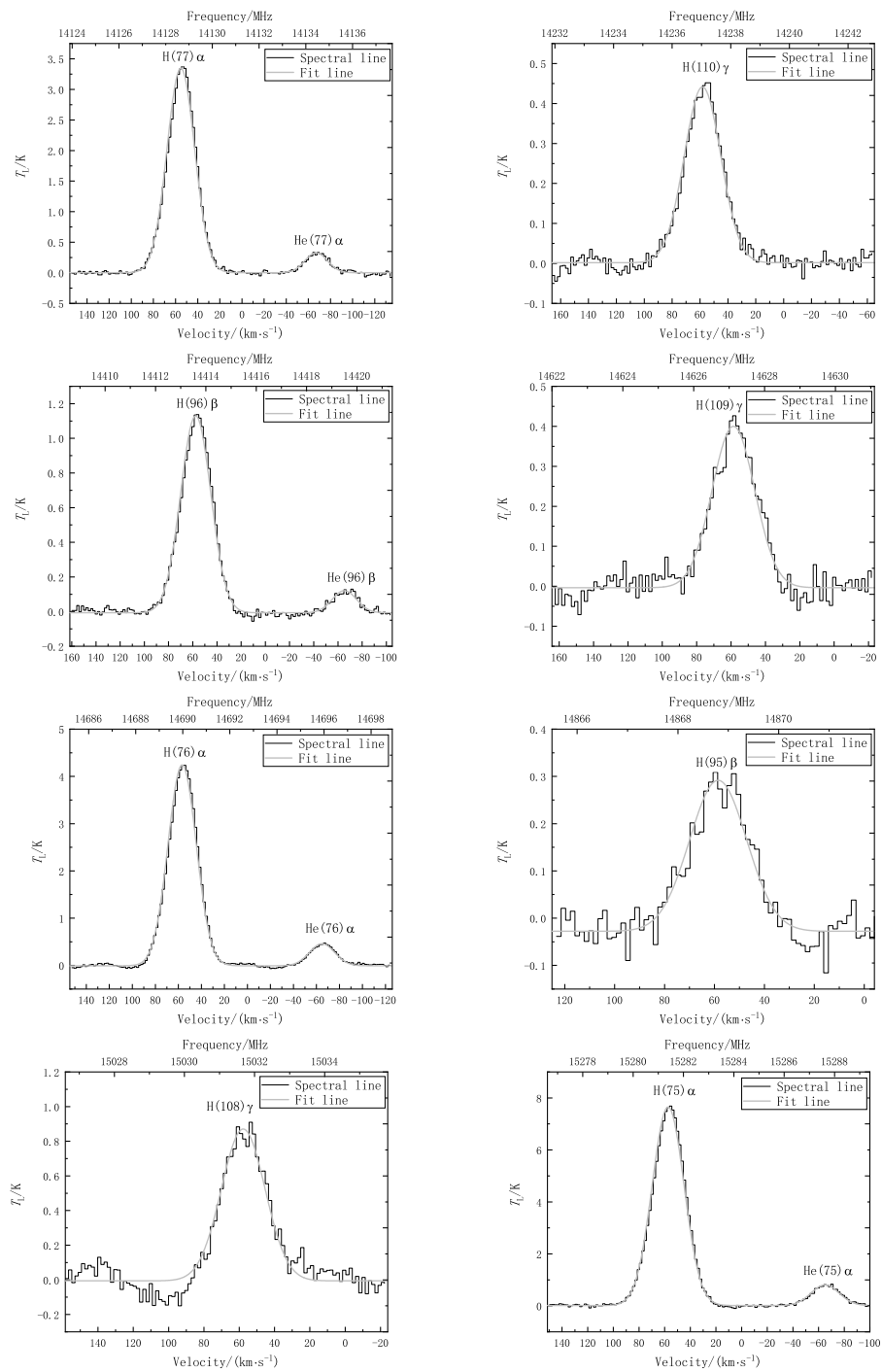


图 2 续

Fig. 2 Continued

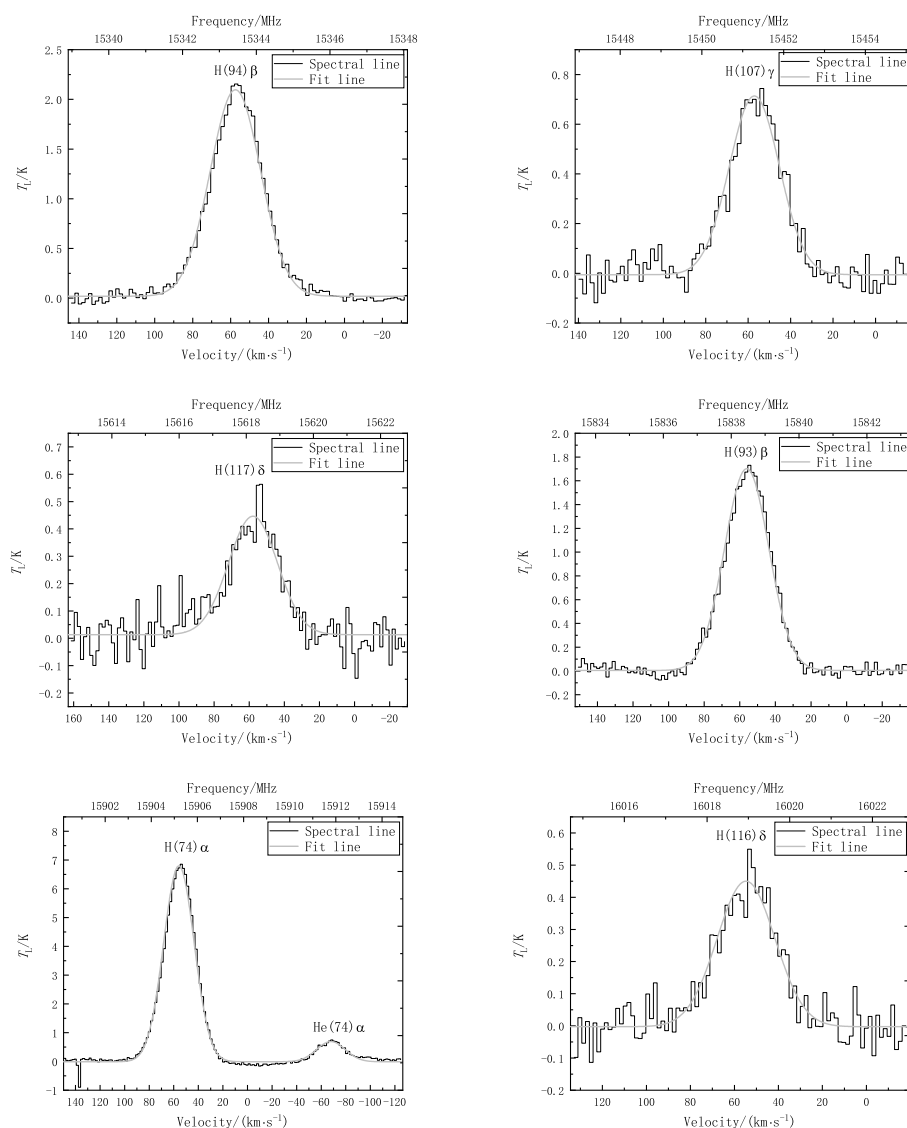


图 2 续

Fig. 2 Continued

本文处理的是该源的复合线数据. 在一些典型的 UCH_{II} 区中, 可以观测到很多复合线, 它们主要是 H 和 He 的复合线. 根据 (2) 式和 (3) 式可以求得特定波段所能探测到的氢复合线:

$$\nu = R_M c \left[\frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n + \Delta n)^2} \right], \quad (2)$$

$$R_M c = R_\infty c \left(1 + \frac{m_e}{M} \right) = 3.28805 \times 10^{15} \text{ Hz}, \quad (3)$$

其中, ν 为谱线发射频率, c 为光速, Δn 为电子跃迁前后的主量子数之差, m_e 为电子质量, M 为核子质量, R_M 为核子质量是 M 时的里德伯常数, R_∞ 为核子质量趋于无穷大时的里德伯常数. 对于 α 线, $\Delta n = 1$; 对于 β 线, $\Delta n = 2$. 以此类推. 如果要获取He、C复合线的频率数据, 使用不同的 R_M 即可. 在同一元素的不同复合线中, α 线是最强的. 由数据处理结果可知, 我们所证认的复合线中, 主量子数 $n = 74$ 、75、76、77、78的H和He复合线天线温度最高, 即流量最高. 其他复合线的主量子数都高于78, 因此天线温度较低, 信噪比也较低. 这些定性比较和原子物理理论一致. 如果要观测主量子数更高的H或He复合线, 则需要在频率较低的频段进行, 比如C波段(4–8 GHz)、L波段(1–2 GHz). 由于社会的快速发展, 生产生活中产生了很多射频干扰, 所以L波段的电磁环境一般不会太好, C波段则稍微好一些.

表 3 所有探测到的复合线解算的结果
Table 3 The results of all detected recombination lines

Lines ^a	Num	$\Delta\nu$ /MHz	ΔV /(km·s ⁻¹)	T_e /K	σT_e^b /K	V_t /(m·s ⁻¹)	σV_t^c /(m·s ⁻¹)
H(n) α	6	1.396	29.112	8080.013	335.724	13090.090	460.793
H(n) β	6	1.445	29.535	8419.536	504.24	13219.573	388.526
H(n) γ	6	1.423	29.584	8460.762	846.481	13241.666	663.174
H(n) δ	2	1.699	32.198	10001.522	368.932	14411.007	265.240
He(n) α	5	1.245	24.762	18576.632	2074.076	10867.479	437.662
He(n) β	1	0.988	20.535	12200.093	0.000	9191.415	0.000
He(n) γ	0	-	-	-	-	-	-
He(n) δ	0	-	-	-	-	-	-
mean(H) ^d	-	1.449	29.689	8488.246	786.956	13306.499	622.520
mean(He) ^e	-	1.202	24.058	17513.875	3038.434	10588.135	751.478
mean_all ^f	-	1.392	28.39	10571.083	4131.292	12679.185	1317.847

^a $74 \leq n \leq 117$, which can be seen from Table 1 for details.

^b The RMS value of T_e .

^c The RMS value of V_t .

^d The various mean values of H recombination lines.

^e The various mean values of He recombination lines.

^f The term “mean_all” means the mean value for all detected spectral lines.

复合线研究表明, 它们的致宽机制主要包括自然致宽(洛伦兹谱形)、多普勒致宽和斯塔克致宽. 自然致宽的公式为

$$\frac{\Delta\nu_N}{\nu_0} \approx \frac{1.2 \times 10^{-6} \ln n}{n^2} \quad (n > 20). \quad (4)$$

其中, $\Delta\nu_N$ 表示自然致宽的值, ν_0 表示特定谱线对应的频率. 以H(75) α 为例, $n = 75$ 、 $\nu_0 = 15281.493$ MHz, 算得 $\Delta\nu_N \approx 14$ Hz, 由此得自然致宽可以忽略. 多普勒致宽反映的

是热运动粒子的速度满足麦克斯韦-玻尔兹曼分布规律, 公式为

$$\Delta\nu_D \approx 7.16233 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \nu_0. \quad (5)$$

式中, $\Delta\nu_D$ 表示多普勒致宽的数值. 同样, 以H(75) α 为例, 不考虑湍动, 设电离氢区的温度 $T = 8000$ K, 计算得 $\Delta\nu_D \approx 0.98$ MHz. 因此, 如果能从复合线的展宽中分离出多普勒致宽的部分, 那么就能直接计算出 T_e . 由(5)式推导可得:

$$T_e = M \left(\frac{\Delta\nu_{D_t}}{7.16233 \times 10^{-7} \nu_0} \right)^2. \quad (6)$$

其中, $\Delta\nu_{D_t}$ 表示多普勒致宽中的湍动成分.

斯塔克致宽又称为压力致宽, 与外部电场相关, 可以分为多种类型. 一般情况下, 电子碰撞致宽要比粒子碰撞致宽大, 但是它们对轮廓的影响都比较小. Brown等人在1978年的文章^[10]中指出: 斯塔克致宽在 $n > 100$ 时开始显现, 在150–200之间会对谱线半宽产生显著的影响. 由于本文计算中所用到的谱线是在较高频段观测到的, n 在100左右, 况且本工作未涉及精细结构, 因此可以忽略压力致宽.

从以上计算和讨论可知, 多普勒效应是较高频观测中谱线致宽的主要机制. 由于多普勒致宽的谱形为高斯轮廓, 因此可以使用高斯方法进行拟合. 广而言之, 一般的复合线或分子谱线都是窄线发射 ($\Delta\nu \ll \nu_0$), 均可以使用高斯方法进行拟合.

复合线中强度最高的是 α 线, 也是本文数据中信噪比最高的复合线. 上文提到 $n = 74, 75, 76, 77, 78$ 的复合线天线温度较高, 因此还可以用这些复合线数据获取 T_e , 这样就避免拟合数据质量较差的谱线带来的较大误差. 由于这些复合线的 $n > 100$, 可以忽略压力致宽的影响, 那么就只需要考虑多普勒致宽. 假设同一能级跃迁的H和He复合线的 T_e 和 V_t 在同一视线方向上保持不变, 那么在计入原子质量后, T_e 就可以由H和He复合线的展宽直接获得. 公式^[11]为

$$\left(\frac{T_e}{K} \right) = 29.22 \left[\left(\frac{\Delta V_H}{\text{km} \cdot \text{s}^{-1}} \right)^2 - \left(\frac{\Delta V_{He}}{\text{km} \cdot \text{s}^{-1}} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

此式中, ΔV_H 为氢复合线在速度域的线宽, ΔV_{He} 为氦复合线在速度域的线宽, 两者对应的主量子数相等. 由于H和He在同一能级跃迁的发射线较少, (7)式的应用受到了一定局限, 因此, 还需要对H和He的其他跃迁进行计算.

除了热运动, 分子云物质的微观湍动对谱线的轮廓也有贡献. 过去的研究表明, 在不考虑压力致宽的情况下, 观测获得的谱线半宽是由热动平衡公式计算出的展宽值的1.5倍^[11], 即热运动造成的速度展宽仅是多普勒效应造成的速度展宽的2/3. 如下式所示:

$$\begin{aligned} (\Delta V_D)^2 &= (\Delta V_{D_t})^2 + (\Delta V_{D_{\text{turb}}})^2 \\ &= (\Delta V_{D_t} + \Delta V_{D_{\text{turb}}})^2 - 2\Delta V_{D_t} \Delta V_{D_{\text{turb}}}. \end{aligned} \quad (8)$$

其中,

$$\Delta V_{D_t} = \frac{2}{3} \Delta V_D.$$

式中, ΔV_{D_t} 表示多普勒致宽中, 由粒子热运动造成的速度展宽; $\Delta V_{D_{\text{turb}}}$ 表示多普勒致宽中由湍动造成的速度展宽; ΔV_D 则表示所有形式的多普勒致宽所造成的速度展宽的值. $\Delta V_{D_{\text{turb}}}$ 与 ΔV_{D_t} 比值的平方为

$$\left(\frac{\Delta V_{D_{\text{turb}}}}{\Delta V_{D_t}} \right)^2 = \frac{1.5^2 - 1^2}{1^2} = 1.25. \quad (9)$$

将分离的 ΔV_{D_t} 和 $\Delta V_{D_{\text{turb}}}$ 相加, 可得

$$(\Delta V_{D_t} + \Delta V_{D_{\text{turb}}})^2 \approx 4.486 (\Delta V_{D_t})^2. \quad (10)$$

从非相对论红移公式

$$\frac{\Delta \nu}{\nu_0} = \frac{\Delta V}{c}, \quad (11)$$

可以知道 $\Delta \nu \propto \Delta V$, 也就是热运动造成的频域展宽也是多普勒效应造成的频率展宽的2/3. 利用(9)式和(10)式, 可以对湍动速度和电子温度的计算进行检验, 进一步分析H和He在激发条件、元素丰度等方面的不同以及同一原子不同跃迁的差异.

表1中列出了高斯拟合后得到的 ΔV , 使其等于 ΔV_D 并代入下式:

$$\Delta V_D = (4 \ln 2)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2kT_e}{m_e} + V_t^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

k 为玻尔兹曼常数. 结合 T_e 可以从上式中解出 V_t , 即

$$V_t = \left[\frac{(\Delta V_D)^2}{4 \ln 2} - \frac{2kT_e}{m_e} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (13)$$

式中 V_t 为湍动速度, m_e 的单位为 kg.

由 T_e 可以计算 T_L 和 T_c (自由-自由辐射亮温度) 的比值, 如(14)式所示:

$$\frac{T_L}{T_c} \approx 7.0 \times 10^3 \left(\frac{\Delta V}{\text{km} \cdot \text{s}^{-1}} \right)^{-1} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{1.1} \left(\frac{T_e}{\text{K}} \right)^{-1.15} \left[1 + \frac{N_{(\text{He}^+)}}{N_{(\text{H}^+)}} \right]^{-1}. \quad (14)$$

当然, 该比值也可以通过谱线和连续谱观测后获得, 然后反过来计算 T_e . 上式中, He与H电离丰度比也可以用 y^+ 表示, 即:

$$y^+ = \frac{N_{(\text{He}^+)}}{N_{(\text{H}^+)}}. \quad (15)$$

作为一个重要参数, 较大的 y^+ 值代表较强的辐射场^[11]. 也可以用温度和线宽表示, 如(16)式:

$$y^+ = \frac{T_{L_{(\text{He}^+)}} \Delta V_{\text{He}^+}}{T_{L_{(\text{H}^+)}} \Delta V_{\text{H}^+}}. \quad (16)$$

其中, $T_{L(\text{He}^+)}$ 和 $T_{L(\text{H}^+)}$ 分别表示 He^+ 和 H^+ 的天线温度; ΔV_{He^+} 和 ΔV_{H^+} 分别表示 He^+ 和 H^+ 的速度展宽.

表2中集合了 $n = 74-78$ 的 H 和 He 复合线 T_e 、 V_t 和 $\frac{N(\text{He}^+)}{N(\text{H}^+)}$ 等信息, 我们将各数据的平均值作为分析结果. 该表中没有 EM (Emission Measure) 和电子数密度 n_e 等信息, 主要是因为需要做一些修正才能获得 T_L , 并且这些修正必须合理. 对于指向精确的望远镜, 修正工作主要是确定波束稀释因子 W 、主波束效率 η_{MB} 、天线效率 η_A 、大气吸收修正因子 τ 等, 而部分影响因素是随时间和观测变化的. 因此, 频谱中所得的 T_L 还不能被直接使用. 为了获得天体物理信息而又不太关注这些问题, 可以采用谱线和连续谱都观测的策略, 在 $\frac{T_L}{T_c}$ 中消除这些影响. 因此, 如果还观测 W51M 的连续谱和其他波段的数据, 那么就可以较为精确地计算出 T_e 和 n_e ; 如果知道 W51M 具体的尺度信息, 可以精确计算出 EM 和谱线光深 τ_L ; 如果熟悉天马望远镜的特性, 还可以计算出氦元素的丰度值 $\left[\frac{\text{He}}{\text{H}}\right]$.

我们知道 W51M 中有一颗 $15 M_\odot$ 的年轻恒星, 紫外辐射较强, 因此可以在该源中观测到多个波段的复合线. 人们通常把复合线中 $n \leq 100$ 对应的频段称为高频, 将 $n \geq 100$ 的频段称为低频^[11]. 本文使用的是 W51M 的较高频波段—Ku 波段的数据. 由 H、He 复合线最高信噪比的几组数据 $n = 74, 75, 76, 77, 78$ 算出的平均温度约为 7400 K, 与 W3、Orion 等星云的温度值 (6000–8000 K) 差不多. C 复合线存在于 $10-10^2$ K 的环境中^[11], 因此这也解释了本工作中为什么没有证认出 C 复合线. 由于热动平衡造成的展宽仅是多普勒致宽的 $\frac{2}{3}$, 所以我们可以利用该性质检验计算结果的正确性. 将电子温度代入 (5) 式和 (7) 式并与数据处理结果作对比, 结果与之前的工作相符, 这说明多普勒致宽的余下部分是由湍动造成的. 利用本文中流量最高的复合线, 计算得 W51M 中的湍动速度为 $13.767 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 符合一般的计算结果. 根据 (10) 式, 计算得出 $\frac{N(\text{He}^+)}{N(\text{H}^+)}$ 约为 0.09, 该结果接近 0.1, 既符合 Brown 等人的建议值 0.08–0.11^[10], 也符合 He 在宇宙星际气体中所在丰度值 (10%), 因此, 可以认为 $\frac{N(\text{He}^+)}{N(\text{H}^+)}$ 等于 W51M 中 He 的丰度值. 另外, 中国科学院新疆天文台的 H(110) α 复合线巡天^[5] 的丰硕成果表明, C 波段复合线观测能够获得 W51M 中主量子数较大、信噪比较高的复合线数据. 如果利用这些多波段观测数据, 就能通过 (6) 式和 (11) 式很好地约束该星云整体的电子温度和 He 与 H 的电离丰度比.

表3展示了所有证认出谱线的信息. 通过 H 和 He 复合线的数目对比, 可以知道 H 复合线要比 He 复合线容易探测, 即使是同一原子, 相邻能级跃迁 (α 线) 也要比跨能级跃迁 (非 α 线) 易于发现和证认. 在表中, 不管是频率展宽还是速度展宽, H 复合线和 He 复合线其实都受到了热动平衡和湍动速度的影响. 相比较而言, H 原子受到的影响要更大些, 可能是质量比 He 原子轻的缘故. 就湍动而言, 由 He 原子给出的湍动速度要比 H 复合线的小, 这一结果符合常理. 因为我们知道: 质量越大惯性越大, 那么在同样的外界因素影响下, He 元素的湍动必然要比 H 元素小. 在展宽、湍动速度和电子温度等物理量中, 由 H 和 He 给出的电子温度显示出了较大的差异. H 复合线给出的电子温度与表2的结果一致, 但是 He 复合线给出的温度则要高 4000–8000 K. 我们认为这一方面与 He 原子的性质有关, 由于 He 原子的电离能较大, 因此电离和复合过程中所需的温度也比 H 原子所需的温度高; 另一方面, He 复合线较大的电子温度弥散和较低的高能级跃迁探测率, 表

明W51M中He元素较低, 星云整体的温度不会特别高. 由此, 我们可以明白W51M是一个较为常规的与UCH_{II}区成协的恒星形成区, 但是物质组成和星际环境都比较复杂, 并且存在局部高温(温度在10000–20000 K之间). 此外, 较大的误差也反映出了数据本身的不足. 如果参考“斯特龙根球”模型和W51M中观测到的分子谱线, 还可以知道W51M具有温度梯度和复杂的分层结构.

利用洛伦兹轮廓可以计算 n_e , 但前提是先把洛伦兹轮廓、高斯轮廓从Vogit轮廓中提取出来. 因此, 该方法更适用于低频射电复合线观测数据处理. 以下是利用洛伦兹展宽计算电子数密度的具体计算公式:

$$\Delta\nu_L = An_e \left(\frac{n}{100} \right)^\gamma \left(1 + \frac{\gamma}{2} \frac{\Delta n}{n} \right), \quad (17)$$

其中, $A = 8.4 \text{ Hz} \cdot \text{cm}^3$, $\gamma = 4.4 \pm 0.6$, $\Delta\nu_L$ 为洛伦兹展宽. 因此, 上式可以化为

$$n_e = \frac{\Delta\nu_L}{8.2 \left(\frac{n}{100} \right)^{4.4} \left(1 + 2.2 \frac{\Delta n}{n} \right)} \text{ cm}^{-3}. \quad (18)$$

在计算EM、 n_e 、He元素丰度、恒星形成率 Φ 等物理量时, 需要做一系列假设, 比如星云形状为球形、气体成分主要为氢、电离与复合平衡等, 对源所张的立体角 Ω 和天线的特征参数等也要足够了解. 实际上, W51M是一个形状复杂、成分较多、物理模型不够完整和成熟的较热分子云, 波束填充因子也不一定是1, 因此上述假设是有些欠妥的. 考虑到这些因素, 本文没有继续往下做更深入的计算.

以上讨论主要涉及计算电子温度 T_e 和湍动速度 V_t 的两种方法: 一种是利用展宽计算, 一种是利用流量计算. 本文中用的是较为简单的方法, 即利用展宽求解物理参数. 该方法更适用于谱线的高频观测, 主要考虑的因素就是热动平衡和湍动等情况所引起的展宽, 而压力致宽完全可以忽略, 但是低频观测就不太适用, 甚至会产生错误的计算结果; 另外一种方法, 即通过流量定标或者求解 $\frac{T_L}{T_c}$, 可以获得更多较为可靠的天体物理信息, 比如各能级离子布居数、光深、爱因斯坦系数等. 由于该方法不像展宽一样受到诸多因素的影响, 只需要定标准确, 因此更为科学家所接受. 但是, 如果想从单一波段来研究复合线, 展宽计算不失为一种有效的方法.

5 总结与展望

W51M是一个与电离氢区成协的恒星形成区, 其形态和结构都比较复杂. 现已知它的中心有一颗质量为 $15 M_\odot$ 的年轻恒星, 产生了较强的UV辐射场, 使得其周围有着丰富的被电离的H、He和其他成分的离子, 相应地也有着数量较多的复合原子. 它们每一次级联跃迁, 都会产生一些复合线. 通过复合线的分析, 我们能够了解W51M的演化状态、气体分布、其中原子的激发情况以及电子温度、电子数密度和EM等物理量.

本文所使用的W51M的复合线数据是使用天马65 m射电望远镜观测获得的. 通过数据处理, 我们获得的结果包括:

(1)复合线拟合需要遵循一定的限定规则, 比如谱线频率、系统速度、半峰全宽、多条谱线相互约束等;

(2)复合线属于窄带谱线,多由多普勒致宽主导(较低频的复合线可能还受斯塔克致宽的影响).通过多普勒致宽,可以确定天体的电子温度;

(3)由H和He最高信噪比的复合线,计算得W51M整体电子温度约为7400 K,湍动速度为 $13.767 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

以上这些成果,尽管受到了望远镜灵敏度和系统增益稳定性的限制,但是为以后复合线研究的开展奠定了一定的基础.通过参考其他对W51M的高分辨率观测或其他源的观测,我们还能够确定和完善恒星形成、星云结构和化学演化等方面的内容.本文中多次提到C波段观测,是因为C波段可以探测到不同源中主量子数较大($n > 100$)的复合线和大质量恒星形成的分子探针 CH_3OH ,还可以在低频段探测到转动惯量较大的碳链分子,比如 HC_5N 、 HC_9N 和 C_6H 等,因此,本工作对探测普朗克冷核和研究大质量恒星形成、银河系动力学演化等仍然具有指导意义.

中国科学院云南天文台(简称云台)VLBI (Very Long Baseline Interferometry)与射电天文研究团组重视C波段分子谱线的观测研究.目前,云台40 m射电望远镜上配备了C波段制冷接收机,系统温度约为20 K;在终端机房配置了国内最先进的分子谱线和脉冲星终端DIBAS,安装了集成多种天文观测需求的监控系统软件BuddleJ,已经具备了较强的硬件和软件扩展能力,因此射电天文观测能力和研究方法有所提升.如上所述,DIBAS具有29种观测模式,3个bank可同时工作,可实现宽频带单窗口、窄频带8窗口的不同观测需求.VLBI与射电天文研究团组还将继续在硬件、软件、观测技术和研究方法方面进一步投入,比如实现分子谱线成图、更高频谱线观测等,为分子谱线研究提供优厚的研究条件.本文通过Ku波段复合线证认和数据分析,先行积累谱线数据处理经验并了解谱线的研究方法,也间接论证了40 m射电望远镜在分子谱线研究方面所具有的巨大潜力.未来,我们可以利用40 m射电望远镜进行C波段复合线观测、连续谱观测和重要探针分子的观测,获取大质量恒星、星云、银河系甚至河外星系更多的天体物理或天体化学信息,促进分子天文学的进一步发展.

致谢 衷心感谢中国科学院上海天文台王均智研究员在复合线研究方法和写作思路方面给与悉心指导.感谢李娟副研究员为该工作提供复合线数据和观测信息,并在论文写作过程中给与无私帮助.也感谢审稿老师对文章提出宝贵的修改意见及建议,使得文章的质量有了显著的提高.

参 考 文 献

- [1] Qin S L, Schilke P, Wu J W, et al. *ApJ*, 2015, 803: 39
- [2] Li J, Wang J Z, Gu Q S, et al. *A&A*, 2013, 555: A18
- [3] Olofsson H. *A&A*, 1984, 134: 36
- [4] Zhou J J, Zheng X W. *Ap&SS*, 2001, 275: 431
- [5] Du Z M, Zhou J J, Esimbek J, et al. *A&A*, 2011, 532: A127
- [6] Ginsburg A, Goss W M, Goddi C, et al. *A&A*, 2016, 595: A27
- [7] Millar T J, Brown P D, Olofsson H, et al. *A&A*, 1988, 205: L5
- [8] Samodurov V A, Logvinenko S V. *ARep*, 2001, 45: 339
- [9] Remijan A J, Leigh D P, Markwick-Kemper. *RNAAS*, 2008, 39: 961
- [10] Brown R L, Lockman F J, Knapp G R. *ARA&A*, 2003, 16: 445

- [11] Luisi M, Anderson L D, Liu B, et al. *ApJS*, 2019, 241: 2
[12] Snyder L E, Lovas F J, Hollis J M, et al. *ApJ*, 2005, 619: 914
[13] Li J, Shen Z Q, Wang J Z, et al. *ApJ*, 2016, 824: 136
[14] Luisi M, Anderson L D, Bania T M, et al. *PASP*, 2018, 130: 084101
[15] Rugel M R, Rahner D, Beuther H, et al. *A&A*, 2019, 622: A48

Observation of H and He Recombination Lines in W51M Molecular Cloud

ZHANG Yan-kun^{1,2} ZHU Feng-yao³ TANG Meng-yao⁴
QIN Sheng-li⁴ WANG Min^{1,2}

(1 *Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

(3 *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030*)

(4 *Department of Astronomy, Yunnan University, Kunming 650011*)

ABSTRACT W51M (W51 Main) is a massive star-forming region associated with the H_{II} region, in which numerous molecular lines, H and He recombination lines can be detected. Study of these lines is helpful to understand the properties and physical environment of W51M. Based on the observation data of the Tianma 65-meter telescope, owned by Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, the H and He recombination lines of the main quantum number between 74 and 117 were detected. Combined with their Doppler broadening, the electron temperature of the nebula was calculated. It was found that the electron temperature of the H_{II} region was about 7400 K, and the He⁺/H⁺ ionic abundance ratio was about 0.09, which was basically consistent with previous results. Considering the high signal-to-noise ratio of those recombination lines, i.e. H(*n*) α ($74 \leq n \leq 78$), the calculated average turbulent velocity of W51M is 13.767 km·s⁻¹. This work discusses the identification of recombination lines in W51M or other H_{II} regions, and the acquisition of electron temperature, turbulent velocity, and other physical parameters, such as electron number density, the element abundance, and star formation rate. So it is of positive significance for future study.

Key words spectral lines: recombination lines, interstellar medium (ISM): H_{II} region, ISM: clouds, ISM: molecules, centimeter: ISM