

星际 H₂O 与 OH 分子脉泽的统计与激发机制探讨

刘汉渊¹, Forster J R², 孙 锦³

1. 北京师范大学物理系, 北京 100875
2. University of California, Berkeley, 42231 Bidwell Road, Hat Creek, CA 96040
3. 北京师范大学天文系, 北京 100875

摘 要 报告了大质量恒星形成区的星际分子脉泽巡天观测结果。所观测到的 H₂O 与 OH 分子脉泽可分为三类, 它们的数量近似相等, 寿命亦近似相等~10⁵ 年, 但 H II 区普遍短缺。提出了一种新的辐射机制模型, 它克服了旧辐射模型的缺点, 可以解释星际 H₂O 与 OH 脉泽的成因, 以及作者的观测统计结果。

主题词 星际分子脉泽; 激发机制; H II 区; 巡天观测

中图分类号: O561.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2006)03-0408-03

引 言

微波激射(Maser, 脉泽)在原子与分子的研究领域中的应用日趋广泛^[1, 2]。而脉泽的原理与技术应用于天体物理课题的研究也是很有意义的工作领域。根据天体物理的发现, 在宇宙的恒星形成区有许多脉泽现象存在。尤其在大质量恒星形成区经常有 H₂O 与 OH 分子脉泽与之伴随。这是 20 世纪天体物理学重大发现之一, 是星际的一个奇特现象, 引起诸多物理与化学工作者的兴趣, 对其激发机制的研究成为揭示这些区域物理与化学环境的关键所在。但这个问题在学术界尚未形成较公认的看法, 无论是观测资料的积累或理论分析的研究都嫌不足, 甚至连 H₂O 与 OH 脉泽是否共生都仍无定论。

为此我们利用美国甚大天线阵, 在 74 个恒星形成区进行了巡天观测^[3], 其结果是, 我们发现:

22 个孤立的 OH 脉泽, 其中只有四个脉泽者 H II 区伴随;

36 个孤立的 H₂O 脉泽, 均无 H II 区伴随;

39 个 H₂O/OH 脉泽协合体, 其中只有九个脉泽有 H II 区伴随。可见, 这三类脉泽的个数是同数量级的, 而有 H II 区伴随的还不到一半。这些统计结果是现存理论很难解释的。

我们抓住脉泽形成区的共同特征, 应用光谱学理论, 对星际 H₂O 与 OH 分子脉泽提出一种新的激发机制。它属于辐射激发模型, 但克服了旧辐射模型的困难。可以用它解释

星际分子脉泽的成因及我们的天文观测统计结果。

1 星际 H₂O 与 OH 分子脉泽的生成原理

众所周知, 在大质量恒星形成区有大量氢与水分子存在^[4], 同时中心星在发出强烈辐射。其中波长 $\lambda < 91.2$ nm 的光子将照射 H 而形成 H II 区; 而大量 $\lambda \geq 91.2$ nm 的光子则会使 H₂O 分子激发与离解。水蒸气对 UV 的吸收表现为宽的连续吸收谱, 它可以分为若干光谱带, 具有明显的预离解特征^[5]。我们将 H₂O 分子能级分为两组, A 组是 $K_a = 0, 1$ 及 $K_c = j$, 即 J_0, j 及 J_1, j 能级。其他能级属于 B 组。即, A 组能级的 K_a 值小, 而 B 组能级的 K_a 值大。H₂O 分子受到 VUV 光子激发后, 将产生预离解。其预离解概率 P 为^[6],

$$P = (8\pi^2/h^2) |\langle f | H' | i \rangle|^2 \rho(E) \quad (1)$$

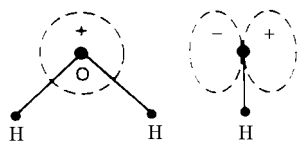
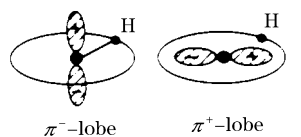
可见预离解率与 K_a^2 成正比, 故在 A 组与 B 组分子能级间可形成粒子数分布反转, 我们观测到的所有天文星际 H₂O 脉泽跃迁: $6_{16} \rightarrow 5_{23}$, $5_{15} \rightarrow 4_{22}$, $4_{14} \rightarrow 3_{21}$, $3_{13} \rightarrow 2_{20}$, $10_{29} \rightarrow 9_{36}$, $7_{53} \rightarrow 6_{60}$, $6_{43} \rightarrow 5_{50}$ 及 $6_{42} \rightarrow 5_{51}$, 其上能级恰都属于 A 组能级, 而下能级都是属于 B 组能级; 或上能级的 K_a 值小于下能级的相应值, 故可产生脉泽辐射现象。

星际 OH 分子主要由 H₂O 光离解而来, 总是 H₂O 分子的 $1b_1$ 电子优先被激发和离解。由分子轨道理论可知^[7], $1b_1$ 电子的波函数振幅图象是垂直于 H₂O 分子平面的, 如图 1。根据对称性守恒, 新生的 OH 分子总是优先布居在 π^- 态, 即 Λ 双分裂的上能态^[8], 如图 2。由此造成了 Λ 双能级间粒子数分布的反转, 从而说明了 OH 分子脉泽的成因。

收稿日期: 2004-12-18, 修订日期: 2005-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(20073005, 19873003)资助项目

作者简介: 刘汉渊, 1940 年生, 北京师范大学物理系教授

Fig. 1 $1b_1$ electron orbitalFig. 2 π^- and π^+ lobe of OH

2 星际脉泽的空间分布

2.1 星际分子数密度的限制

星际脉泽分子数密度受到两方面的限制,一方面,它必须足够高以提供足够多的脉泽光子;另一方面,它又不能过高以避免分子能级的热化。星际 H_2O 和 OH 分子对 H_2 分子的相对丰度可认为是常数, $f_{\text{H}_2\text{O}} \sim 10^{-4}$, $f_{\text{OH}} \sim 10^{-5}$ 。故对 H_2O 与 OH 粒子数的限制相当于对 H_2 分子粒子数的限制。碰撞对脉泽能级的作用包括:激发、去激发、热化与猝灭。如果辐射去激发作用较碰撞占优势,则有可能造成相应脉泽能级粒子数分布的反转;反之,则脉泽能级将被热化,破坏粒子数的反转,形成玻尔兹曼分布。这是任何模型都必须考虑的问题。

设能级 i 的粒子数为 N_i , 则可有 N_i 的速率方程

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_j R_{ji} N_j - \sum_{j>i} R_{i<j} N_i + \sum_{j \neq i} (C_{ji} N_j - C_{ij} N_i) \quad (2)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, n-1$; $j = 1, 2, \dots, n$ 。 R_{ji} 是能级 j , i 间净辐射跃迁概率, C_{ji} 是与其他分子碰撞时从能级 j 到能级 i 的碰撞速率。显然, 只有当

$$C_{ji}/R_{ji} < 1 \quad (3)$$

时, 才可能形成脉泽; 反之, 若上式左端 ≥ 1 , 则相关能级热化, 脉泽将被猝灭。

对于星际 H_2O 分子的非弹性碰撞, 其主要碰撞对象是 H_2 分子, 因为 H_2 是星际空间的最主要成分。设 C 是此二分子的总碰撞速率, 则有

$$C = [\text{H}_2] \cdot \sigma \cdot V_c \quad (4)$$

其中, $[\text{H}_2]$ 是氢分子数密度, σ 是非弹性碰撞截面, $\sigma \sim 10^{-16} \text{ m}^2$, V_c 是 H_2O 与 H_2 分子的相对速度, $V_c \sim 10^5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 从(3, 4)式可得到 $[\text{H}_2]$ 的上限 $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 更高的 $[\text{H}_2]$ 将热化相关能级, 使脉泽猝灭。

另一方面, 为了保证脉泽的足够强度, $[\text{H}_2]$ 数量又不能太低, 由此可推出 $[\text{H}_2]$ 的下限。典型的星际 H_2O 脉泽光子发射率 $\sim 10^{16} \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$ (n 为光子数), 脉泽区线度 $\sim 10^{14} \text{ cm}$, 由此可得到 $[\text{H}_2]$ 的下限 $\sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$, 详见文献[9]。

对于星际 OH 脉泽, 可进行与上面类似的讨论。不过与该脉泽相应的有关数据是: $\sigma \sim 10^{-15} \text{ m}^2$, $V_c \sim 6 \times 10^4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 脉泽光子发射率 $\sim 10^{14} \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$, 脉泽区线度 $\sim 5 \times 10^{15} \text{ cm}$ 。由此得到星际 OH 脉泽所要求的 $[\text{H}_2]$ 的上限 $\sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$, $[\text{H}_2]$ 的下限 $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 。

2.2 H_2O 与 OH 星际脉泽的空间分布

由上面的结果, 可推得星际 H_2O 与 OH 脉泽的空间分布情况。在离中心星体较近的区域, 有较高的分子数密度与较高的温度。在 $[\text{H}_2] = 10^{6-10} \text{ cm}^{-3}$ 的区域, 将出现孤立的 H_2O 脉泽。而在更远的区域, 那里分子数密度较低, 在 $[\text{H}_2] = 10^{5-8} \text{ cm}^{-3}$ 的区域, 将出现孤立的 OH 脉泽, 因为 H_2O 脉泽离中心星体半径较近, 而 OH 脉泽离得较远, 所以前者分布较密集, 而后者分布更为扩展。在二者的中间区域, 那里分子数密度亦取中间值 $\sim 10^{6-8} \text{ cm}^{-3}$, 将会有 $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}$ 脉泽协合体生成。

3 星际脉泽的演化进程

以前的理论对于解释大质量恒星形成区的分子脉泽观测事实还存在诸多困难, 诸如脉泽的长寿命, H II 区的短缺, 各类脉泽的数量比等。用我们的理论则可以解决这些难题。我们发现以前的模型没有考虑中心星体的万有引力。其实只要在我们的模型中加进万有引力的作用, 则会有新的图景, 可发现存在一个临界半径 R_c , 在此半径以下, 大质量中心星体及其 H II 区的演化是缓慢而平滑的^[10], 它们周围的气体分子密度的变化也是缓慢而平滑的, 由此可解释脉泽相的较长的寿命 $\sim 10^5$ 年, 及三类脉泽数量近似相等这一观测统计结果。由于 H II 区的演化也是缓慢而平滑的, 在开始阶段它将因体积过小而处于探测极限之下, 不被发现。这又解释了 H II 区短缺这一观测事实。观测表明, 处于离中心星体最近的 H_2O 脉泽, 其 H II 区短缺现象也最严重, 这与我们的理论一致。

总之, 我们提出了一种新的大质量恒星形成区的分子脉泽激发机制。它属于辐射激发机制, 但克服了旧辐射模型的缺点。它能够较简明地、统一地解释星际 H_2O 与 OH 两种分子脉泽的形成机理, 及各项观测事实。诸如, 它们的数量近似相等的三种存在形式, 它们的长寿命, 它们的 H II 区的普遍短缺等。我们的模型与各种天文条件是成协的, 是一种有前途的新模型。

参 考 文 献

- [1] LIU Ke-ling(刘克玲). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2005, 25(1): 95.
- [2] YANG Yi, HOU Xiang-yan, WANG Shu-jun, et al(杨屹, 侯翔燕, 王书俊, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2004, 24(12): 1672.
- [3] Forster J R, Caswell J L. *Astrophys. J.*, 2000, 530: 371.
- [4] Van Dishoeck E F, Wright C M, Cernichano J, et al. *Astrophys. J.*, 1998, 502: L173.
- [5] Ishiguro E, et al. *J. Phys. B*, 1978, 11: 993.
- [6] Liu H, Sun J, Thissen T. *Astrophys. and Space Science*, 2004, 289: 147.
- [7] Andrese P, et al. *J. Chem. Phys.*, 1984, 80: 2548.
- [8] Liu H, Xu L H, Sun J. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2000, 21(3): 395.
- [9] Liu H, Forster J R. *Astrophys. J.*, 2005, Submitted.
- [10] Keto E. *Astrophys. J.*, 2002, 580: 980.

The Survey and Its Interpretation for Interstellar OH and H₂O Masers

LIU Han-peng¹, Forster J R², SUN Jin³

1. Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2. University of California, Berkeley, Hat Creek Radio Observatory, 42231 Bidwell Road, Hat Creek, CA 96040, U. S. A

3. Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract A statistics of sky survey for interstellar H₂O and OH masers is presented. These masers can be classified into 3 categories. The total number of sources in each category is of the same order of magnitude, and they can maintain $\sim 10^5$ years. But there are fewer than half masers with detectable H II regions. An improved radiative pumping mechanism is proposed, and it overcame the known drawback of former radiative models. The observationally statistical results can be interpreted by both the new mechanism and the evolutionary model with gravitational force of star responsible for the H II region.

Keywords Interstellar masers; Pumping mechanism; H II region; Sky survey

(Received Dec. 18, 2004; accepted May 18, 2005)