第 45 卷 第 8 期 1996 年 8 月
1000-3290/96/45(08)/1418-07

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol. 45, No. 8, August, 1996

Orion KL 超水微波激射辐射的"宁静相"物理特征*

郑兴武 凌兆芬
(南京大学天文系,南京 210008)
吕 静 韩 溥
(紫金山天文台,南京 210008)
(1995 年 6 月 5 日收到)

利用紫金山天文台青海观测站的 13.7 m 的射电望远镜,观测 Orion KL 分子云的水微波激射辐射.发现这个区的微波激射活动处于"宁静"状态,峰值流量为 3×10^4 Jy, 大约比爆发相微波激射辐射低两个数量级.宁静水微波激射处于完全饱和的辐射过程,微波激射活动区的亮温度为 3×10^{13} K,氢分子数密度为 8×10^{14} m^{-3},微波激射辐射两能级之间的布居反转粒子数密度为 $5\times10^5(H_2O)$ m^{-3}.

从 Orion KL 分子云水微波激射辐射谱的对称结构分析,宁静相水微波激射区处于对称外流或膨胀的动力学结构状态.

PACC: 9580D; 9840

1 引 言

宇宙微波激射(maser)是星际空间微波激射放大过程(microwave amplification by stimulated emission of radiation)引起的一种特殊天体.在银河系,已发现七种分子微波激射,它们是羟基(OH),氰化氢(HCN),水(H_2O),甲醛(H_2CO),甲醇(CH_3OH),氨(NH_3)和一氧化硅(SiO).其中水分子微波激射是最强,变化最快,有时甚至产生爆发或称微波激射耀的天体.利用大射电望远镜,可以在水分子的七个跃迁频率上发现微波激射(参看表 1)[1],而水分子 $6_{16}\rightarrow5_{23}$ 跃迁上的微波激射是天文学家主要的研究对象.它能提供恒星形成区一些重要的物理性质和恒星形成过程动力学结构.

表 1 水分子微波激射

频率/GHz	跃迁能级
22.235	$6_{16}\rightarrow5_{23}$
183.310	$3_{13}\rightarrow2_{20}$
321.226	$10_{29}\rightarrow9_{36}$
325.153	$5_{15}\rightarrow4_{22}$
380.197	$4_{14}\rightarrow3_{21}$
439.151	$6_{43}\rightarrow5_{50}$
470.889	$6_{42}\rightarrow5_{51}$

* 国家自然科学基金和国家攀登计划资助的课题.

Orion KL 星云中的水分子微波激射是银河系中最强的微波激射. Garay 等[2]在 1980 至 1987 年,监测了这个分子云中的水微波激射辐射变化. 在这期间发现有几次大的爆发,最大的流量密度达到 6.7×10^6 Jy[1)],亮温度达到 3×10^{15} K. 每一次爆发相持续大约一年. 从七年的变化曲线看,微波激射爆发是叠加在一种"宁静"微波激射辐射分量上的,最明显的是在 1981 年和 1987 年这两个时期,它们的流量密度约为 5×10^5 Jy.

伴随着流量密度的变化,Orion KL 星云水微波激射辐射的子谱有线宽变化和线心速度的漂移,其值分别为 20% 和 0.2 $(\mathrm{km\cdot s^{-1}})$/年.

许多观测者认为 Orion KL 星云的水微波激射没有分和小时的短时标变化[3,4]. 但是,有人却认为由于微波激射辐射与周围等离子体的康普顿(Compton) 相互作用,有一种弛豫振荡[5].

为了探讨 Orion KL 星云中水微波激射辐射的长期变化趋势,我们利用紫金山天文台青海德令哈观测站的 13.7 m 射电望远镜,观测了这个源的水微波激射辐射. 观测结果与 Garay 等的结果比较后,发现 Orion KL 星云的水微波激射仍处于宁静阶段. 建立适当的理论模型,我们导出了处于宁静相下,微波激射活动区的一些物理性质.

2　观测与资料处理

在 1992 年 8 月 27 日,我们利用紫金山天文台青海德令哈观测站的 13.7 m 毫米波射电望远镜,观测 Orion KL 星云的水分子微波激射辐射. 观测的实验室静止频率为 22.235080 GHz, 天空观测频率为 22.229590 GHz. 接收机系统前端为致冷的混频和 FET 前置中放,致冷温度约为 50 K. 经两级中频放大,射电讯号经滤波,放大和电平控制等处理,最后输入 1024 通道的声光频谱仪(AOS). 声光频谱仪的中心工作频率为 37 MHz,带宽为 12.38 MHz,频率分辨率为 12.09 kHz,对应水分子微波激射观测频率 ,其 Doppler 速度分辨率为 0.163 $\mathrm{km\cdot s^{-1}}$. 整个系统温度约为 320—350 K,观测积分时间为 240 s,系统灵敏度约为 1 K. 频谱观测很重要的一个工作是频率校准,为了获得声光频谱议中心频率和各个通道之间隔的漂移和变化,在第二中放输入一个梳状讯号频率间隔为 1 MHz. 我们发现中心频率所在通道位置基本没有漂移,位于 506 通道上. 平均通道频率间隔为 12.09 ± 0.05 KHz. 某一些通道的频率漂移达一个通道数,即 12 kHz,对应视向速度测量精度约为 0.16 $\mathrm{km\cdot s^{-1}}$.

由于德令哈 13.7 m 天线系统是线极化观测系统,它所测量的功率与线馈源极化方向的位置角 ϵ 有关系[2]

$$P(\epsilon) = \frac{Q}{2}\cos2\epsilon + \frac{U}{2}\sin2\epsilon + \frac{I}{2},$$

其中 ϵ 为馈源极化方向与南北向的夹角, Q, U 和 I 为 Stokes 参数. 在 $I\gg U$, $I\gg Q$ 的情况下,有近似关系 $I/2(1-m)\leqslant P(\epsilon)\leqslant I/2(1+m)$,其中 m 为线偏振度 $(Q^2+U^2)^{1/2}/I$. 对于 Doppler 速度为 7.9 $\mathrm{km\cdot s^{-1}}$的水微波激射子谱,有 (5%)/年的线偏振度变化速率[2],估计在观测时间的线偏振度为 10%,则我们用线性馈源测量得出的总微波激射辐射强度误差最大不超

1) Jy 是射电天文学中最常用的流量单位, 1 Jy $=10^{-26}\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot Hz^{-1}}$.

过 10%.这个估计提供了一种不同观测资料之间的可比性.

在观测中,观测的微波激射谱作了通道增益改正和大气吸收改正.观测资料最后转换成 DRAWSPEC 谱线处理软件包的数据格式.本文所有频谱观测结果都是由 DRAWSPEC 软件包处理得到的.

3 观测结果

3.1 Orion KL 水分子微波激射谱

图 1(a)给出 Orion KL 的水分子微波激射谱线.我们检测到非常强的低速线辐射,没有检测到弱的高速分量.低速线辐射速度范围从 −25 到 +25 km·s^{-1}. 为了清楚的看到低于天线温度 100 K 的微波激射辐射子谱,我们放大速度范围从 −10 到 30 km·s^{-1}的微波激射辐射谱特征(参看图 1(b)).从这张图上,可以清楚地证认 11 个大于天线温度 10 K 的子谱.利用高斯拟合的方法,获得表 2 给出的各个子谱的峰值流量,线心速度和线宽.在微波激射辐射的天线温度转换为流量密度时,选取 13.7 m 天线的转换因子 38 Jy·K^{-1}.微波激射辐射强度最大的子谱其观测线宽为 0.7 km·s^{-1},对应的水分子微波激射区的气体运动温度为 200 K.

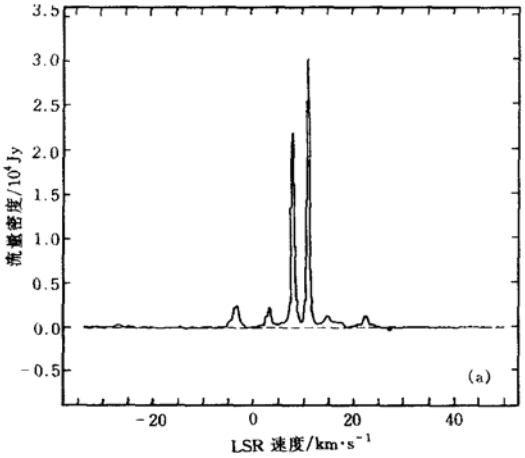

图 1(a) Orion KL 的水分子微波激射谱

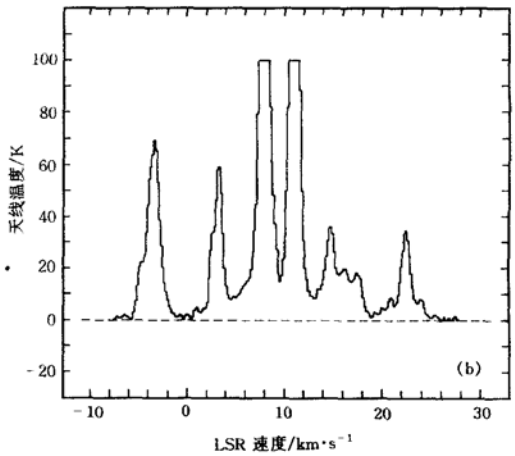

图 1(b) Orion KL 水分子微波激射谱中较强部分的放大

表 2 Orion KL 主要水分子微波激射子谱的观测参数

编 号	线心速度/km·s^{-1}	线宽/km.s^{-1}	峰值流量密度/Jy
1	−4.8±0.3	0.7±0.3	640
2	−3.4±0.1	1.4±0.3	2540
3	3.2±0.1	1.4±0.2	2000
4	7.9±0.0	0.7±0.0	21600
5	11.1±0.0	0.7±0.0	29400
6	14.7±0.3	1.6±0.7	1250
7	16.2±0.5	0.8±0.5	585
8	17.4±0.6	1.4±0.5	700
9	20.9±0.6	0.9±0.6	310
10	22.4±0.2	1.1±0.5	1290
11	23.9±0.6	0.9±0.4	300

从图 1(b),还可以发现许多小于天线温度 10 K 的子谱,增加观测的积分时间和提高频率分辨率,有希望得到更多的弱子谱.

如果以 10 km·s^{-1}为谱的速度中心,从图 1(a),可以发现 Orion KL 的水分子微波激射辐射线谱非常对称.它反映 Orion KL 分子云中对称的分子外流,或者是分子云膨胀壳层结构.从对称的三个峰来看,分子云呈多重外流结构.可能由于密度梯度的关系,最外层的微波激射子源外流速度快,而最内层的最慢.

3.2　长期流量密度变化

图 2 给出 Doppler 速度为 7.9 km·s^{-1}微波激射子谱的峰值流量长期变化的曲线.其中 1980 年至 1987 年的资料选自 Haystack 37 m 天线的观测结果[2],其余选自紫金山天文台青海德令哈站的 13.7 m 天线[6,7].Haystack 天文台的相对流量密度精度约为 2%[2],紫金山天文台 13.7 m 的相对流量密度精度不大于 3% .两站绝对流量密度差异主要来自两地大气吸收改正的误差.据我们估计精度接近 10%.这个子谱的峰值流量随时间的变化,可以分为三种变化分量:宁静分量、缓变分量和微波激射爆发.宁静分量是指 Orion KL 没有活动时的辐射,辐射流量在 5×10^5 Jy 以下.从图 2 上看,1987 年至今都属于这种"宁静"辐射阶段.在微波激射爆发以前,辐射流量有上升的趋势,在爆发以后,有较长时间的缓慢衰减阶段,变化时间尺度约为 1 年,而变化的幅度约为一倍. 例如从 1982 年 5 月的流量密度 7×10^5 Jy 变化到 1983 年 5 月的 1×10^6 Jy.这种变化可以称为缓变分量.在时间 1—3 个月,流量密度突变 5—6 倍,是微波激射辐射中的爆发分量,例如 1983 年 6 月至 10 月,Orion KL 水微波激射辐射峰值流量密度增加了两倍,1984 年 9 月至 11 月,流量密度值又增加了两倍.

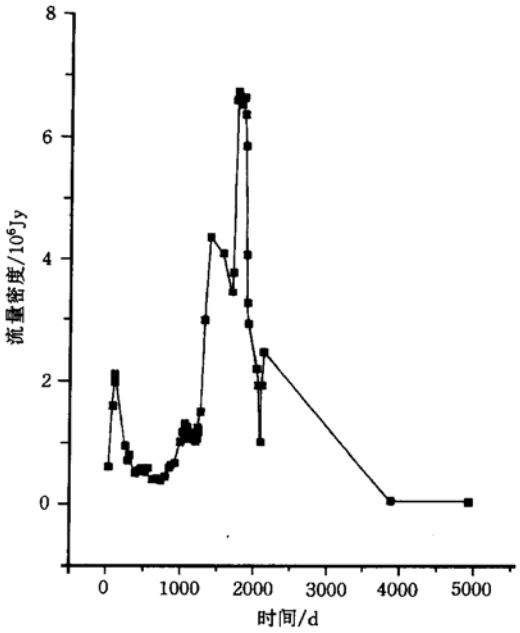

图 2　Orion KL 水微波激射辐射随时间的变化　大部分资料选自 Garay 等[2]的观测资料;1989 和 1992 年的资料选自文献[6,7];横坐标原点对应于 1980 年 1 月 1 日

从图 2 上看, Orion KL 目前正处于"宁静"阶段,与 1984 年 10 月比较,,流量密度低近两个数量级.

4　微波激射模型与微波激射区的物理参数

为了获得微波激射区的物理参数,建立一个合理的微波激射区模型是重要的.从甚长基线干涉仪(VLBI)的观测[8],Orion KL 分子云的水分子微波激射辐射来自以红外源 IRc2 为中心,直径大约为 5×10^{12} m 的活动恒星形成区.它由许多大小约为 10^{11} m 的微

波激射子源组成[9].图 1 水微波激射谱中的每一条子谱对应于每一个微波激射子源的辐射.考虑分子云中,分子气体的物理条件,一个最简单的微波激射子源几何模型是球.

4.1 微波激射子源的真尺度

由于水微波激射辐射非常强,一般来说,微波激射是一种部分饱和或者完全饱和的辐射.不失一般性,先假定 Orion KL 分子云中的水微波激射是部分饱和的.中心为一个半径为 a 的非饱和辐射核,外面是半径为 R 的饱和辐射壳.我们观测到的是非饱和辐射核.微波激射子源的实际尺度 R 与核半径 a 之间有关系[10]

$$a/R = 1.3(A/\eta\Gamma)^{1/4}, \tag{1}$$

其中 η 为抽运效率,在星际水微波激射区,可以选取 $\eta = 0.01$[11];A 和 Γ 分别为 Einstein 系数和衰减率,其值分别为 $1.9\times10^{-9}\ \mathrm{s}^{-1}$和 $1\ \mathrm{s}^{-1}$.VLBI 观测表明水微波激射子源的观测直径为 $2a = 10^{11}$ m,则微波激射子源的实际半径约为 $R = 2\times10^{12}$ m.

4.2 辐射立体角

由于微波激射辐射是一个微波激射放大过程,微波激射辐射射线的传播路径,对微波激射辐射强度影响很大.饱和微波激射辐射强度与路径长度呈线性关系,而在非饱和微波激射中是指数关系.在微波激射源中的任何一点,对观测者而言,传播路径都不尽相同.对一个球几何形状的微波激射,穿过球心的射线辐射强度最强.这样,辐射明显集中在一个小立体角内,这称为微波激射辐射的束效应(beaming).对于部分饱和或完全饱和的辐射,球型微波激射的辐射束立体角为 $\Omega = \pi(a/R)^2$,利用(1)式的计算结果,球型微波激射辐射束立体角为 0.002 rad.

4.3 微波激射子源辐射亮温度和辐射饱和温度

按照 Rayleigh-Jeans 定律,一个微波激射子源的辐射亮温度与它的辐射流量之间有关系

$$T_{\mathrm{B}} = \frac{c^2}{2k_{\mathrm{B}}\nu^2}\frac{S}{\Omega_{\mathrm{s}}}, \tag{2}$$

式中 c 为光速;k_{B} 为玻耳兹曼常数;ν 为观测频率,对于我们的观测实验,$\nu = 22.235$ GHz;S 为观测流量密度,Doppler 速度为 $7.9\ km\cdot s^{-1}$ 的微波激射子源的值为 2.16×10^4 Jy;Ω_{s} 是一个角径为 θ_{s} 微波激射子源相对于观测者所张的立体角,$\Omega_{\mathrm{s}} = (\pi/\ln2)(\theta_{\mathrm{s}}2^{-1})^2$.Orion KL 分子云的距离 D 为 500 pc[1)],则有 $\Omega_{\mathrm{s}} = 5\times10^{-17}$ rad.把以上这些值代入公式(2),这个微波激射子源的亮温度为 $T_{\mathrm{B}} = 3\times10^{13}$ K.从微波激射辐射理论,有微波激射辐射饱和亮温度[12]

$$T_{\mathrm{s}} = \frac{h\nu}{2k_{\mathrm{B}}}\frac{\Gamma}{A}\frac{4\pi}{\Omega}, \tag{3}$$

把星际水微波激射的衰减率 Γ 和 Einstein 系数 A 代入上式,得饱和亮温度 $T_{\mathrm{s}} = 5\times10^{11}$ K.比较微波激射子源的亮温度 T_{B} 的饱和亮温度 T_{s},有 $T_{\mathrm{B}} \gg T_{\mathrm{s}}$,因此水微波激射辐射可以认为是一种完全饱和的微波激射辐射.

4.4 微波激射区氢分子数密度

在球几何模型下,在微波激射辐射两能级 6_{16}和 5_{23}上的水分子数密度为

---

1)天文距离单位 pc = 3.085678×10^{16} m.

$$n_{ij} = \frac{8}{h\nu}A^{3/4}(\Gamma\eta)^{-7/4}\frac{\Delta\nu}{D}\theta_s^{-3}S, \tag{4}$$

其中 D 为源的距离,$\Delta\nu$ 为微波激射子源所对应微波激射子谱的半功率全宽,对于 Doppler 速度为 7.9 km · s^{-1} 的微波激射子源,$\Delta\nu = 0.7$ km · s^{-1}.把其它有关量代入(4) 式,在微波激射辐射能级上,水分子的数密度为 $n_{ij}(H_2O) = 8\times10^8$ m^{-3}.考虑在星际微波激射区,它与水分子体密度 $n(H_2O)$ 和氢分子体密度 $n(H_2)$ 有关系,$n(H_2)/n(H_2O) \approx 10^4$ 和 $n(H_2O)/n_{ij}(H_2O) \approx 10^2$.则微波激射活动区的氢分子数密度为 8×10^{14} m^{-3}.

4.5 微波激射辐射微波率(microwave rate)与分子布居数反转

微波率 W 可以理解为微波激射辐射能级之间,辐射场对布居反转影响的程度,其值为 BJ,B 为另一个 Einstein 系数,J 为平均辐射强度.考虑 $B = Ac^2/2h\nu^3$ 以后,有

$$BJ = A\frac{k_B T_B}{h\nu}\frac{\Omega}{4\pi}. \tag{5}$$

把微波激射辐射亮温度 T_B 代入(5) 式,得微波率为 8 s^{-1},在分子微波激射辐射两能级之间的布居反转粒子数密度为

$$\Delta n = \frac{\eta n_{ij}}{1 + 2BJ/\Gamma} = 4.2\times10^5\ \mathrm{m}^{-3}. \tag{6}$$

5 结　　论

利用紫金山天文台青海观测站的 13.7 m 毫米波望远镜,观测 Orion KL 星云的水分子微波激射辐射.得到以下几点结论:

1.Orion KL 星云的水微波激射辐射,在我们观测期间仍处于宁静阶段,其峰值流量密度比微波激射爆发相的流量低约两个数量级.

2. 按照判据 $T_B \gg T_s$ 和 $2W \gg \Gamma$,在宁静相的 Orion KL 星云的水微波激射仍然处于完全饱和的辐射态.

3. 处于宁静相的微波激射区,氢分子数密度为 $8\times10^{14}(H_2)$m^{-3}.按照(4)式计算的氢分子数密度与观测流量密度有正比关系,则爆发时微波激射区的氢分子数密度大约为 $10^{17}(H_2)$m^{-3}.这给出了研究微波激射爆发、缓变和宁静相形成机制的一个约束条件.

4. 从 Orion KL 分子云的水微波激射辐射谱的双峰结构,处于宁静相的水微波激射区,具有对称外流或膨胀的动力学结构.从整个低速谱来看,若以 10 km·s^{-1}为中心速度,两边对称的有三个峰,这可能是微波激射活动区多层结构引起的.假如这种模型是合理的话,那么最外层的外流速度大约为 14 km·s^{-1}, 第二层的外流速度为 6 km·s^{-1},最内层的外流速度为 1—2 km·s^{-1}.

[1] G.J. Melnick, in Astrophysical Masers, ed. by A.W. Clegg and G.E. Nedoluha (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1993), p.148.

[2] G. Garay, J. M. Moran and A.D. Haschick, *Ap.J.*, **338**(1989), 244.

[3] L.I. Matveenko, L.R. Kogan and V.I. Kostenko, *Soviet Astronomy.(Letters)*, **6**(1980), 279.

[4] Z. Abraham, J.W.S. Vilas Boas and L.E. del Ciampo, *Astr.Ap.*, **167**(1986), 11.

[5] C. Montes, *Ap.J.*, **216**(1977), 329.
[6] 王京生、李双强、孙金江, 紫金山天文台台刊, **12**(1993), 187.
[7] 周震浦等, 紫金山天文台台刊, **10**(1991), 47.
[8] R. Genzel, M.J. Reid, J.M. Moran, D. Downes, *Ap.J.*, **244**(1981), 884.
[9] R. Genzel *et al.*, *Ap.J.(Letters)*, **237**(1979), L73.
[10] P. Goldreich and D.A. Keeley, *Ap.J.*, **174**(1972), 517.
[11] J.M. Moran, in Molecular Astrophysics, ed. by T. Hartquist (Cambridge University Press, 1989), p.389.
[12] 郑兴武, 空间科学学报, **11**(1991), 1.

PHYSICAL PROPERTIES OF THE ORION - KL SUPER WATER MASER IN "QUIESCENT" PHASE

ZHENG XING-WU LING ZHAO-FEN
(*Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing* 210008)
LÜ JING HAN FU
(*Purple Mountain Observatory, Nanjing* 210008)
(Received 5 June 1995)

ABSTRACT

The observations of the water vapor maser emission toward the Orion - KL nebala have been carried out with the 13.7 m radio telascope at Delingha station of Purple Mountain Observatory. The maser emission is characterized by the "quiescent phase" with the peak flux density 3×10^4 Jy, two orders lower than that during the "outburst phase". The maser action in the "quiescent phase" is full saturated with the quiescent level of brightness temperature 3×10^{13} K. On the assumption of spherical maser and the saturated state, the hydrogen density of $8\times10^{14}(H_2)m^{-3}$ and the population inversion of $5\times10^5(H_2O)m^{-3}$ in the masing region are derived.

The Orion super water vapor maser spectrum consists of emission in three symmetric velocity intervals centered at the velocity 10 $km\cdot s^{-1}$. This may imply that there are symmetric outflows or expanding shells with constant velocities in the masing region.

PACC: 9580D; 9840