

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.02.07

星际介质 PDR 和 XDR 结构的 微波谱线诊断

连晓丽^{1,2,3}, 安 涛^{1,3}, 洪晓瑜^{1,3}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 射电天文重点实验室, 南京 210008)

摘要: 星际介质 (ISM) 的物理性质和化学平衡受多种加热和冷却过程的影响。光子主导区 (PDR) 和 X 射线主导区 (XDR) 是恒星形成过程中星际介质的两个主要结构。PDR 和 XDR 区的主导能源机制不同, 造成星际介质的物理性质和化学成分上有很大不同, 反映在不同种类分子、同种分子不同跃迁能级之间以及分子同位素之间的谱线强度比有显著差异, 因此可以利用分子谱线强度比作为区分 PDR 和 XDR 的示踪工具。PDR 和 XDR 模型的数值模拟表明, 分子谱线中 HNC/HCN、HCN/HCO⁺ 以及 HCN/CO 谱线强度比可以有效地区分 PDR 区和 XDR 区。此外, CN/HCN、NO/CO 以及 HOC⁺/HCO⁺ 的柱密度比值也可以指示 PDR 和 XDR 区。PDR 和 XDR 的微波分子谱线诊断技术已经应用在河外星系的物理和化学演化研究中, 不仅证实了该技术的有效性, 而且在 PDR 和 XDR 模型中引入机械能反馈机制后, 使得模型能够更贴切地符合观测结果, 为理解河外星系的演化打开了一扇新的窗口。

关键词: 活动星系核; 星际介质; 光子主导区; X 射线主导区

中图分类号: P155.2 **文献标识码:** A

1 引 言

星际介质 (interstellar-medium, 简称 ISM) 是对恒星际空间气体、尘埃微粒、磁场, 以及作相对论性运动的电子、质子和其他原子核的统称。气体和尘埃是星际介质的主要成分, 是星系中重要的重子物质, 也是形成恒星的原料。银河系中大约有 1000 亿颗恒星, 质量从 $0.1 M_{\odot}$ 到 $100 M_{\odot}$ 大小不等, 大约占可见物质的 90%, 其他 10% 可见物质就是以气体和尘埃为主的星际介质^[1]。尽管星际介质只占星系总体质量的很小一部分, 但是它与恒星的形成、演化和死亡的整个过程密切相关。不同星系之间的根本差别之一便体现在星系中星际介质的分布以及组成成分上的差异^[2]。因此, 星际介质的研究对于理解星系的演化十分必要。

收稿日期: 2012-10-25; 修回日期: 2013-04-08

资助项目: 973 项目 (2013CB837900); 中国科学院空间科学战略性先导科技专项 (XDA04060700)

与传统的光学波段相比,射电波段不受消光的影响,是研究星际介质的一个新窗口。红外、远红外以及毫米、亚毫米波望远镜的大量投入运行,使得人们能够深入到致密分子云的核心观测更高密度的气体以及尘埃。近年来有很多关于星系中心致密气体的(远)红外以及(亚)毫米波的观测和研究^[3]。这些高密度气体与恒星形成直接相关,对于研究恒星的诞生和演化非常关键。气体密度和温度是表征星际介质物理性质的两个基本参量^[4]。星际介质的密度和温度的分布可相差很大,密度范围是 $0.1 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 温度低可至 10 K, 高可达到 10^7 K ^[5]。在恒星形成初期,气体由于引力不稳定性坍缩,此时的密度可以达到 $10^4 \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$; 对于恒星演化晚期的行星状星云,分子气体的密度只有 $10 \sim 100 \text{ cm}^{-3}$, 但是此时气体的温度却可以达到 10^4 K ; 在原恒星阶段可以发现密度很高 ($10^8 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$), 而温度中等 ($10 \sim 300 \text{ K}$) 的气体^[6]。

历史上,原子和离子谱线的强度比(intensity ratio)一直是探测 ISM 物理性质的常用方法。近年来,分子谱线的强度比也逐渐成为诊断星际介质的有力工具。该方法的原理是,不同种类的分子谱线以及同种分子不同跃迁能级间的谱线所需要的激发条件各不相同,可以通过比较谱线强度的不同比值,来计算分子云的密度、温度等物理参数,通过分子(及离子)的丰度来推算星际气体的物理性质以及化学状态。在恒星形成区,依据辐射能源类型的不同,分子云处于两种不同状态中:光子主导区(photo-dominated region, 简称 PDR), 由来自恒星形成区的紫外辐射主导; X 射线主导区(X-ray dominated region, 简称 XDR), 由能量超过 1 keV 的 X 射线辐射主导。X 射线比紫外光子具有更强的穿透能力,能够影响到分子云内部更深范围,而且 X 射线的加热效率更高;基于这些基本性质的不同,PDR 和 XDR 对星际介质的物理和化学性质的影响有明显不同。

通过对 PDR 和 XDR 中辐射转移进行数值模拟,确定了一些可以用来诊断指示 ISM 性质的分子谱线。河外星系的分子谱线观测研究很好地支持了微波分子谱线的线强比是区分 PDR 和 XDR 模型的有效示踪器。继大速度梯度(large velocity gradient, 简称 LVG)模型之后,分子谱线强度比也逐渐成为诊断分子云物理和化学性质的一个有力工具。这一有力诊断工具,已经取得了丰硕的成果,线强比还可以用来诊断星系的类型以及化学演化。河外星系距离遥远,观测到的分子谱线辐射来自于整个星系,只能获得星系整体的观测性质。因此,可将分子谱线诊断工作推广到银河系恒星形成区,银河系的恒星形成区距离太阳系近,这样就能够通过高分辨率观测来研究单个恒星形成区的物理和化学演化,而且也可作为河外星系中恒星形成过程提供有益的参考。

本文的结构如下:第 2 章概括描述了 PDR 与 XDR 模型,对比了两种模型在加热和冷却机制、温度结构以及化学成分等方面的异同;第 3 章给出了 PDR 和 XDR 的理论模型,通过分别计算得到分子谱线之间的线强比,确定可以用来诊断星际介质性质的分子谱线;第 4 章介绍了 PDR 和 XDR 模型在河外星系研究中的应用,(超)亮红外星系和星暴星系的观测数据很好地支持和验证了 PDR 和 XDR 微波分子谱线诊断方法的理论预期;第 5 章结合红外以及(亚)毫米波望远镜的发展,提出未来开展此项研究工作的方向。

2 光子主导区 (PDR) 和 X 射线主导区 (XDR)

2.1 PDR 和 XDR 的描述

2.1.1 光子主导区

光子主导区和 X 射线主导区指的是在辐射场作用下分子云呈现的分层结构, 辐射场调控着各分层的物理性质和化学成分。由于辐射场的主导能源不同, 两者表现出不同的观测性质。

光子主导区是分子云演化过程中一个离子和分子的相互作用阶段的统称, 它是原子以及分子发射线的集中地。PDR 区的主导辐射来自分子云内部潜埋着的 OB 型恒星或者分子云周围的年轻大质量恒星的远紫外光子, 能量为 $6 \sim 13.6 \text{ eV}$ 。PDR 区中氢原子的典型密度为 $10^2 \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$, 典型温度为 $10 \sim 10^4 \text{ K}$ 。文献中光致解离区 (photo-dissociation regions) 和光子主导区 (photon dominated regions) 经常通用。

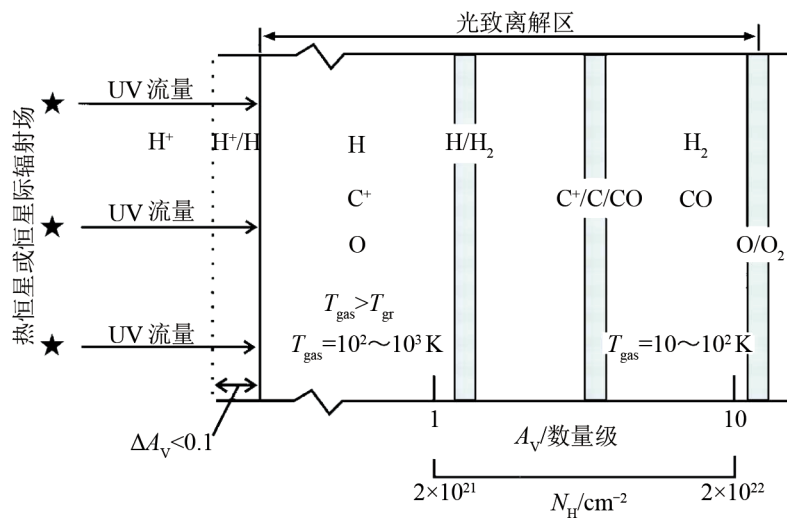


图 1 光致解离区 (PDR) 的结构示意图^[7]

图 1 是 PDR 区的分层结构示意图, 氢原子的柱密度从左到右依次升高。在分子云的核心区域即最高密度区 ($A_V \approx 10$), 也就是 $N_H \approx 2 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 时, 氢大多以分子形式存在, 碳原子以一氧化碳 (CO) 形式存在, 此处 PDR 存在大量的原子 (O, C)、离子 (C^+) 和分子 (H_2) 谱线发射。PDR 模型的自由参数分别是: 辐射场强度、温度、氢原子柱密度以及金属丰度。辐射场强度由参数 G_0 或者 I_{UV} 决定, 单位分别采用 1969 年 Habing^[8] 和 1978 年 Draine^[9] 定义的辐射场强度单位; G_0 是 Habing 通量, $G_0=1$ 对应于辐射场的流量是 $1.6 \times 10^{-10} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。金属丰度 Z 以太阳的金属丰度为单位 Z_\odot , 金属丰度影响含碳分子和含氧分子的种类以及丰度, 从而影响 PDR 区的热平衡以及化学演化。

2.1.2 X 射线主导区

X 射线主导区是星际气体演化过程中的另一种状态，此时主导星际气体物理性质和化学平衡的是 X 射线。XDR 区的辐射主要来自黑洞吸积或者年轻大质量恒星外流与星际介质碰撞生成的激波产生的 X-ray，X-ray 光子能量为 $1 < E < 100 \text{ keV}$ 。与 PDR 区相比，主导 XDR 区辐射的是能量高过 1 keV 的光子。这些光子与分子碰撞发生光致电离作用，电离过程中产生高速电子碰撞激发态的 H 和 H₂，使其激发 Lyman α 和 Lyman-Werner 光子。这些光子反过来可以电离 C 和 Si 原子，也可以电离或者离解 H₂ 分子和 CO 分子。

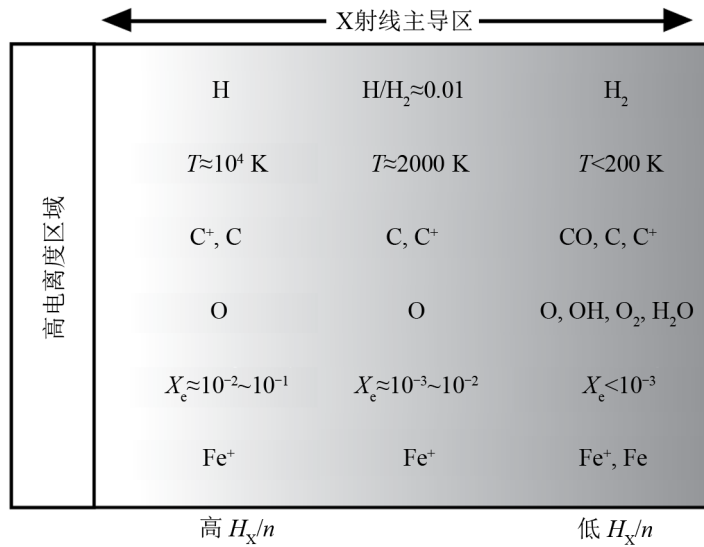


图 2 X 射线主导区 (XDR) 的结构示意图^[10]

图 2 是 X 射线主导区 (XDR) 的化学结构示意图，图中给出了表面温度、化学成分以及电离度与每单位密度的流量 (H_X/n) 之间的关系，其中 H_X 是 X-ray 的流量， n 是氢原子的密度。与 PDR (见图 1) 不同的是，在 XDR 区，H、H₂、C⁺、C 以及 CO 是同时共存的，而 PDR 区这些分子和原子是严格分层的。这与 X 射线光子较高的穿透能力直接相关。PDR 区和 XDR 区电离度存在较大差异，强 X 射线辐射场时，XDR 的电离度最高可以达到 $\chi \approx 10^{-1}$ ，而 PDR 中电离度 $\chi < 3 \times 10^{-4}$ 。

2.2 PDR 和 XDR 的物理性质和化学结构的比较

光子主导区和 X 射线主导区的物理和化学性质由复杂的天体辐射和化学反应过程决定。下面简单总结 PDR 和 XDR 中主要涉及的加热和冷却机制。

2.2.1 加热机制

PDR 和 XDR 中气体的加热机制^[11]主要有以下 7 种。

(1) 尘埃中多环芳香烃 (PAHs) 的光电辐射：多环芳香烃吸收远紫外光子失去电子，带有初始动能的电子与气体发生非弹性碰撞加热气体。

(2) 碳原子电离：碳原子光电电离加热 PDR 和 XDR 区。单个碳原子电离释放的能

量是 $\Delta E_C = 1.06 \text{ eV}$, 碳原子被电离的概率与辐射场的流量密度有关, 电离的概率是 $\kappa_{\text{ion}} = 1.76 G'_{0,\text{carbon}} \text{ s}^{-1}$, 其中 $G'_{0,\text{carbon}}$ 是辐射场流量密度, 因此碳电离的加热速率是 $\Gamma_C = \kappa_{\text{ion}} n(\text{C}) \Delta E_C$ ^[12]。

(3) H_2 的光致离解^[13]: H_2 吸收 Lyman-Werner 光子离解后一部分过剩的动能用于加热气体。

(4) H_2 的碰撞退激发: H_2 吸收远紫外光子, 被激发到高能态, 然后与气体碰撞退激发, 碰撞过程中加热气体^[14]。

(5) 气体分子与尘埃颗粒的相互碰撞: 当尘埃的温度高于气体的温度时, 两者的相互碰撞可以加热气体。

(6) 气体分子与尘埃颗粒间的粘滞 (viscous) 过程: 辐射压的加速使气体尘埃间存在粘滞效应, 尘埃的加速时标较短, 这使得过剩的动量传给气体, 从而加热气体。

(7) 宇宙射线加热气体: 在星际空间无处不在的宇宙射线^[15]也可以加热分子云。

2.2.2 冷却机制

PDR 和 XDR 的冷却机制^[12]主要有下列 5 种。

(1) 原子精细结构线冷却^[16]: PDR 中主要的冷却线有 $[\text{C II}]158 \mu\text{m}$, $[\text{O I}]63 \mu\text{m}$ 以及 $[\text{O II}]146 \mu\text{m}$ ^[17]; 在温度较高的 XDR 中, $[\text{C I}]9823 \text{ \AA}$, $[\text{C I}]9850 \text{ \AA}$ 线是主要的冷却剂, 随着温度降低 $[\text{O I}]6300 \text{ \AA}$ 线成为主要的冷却剂。

(2) 亚稳态激发线: PDR 中主要的原子和离子冷却线有 C , C^+ , Si , Si^+ , O , O^+ , S , S^+ , Fe 和 Fe^+ 发射线等; XDR 区的高速电子很容易与其他离子碰撞而失去能量, 产生的冷却线主要有 $[\text{C I}]9823$ 、 9850 \AA 以及 $[\text{O I}]6300 \text{ \AA}$ 激发线^[11]。

(3) 复合线冷却: 当温度达到 5000 K 时, 多环芳香烃离子和自由电子复合且级联跃迁至基态的过程中产生复合线; 复合线成为很好的冷却剂, 冷却效率与复合率有关。

(4) 分子谱线冷却: 主要来自 H_2 , CO 和 H_2O 分子的振动和转动跃迁线^[18], 其辐射频率集中在红外和亚毫米波。

(5) 中性氢的电离: 当表面温度 $T > 5000 \text{ K}$ 时, 中性氢的电离过程中吸收热量, 是主要的冷却机制。

3 PDR 和 XDR 的微波分子谱线判据

由于现在亚毫米波望远镜和干涉仪 (JCMT, IRAM, CARMA, SMA 等) 的角分辨率还不足以分辨河外星系中的单个分子云复合体, 所以对于河外源观测到的都是多个分子云复合体重叠产生的综合效应; 而对于银河系恒星形成区来说, 单天线的分辨率基本上就能够分辨分子云。以下的分析都是基于标准云模型, 用来标示分子云的不同物理化学参数。分子云在尺度、(柱) 密度等方面存在一定的分布范围, 分子云的模型拟合通常采用依次固定一些参数, 然后观察其他参数的变化依赖关系。

以 Meijerink 和 Spaans^[11] 提出的标准云模型为例, 表 1 给出了 3 个模型云的主要参数 (密

度、大小、柱密度、辐射场强度)。X-ray 主导区的辐射场采用 $F_X(E) = F(0)(E/1 \text{ keV})^{-\alpha}$ 的幂指数形式, 光子能量范围是 $1 \sim 100 \text{ keV}$, 此时 $\alpha = 0.9$ 。其中最低能量取值 1 keV , 原因在于能量低于 1 keV 的光子绝大部分被电离气体吸收了。

表 1 标准云参数^[12]

Type	r/pc	n/cm^{-3}	N/cm^{-2}	$G_0/\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$	$F_X/\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$
A	1	$10^4 \sim 10^{6.5}$	$3 \times 10^{22} \sim 1 \times 10^{25}$	$10^{-5} \sim 10^{-2}$	$1.6 \times 10^{-7} \sim 1.6 \times 10^{-5}$
B	10	$10^3 \sim 10^4$	$3 \times 10^{22} \sim 1 \times 10^{23}$	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-8} \sim 1.6 \times 10^{-6}$
C	10	$10^2 \sim 10^3$	$3 \times 10^{21} \sim 1 \times 10^{22}$	$10^{-6.5} \sim 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-9} \sim 1.6 \times 10^{-7}$

注: G_0 是 PDR 区流量的变化范围, 而 F_X 是 XDR 区流量的变化范围。

对于河外星系, 金属丰度在星系中的径向分布存在很大差异, 尤其对于晚型星系这个差异更是明显^[19]。因此模型也考虑了金属丰度对谱线强度比的影响^[20], 模型中总的金属丰度采用 2004 年 Asplund 和 Jenkins^[21] 文章中给出的平均值, 而不同演化时期的丰度, 采用 Jenkins 的耗散参数 (depletion factors)。计算原子和分子谱线强度所需要的碰撞参数都取自 Schöier 2005 年^[22]所用的莱顿大学的数据库。

以上介绍的 3 个标准云模型不仅给出了 PDR 和 XDR 结构的微波分子谱线的线强比, 同时给出了不同原子超精细结构发射线的线强比。原子超精细结构发射线的强度与气体的密度以及紫外辐射强度直接相关, 通过不同原子发射线的强度比可以对气体的密度以及辐射场强度给出约束。1990 年 Wolfire^[23] 首次给出了 PDR 区 [C II]/[Si II] 的线强比轮廓图。2006 年 Kaufman 等人^[24] 重新绘制了 PDR 区 Si II 以及 Fe II 的比值。接下来我们主要分析在不同的气体密度、辐射场强度以及分子云气体的柱密度下 PDR 区和 XDR 区分子谱线强度比的异同, 对于原子谱线的内容本文不再赘述。

3.1 分子的转动跃迁谱线

毫米和亚毫米波段的分子转动跃迁谱线能很好地诊断星际介质的物理和化学性质^[25]。这里给出一些常用的用于诊断 PDR 和 XDR 区的分子谱线, 其中分子谱线强度的计算采用一维辐射转移模型^[26]。

3.1.1 CO 转动跃迁谱线强度比

CO 是星际空间丰度仅次于 H_2 的分子, 同时 CO 也是目前可观测到能级最丰富, 强度最高的分子谱线系统。下面介绍用 CO(1-0)、CO(2-1)、CO(4-3)、CO(7-6)、CO(10-9) 以及 CO(16-15) 的不同能级谱线线强比诊断 ISM 的物理和化学性质的微波谱线诊断^[27]。

CO(1-0) 的临界密度 $n_{\text{cr}} = 3 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$, 激发能 $E/k = 5.53 \text{ K}$, 是光学厚的, 是分子云中最容易被激发的分子之一。图 3 给出了 PDR 和 XDR 模型中 CO(1-0) 谱线强度随密度和辐射场强度的变化图。从图 3 我们可以看出, 随着气体密度的变化 CO(1-0) 发射线的强度变化不大。在 PDR 区的低密度区 ($n = 10^2 \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$), CO(1-0) 谱线的强度仅仅随着密度的增加而加强; 在中等密度 ($n = 10^3 \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$) 和高密度区 ($n = 10^4 \sim 10^{6.5} \text{ cm}^{-3}$), CO(1-0) 谱线的强度不仅与密度成正比还与辐射场正相关。在 XDR 区由于辐射场较强, 随辐射场强度增

大, CO(1-0) 谱线强度有较明显的变化。对于低密度的 C 类云 $n = 10^2 \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$, 在 XDR 区的 CO(1-0) 谱线强度比 PDR 区大两个数量级; 对于高密度 $n = 10^4 \sim 10^{6.5} \text{ cm}^{-3}$ 的 A 类云, XDR 区的 CO(1-0) 谱线强度是 PDR 区的 4 倍多。

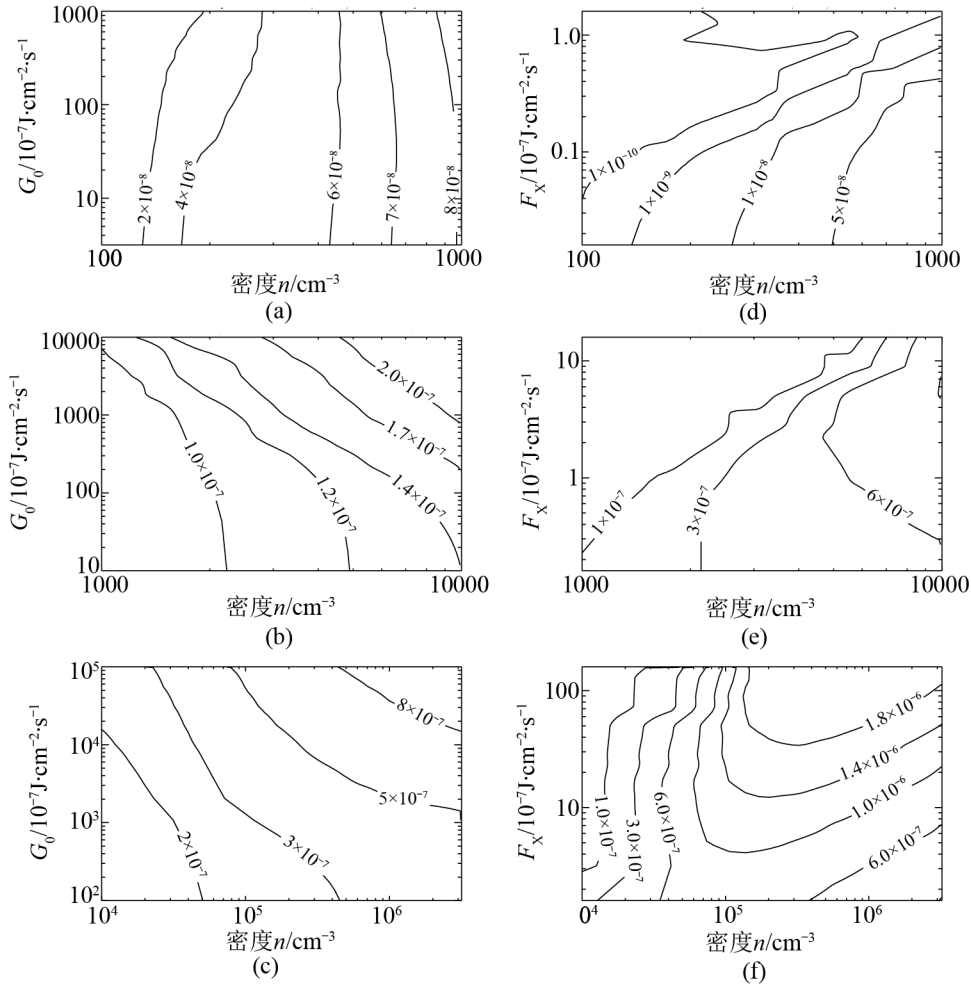


图3 PDR 和 XDR 模型中 CO(1-0) 谱线强度图^[12]

(a) 低密度 PDR 模型; (b) 中密度 PDR 模型; (c) 高密度 PDR 模型; (d) 低密度 XDR 模型; (e) 中密度 XDR 模型; (f) 高密度 XDR 模型。

CO(2-1) 的激发能和临界密度分别是 $E/k = 16.60 \text{ K}$ 和 $n_{\text{cr}} = 1 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 。CO(2-1) 的谱线强度与密度和辐射场有关, 与 CO(1-0) 的变化趋势相似。CO(2-1) 的激发能较 CO(1-0) 高, 因而 CO(2-1) 的强度更依赖于辐射场的强度。CO(2-1) 和 CO(1-0) 的临界密度和激发能相差不是很大, 在 PDR 中 CO(2-1)/CO(1-0) 的强度比值变化不大; 在 XDR 区辐射场的强度变化很大, 当辐射场很强时, CO(2-1)/CO(1-0) 的值最大可达 30。

CO(4-3) 的激发温度和临界密度分别是 $E/k = 55.32 \text{ K}$ 和 $n_{\text{cr}} = 4 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 。CO(4-3)/

CO(1-0) 的比值, 在低密度区即 C 类云只随着密度的增加而变大; 对于中密度区 B 类云, 在强的辐射场下, 柱密度开始起作用, 最大的比值出现在最高密度最强辐射场处。在 XDR 区 CO(4-3)/CO(1-0) 的比值与密度和辐射场都有关系, 变化范围是 2 ~ 40。

理论指出, CO 其他高能级的跃迁谱线 (CO(16-15), CO(10-9), CO(7-6) 等) 与 CO(1-0) 的强度比是区别 PDR 和 XDR 最有效的诊断工具, 比如: CO(16-15)/CO(1-0) 的比值在 PDR 区要远远小于在 XDR 区的比值^[25]。不过 CO 分子高能级跃迁的线强度很小, 只有空间红外望远镜 (如 Herschel/HIFI 等) 才能观测到。

3.1.2 $^{13}\text{CO}/\text{CO}$ 线强比

^{13}CO 的临界密度和激发能与 ^{12}CO 相近, 但是 ^{13}CO 的含量较少 (这里的分析采用了 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=40$), 因此 ^{13}CO 在大部分分子云中处于光学薄状态。 $^{13}\text{CO}/\text{CO}$ 的强度比与 ^{13}CO 光深成反比, 是分子云密度的指针。在同类型云中 XDR 的 ^{13}CO 含量比 PDR 要高, 导致 XDR 区中 ^{13}CO 的光深远远大于 PDR 中的光深, 因此 XDR 中 $^{13}\text{CO}/\text{CO}$ 的线强比明显低于 PDR。

3.1.3 [C I]609 $\mu\text{m}/^{13}\text{CO}(2-1)$ 线强比

[C I]609 $\mu\text{m}/^{13}\text{CO}(2-1)$ 线强比, 在同样的密度和辐射场时, PDR 区要远远小于 XDR。在 PDR 区这个比值在低密度区从 72 ($n = 10^2 \text{ cm}^{-3}$) 减小为 18 ($n = 10^3 \text{ cm}^{-3}$); 而在 XDR 区 [C I]609 $\mu\text{m}/^{13}\text{CO}(2-1)$ 线强比的变化迥然不同, 在模型 (A)(B)(C) 中均变化了多个数量级。

3.1.4 HCN/CO 线强比

HCN 分子的临界密度很高: HCN(1-0) 的临界密度是 $n_{\text{cr}} \approx 3 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$; HCN 的高能级跃迁的临界密度更高, HCN(2-1) 和 HCN(4-3) 的临界密度分别是 $n_{\text{cr}} \approx 4 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 和 $n_{\text{cr}} \approx 2 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 。因此 HCN 经常用作分子云中致密气体的指针, 在低密度和中密度分子云中 HCN 的辐射很弱。模型计算表明, PDR 中 HCN(1-0) 的线强度从低密度到中密度 (C 到 B), 分别是 3×10^{-18} 到 $2 \times 10^{-15} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 在 XDR 中这个数值更小。在密度大于 10^5 cm^{-3} 时, PDR 区的 HCN(1-0) 发射线强度是 XDR 区的 2 倍。HCN(4-3) 的轮廓图和 HCN(1-0) 相似, 只是比 HCN(1-0) 的梯度小, 图形显示更为紧密。

同种分子的线强度比值, 例如 CO(4-3)/CO(1-0) 的比值随着柱密度或者光深的变化而变化。不同种分子谱线的线强度比同种分子谱线复杂, 因为不同种分子的强度比与该类分子的百分比含量有关, 而 ISM 中的化学反应会影响到分子的含量。高密度区即 A 类云中 HCN(1-0)/CO(1-0) (见表 2) 与 HCN(4-3)/CO(4-3) 的线强比在 PDR 区要明显大于 XDR 区。通过 HCN/CO 的线强比能够区分 XDR 和 PDR 区域。HCN(4-3)/CO(4-3) 的变化趋势与 HCN(1-0)/CO(1-0) 相同, 区别在于线强比值较小。

3.1.5 HCN/HCO⁺ 线强比

辐射频率在 89.2 GHz 的 HCO⁺(1-0) 和 356.7 GHz 的 HCO⁺(4-3) 的临界密度分别是 $n_{\text{cr}} \approx 2 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 和 $n_{\text{cr}} \approx 4 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 。HCO⁺ 也是高密度气体的示踪分子, 因为 HCO⁺ 是离子, 也是分子气体化学状态的指示器。星际介质的电离度会影响到 HCO⁺ 的分子含量, 进而影响到 HCO⁺ 的线强比。XDR 区中电离度高于 PDR, 更加有助于 HCO⁺ 的形成, 因此 XDR 区的 HCO⁺ 谱线强度高于 PDR 区的谱线强度。

HCN(1-0)/HCO⁺(1-0) 和 HCN(4-3)/HCO⁺(4-3) 的值在柱密度大于 10^{23} cm^{-2} 时, PDR 是 XDR 的 4 ~ 10 倍。除了与电离度的相关性, HCN/HCO⁺ 的线强比与气体密度也有一定关系, 对于 XDR, 当柱密度低于 $10^{22.5} \text{ cm}^{-2}$ 时, HCN(1-0)/HCO⁺(1-0) 的线强比大于 1。

3.1.6 HNC/HCN 线强比

HNC/HCN 的谱线强度比主要受到气体密度和辐射场的影响。HCN 和 HNC 的临界密度相近, HNC/HCN 强度比的差别仅仅在于两者的相对含量, 而 HNC 和 HCN 之间的相互转化受到辐射场影响较大。在 PDR 区 HCN 的含量很丰富, 靠近云中心时 HCN 的含量趋于常量, 而 HNC 的含量在接近云中心处较 HCN 含量要大。因此, 在柱密度 $N_{\text{H}} > 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 时, HNC(1-0)/HCN(1-0) 的值约为 1; 当 $N_{\text{H}} < 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 时, 这个比值小于 1。对于 XDR, 在低密度 ($\approx 10^4 \text{ cm}^{-3}$) 高辐射场 ($F_{\text{X}} > 10^{-6} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) 时, 大量的 HNC 被瓦解, HNC/HCN 的比值较小; 而当密度达到 $n = 10^{6.5} \text{ cm}^{-3}$ 时, HNC(1-0)/HCN(1-0) 的值均远远大于 1, 与辐射场的强弱无关。

PDR 区中 HNC(4-3)/HCN(4-3) 的比值在密度低于 $n = 10^{6.5} \text{ cm}^{-3}$ 时, 急速降到 1 以下。此时的密度远远小于 HCN 和 HNC 的临界密度, 要使分子激发需要很高的温度, 高温的条件在 PDR 区径向可以达到, 但此时 HNC 的含量较 HCN 要低很多, 这就解释了 HNC(4-3)/HCN(4-3) 比值的下降。在 XDR 区, HNC(4-3)/HCN(4-3) 的变化与 HNC(1-0)/HCN(1-0) 相似, 只是在 $n > 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 时, HNC(4-3)/HCN(4-3) 的比值较大。

3.1.7 其他示踪分子谱线

SiO 分子通常存在高温高密度气体之中, 因此 SiO 是激波的示踪分子。在高密度区域 ($n = 10^{5.5} \text{ cm}^{-3}$) 时, SiO(1-0)/CO(1-0) 的比值在 XDR 区是 PDR 区的 2 ~ 3 倍, 与 XDR 中的较强激波活动有关。

CS 分子的临界密度高, 它常用于示踪高密度气体。与另外一种高密度气体示踪分子 HCN 相比, CS 的化学反应速率与辐射场的电离度有关, 因此 CS(1-0)/HCN(1-0) 的比值在密度 $n > 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 时, 在 XDR 中是 PDR 的 2 倍; 然而 $n < 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 时, XDR 区的比值较 PDR 区要小。对于 CS(4-3)/HCN(4-3) 的值, 随着 n 的变化, 与 CS(1-0)/HCN(1-0) 有相同的变化趋势, 只是在 $10^4 < n < 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 时, 比值的差距扩大到 10 倍。

3.2 分子谱线柱密度的比值

分子谱线强度比的计算依赖于该分子与氢分子的碰撞截面, 对于一些没有可靠的碰撞截面的分子 (如 CN, NO, HOC⁺), 无法计算出线强比, 但是从这些分子的柱密度比值也能够了解 ISM 的物理和化学性质, 并且区分 PDR 和 XDR^[25]。表 3 给出了这些分子柱密度比值在 PDR 和 XDR 具体的范围。

3.2.1 CN/HCN 柱密度比

CN/HCN 反映了分子云中化学反应的速率 (具体的化学反应式: $\text{CN} + \text{H}_2 \rightarrow \text{HCN} + \text{H}^{[28]}$)。低密度区域分子的化学反应速率低, 降低了形成复杂分子的可能性, 因此高的 CN/HCN 比值出现在较低密度分子气体区域。PDR 中 CN/HCN 的变化, 与密度的相关性强; 而在 XDR 中除了和气体密度有关, CN/HCN 的强度比还和辐射场的强度存在正相关, 即辐射场增强比值加

大。在 PDR 区 CN/HCN 的强度比值从高密度 (10^6 cm^{-2}) 的 0.5 到低密度 (10^4 cm^{-2}) 的 2.0, 而 XDR 区 CN/HCN 的比值从高密度的 40 到低密度的 1000。

3.2.2 CH/HCN 柱密度比

CH/HCN 柱密度比值在 PDR 和 XDR 中的差别比 CN/HCN 还要大, 可以很好地区别 PDR 和 XDR 区。PDR 中, CH/HCN 的大小从高密度 (10^6 cm^{-2}) 的 0.2 到低密度 (10^4 cm^{-2}) 的 0.9; XDR 区这个比值从高密度气体区域到低密度分别是 20 和 10 000。

3.2.3 CH⁺/HCN 柱密度比

CH⁺/HCN 的比值在 PDR 和 XDR 中也有很大的差别。在 PDR 中从高密度 (10^6 cm^{-2}) 的 10^{-6} 到低密度 (10^4 cm^{-2}) 的 6×10^{-4} , 在 XDR 中这个比值范围是 $10^{-3} \sim 1000$ 。CH⁺/HCN 比值与气体密度关系密切, 因为随着密度的增大, CH⁺ 更多地形成了 HCN 分子。再者 CH⁺ 有高的复合速率, 它很容易吸收电子复合成 CH 分子 ($\text{CH}^+ + e^- \rightarrow \text{CH} + h\nu^{[28]}$)。在 PDR 区和 XDR 区 CH⁺/HCN 的柱密度比值均依赖于密度和辐射场强度; 在 PDR 区 CH⁺/HCN 柱密度比值与密度反相关, 随着密度的加大比值越来越小; 而在 XDR 区低密度高辐射场时, CH⁺/HCN 的比值达到最大。

3.2.4 HCO/HCO⁺ 柱密度比

HCO⁺ 的辐射强度与星际介质的电离度相关, HCO/HCO⁺ 的柱密度比值在 PDR 区较 XDR 区大很多。PDR 中辐射场 $G_0 < 10^4$ 时, 谱线的柱密度比值只依赖于密度; 当辐射场 $G_0 > 10^4$ 时, HCO/HCO⁺ 柱密度比与辐射场强度的大小有关。XDR 中, 线的比值与密度和辐射场强度都有关系。HCO/HCO⁺ 的柱密度比值从高密度到低密度, 在 PDR 和 XDR 中分别是: $10.0 \sim 0.1$ 和 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 。

3.2.5 其他分子谱线柱密度比

其他通过柱密度比值示踪 ISM 物理性质的分子谱线还有 HOC⁺, NO, N₂H⁺ 等。

HOC⁺/HCO⁺ 的柱密度比在 XDR 区中比 PDR 区要大很多。在 XDR 中从高密度区到低密度区, HOC⁺/HCO⁺ 柱密度比从 10^{-4} 到 0.6; 而在 PDR 区这个值只有 $10^{-7} \sim 10^{-5}$ 。XDR 区 HOC⁺/HCO⁺ 的柱密度比与辐射场强无关, 仅随密度增大比值减小; 而 PDR 中 $G_0 < 10^4$ 时, 比值不仅和密度有关, 还和辐射场强度有关。

与 HOC⁺/HCO⁺ 一样, NO/CO 的柱密度比值在 XDR 区中比 PDR 区要大。从高密度到低密度, 比值在 XDR 区中从 10^{-4} 到 10^{-3} ; 而 PDR 区中, 比值的范围是 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 。在 PDR 区 NO 和 CO 柱密度的比值取决于云的气体成分, 比值大小只依赖于密度; 而在 XDR 区, NO/CO 的比值与密度和辐射场均相关。

N₂H⁺/CO 柱密度比无论在 PDR 区还是 XDR 区都非常小 ($10^{-7} \sim 10^{-9}$)。在 PDR 区 N₂H⁺/CO 柱密度比随密度增加而减小, 这和 XDR 区正好相反。

表 2 和表 3 直观地展示分子谱线强度比和柱密度比值在 PDR 和 XDR 中的差别^[25]。表 2 给出了同种或不同种分子谱线间的强度比, 表 3 给出了多种分子之间柱密度的比值。

综上所述, 可以较好地区分 PDR 和 XDR 的分子谱线有以下几种:

(1) CO 不同转动跃迁能级间的谱线强度比在 XDR 中显著高于 PDR, 尤其 CO 的高阶跃

表 2 分子谱线强度比^[25]

	$\frac{\text{CO}(2-1)}{\text{CO}(1-0)}$	$\frac{\text{CO}(4-3)}{\text{CO}(1-0)}$	$\frac{\text{CO}(16-15)}{\text{CO}(1-0)}$	$\frac{\text{CO}(2-1)}{\text{CO}(1-0)}$	$\frac{^{13}\text{CO}(2-1)}{^{13}\text{CO}(1-0)}$
PDR	3.0 ~ 9.2	2 ~ 80	$10^{-3} \sim 10^3$	2 ~ 9.6	1 ~ 30
XDR	6 ~ 30	2 ~ 800	$10 \sim 10^4$	4 ~ 35	3 ~ 200

	$\frac{^{13}\text{CO}(3-2)}{^{13}\text{CO}(1-0)}$	$\frac{\text{HCN}(1-0)}{\text{CO}(1-0)}$	$\frac{\text{HCN}(1-0)}{\text{HCO}^+(1-0)}$	$\frac{\text{CS}(1-0)}{\text{HCN}(1-0)}$
PDR	0.05 ~ 1	0.3 ~ 3	0.95 ~ 1	0.1 ~ 2
XDR	0.01 ~ 0.18	0.1 ~ 0.5	1 ~ 1.2	0.01 ~ 8

表 3 分子谱线柱密度比^[25]

	$\frac{\text{CN}}{\text{HCN}}$	$\frac{\text{CH}}{\text{HCN}}$	$\frac{\text{CH}^+}{\text{HCN}}$	$\frac{\text{HCO}}{\text{HCO}^+}$
PDR	0.5 ~ 2	0.2 ~ 0.9	$1 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-4}$	0.1 ~ 10
XDR	$40 \sim 1 \times 10^3$	$20 \sim 1 \times 10^4$	$3 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^3$	$10^{-3} \sim 10^{-4}$

	$\frac{\text{HOC}^+}{\text{HCO}^+}$	$\frac{\text{NO}}{\text{CO}}$	$\frac{\text{N}_2\text{H}^+}{\text{CO}}$
PDR	$10^{-6} \sim 10^{-5}$	$2 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-9} \sim 3 \times 10^{-7}$
XDR	$0.1 \sim 1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-6}$

注: 以上分子谱线均是 (1-0) 跃迁态。

迁分子谱线 (比如 $\text{CO}(16-15)/\text{CO}(1-0)$) 的强度比是区别 PDR 和 XDR 的最好指针。

(2) HCN/CO 的线强比示踪了高密度气体在分子气体中的比重, 指示了恒星形成活动的进程。 HCN/CO 的线强比在 XDR 中的值小于 PDR 中的比值, 说明在演化时序上, PDR 要早于 XDR。在 PDR 区只有柱密度大于 10^{23} cm^{-2} 时才能得到 $\text{HCN}(1-0)/\text{CO}(1-0) > 1$ 。

(3) $\text{HNC}(1-0)/\text{HCN}(1-0)$ 的强度比指示了气体的化学反应状态, 在 PDR 区 $\text{HNC}(1-0)/\text{HCN}(1-0) < 1$, 而在 XDR 区, $\text{HNC}(1-0)/\text{HCN}(1-0) > 1$ 。

(4) HCN/HCO^+ 的线强比可以在很宽的气体密度和温度范围内用于诊断 PDR 和 XDR, 在 XDR 中, $\text{HCN}(1-0)/\text{HCO}^+(1-0)$ 的线强比均小于 1; 在 PDR 中, $\text{HCN}(1-0)/\text{HCO}^+(1-0)$ 的线强比大于 1。

(5) CN/HCN 、 NO/CO 以及 $\text{HOC}^+/\text{HCO}^+$ 的柱密度比值也能很好地区分 PDR 和 XDR 区。

4 微波谱线诊断技术的应用

相对于原子 (及其离子) 谱线, 微波分子谱线能够示踪低温、高密度的气体环境, 因此能够更加有效地揭示恒星形成最早期即分子云核阶段的星际介质的物理和化学性质。河外星系

分子谱线的观测和研究有助于理解星系核区分子气体的性质。随着观测设备性能的提高, 星际介质动力学性质和化学状态的诊断方法也不断进步。过去 10 年, 作为星际介质的诊断工具, 分子谱线诊断方法取得了良好的进展, 特别是在河外星系演化研究上得到了很好的应用。线强比不仅可以用于区分不同的星系类型^[29], 还可以指示星系的演化阶段^[30], 同时对研究星系的化学演化也有指导意义^[31]。

4.1 河外星系的物理和化学演化

红外和亚毫米波段对河外星系的大量观测发现, 高密度气体指针分子的谱线强度 (如 L_{HCN}) 与指示恒星形成率的远红外光度 (L_{FIR}) 存在严格的相关性, 表明高密度气体与恒星形成活动密切相关。恒星形成于致密的分子云核, 换句话说, 恒星形成过程伴随着致密气体的消耗。另一方面, 恒星形成对于低密度气体的影响不如高密度气体那么显著, 演化过程中低密度气体质量基本不变。因此, 分子云中高密度与低密度气体质量的比值 (HD/LD) 可以作为星系中恒星形成历史的时间指针。为了更好地理解星暴星系中远红外光度的时间演化和演化过程中高密度气体的消耗, Baan 等人^[32] 给出一个简化的演化过程模型, 高密度气体成分在恒星形成过程中的变化可以用如下公式表示:

$$dM_{\text{HD}}(t) = M_{\text{HD}}(t-1) * f_{\text{dep}} \quad (1)$$

其中, f_{dep} 表示恒星形成过程中单位时间内消耗的高密度区气体, $M_{\text{HD}}(t)$ 是 t 时刻高密度气体的质量, $M_{\text{HD}}(t-1)$ 代表 t 时刻之前即 $t-1$ 时刻高密度气体的质量。对应的红外光度的表达式如下:

$$L_{\text{FIR}}(t) = L_{\text{FIR}}^m \sum_{t_i=0}^t dM_{\text{HD}}(t_i) \left(\frac{T}{t-t_i}\right)^{2.5} e^{-T/(t-t_i)} \quad (2)$$

其中, $L_{\text{FIR}}(t)$ 为 t 时刻对应的红外光度, L_{FIR}^m 是红外光度的最大值, T 是星暴过程的典型时标 (10^6 a)。

图 4 给出了河外星系演化的模拟结果。其中图 4(a) 显示了星暴星系的远红外光度随时间的演化, 时标的单位是 5×10^5 a, 星暴星系的远红外光度随着时间变化的曲线的典型特点是, 在大量恒星形成的初期, L_{FIR} 急速上升至最大值 (星暴活动的高峰期), 之后呈现指数下降; 图 4(b) 显示高密度气体示踪分子 HCN 与低密度气体示踪分子 CO 的发射线强度比随着红外光度的演化关系; 图 4(c) 显示高密度区 (HCN) 与低密度区 (CO) 的强度比随时间的演化; 图 4(d) 显示星暴星系归一化的空间数密度与 HCN/CO 强度比的关系。不同颜色的曲线代表不同的初始条件, 其中红线、绿线和蓝线对应的高密度气体和低密度气体的质量比分别是 0.2、0.15 和 0.1, f_{dep} 的值分别是 6%、4% 和 2%, L_{FIR}^m 的值分别是 $10^{12.3} L_{\odot}$, $10^{11.5} L_{\odot}$ 和 $10^{10.6} L_{\odot}$ 。

从图 4(a)—(d) 可以得出: (1) 远红外光度的最高峰值出现在高密度气体消耗率最高处; (2) 星暴星系的空间数密度最高峰值出现在 $L_{\text{HD}}/L_{\text{LD}}$ 最低处。

4.2 河外星系 PDR 和 XDR 的微波谱线诊断

4.2.1 标准的 PDR 和 XDR 模型诊断

将 PDR 和 XDR 模型应用到河外星系, 即用分子谱线强度比诊断河外星系物理性质和化

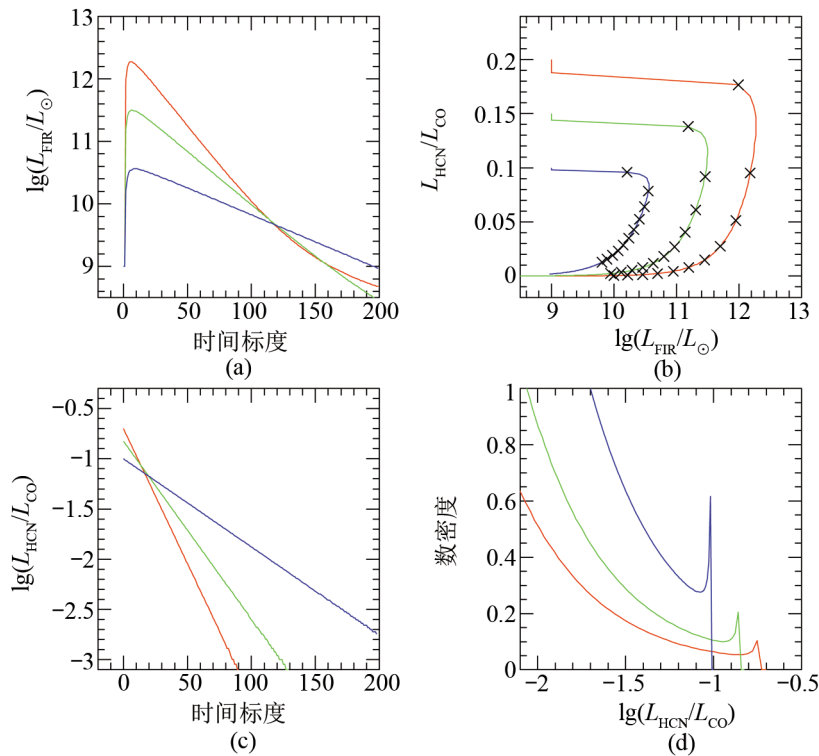


图 4 河外星系随时间演化的模拟结果^[32]

(a) 星暴星系的远红外光度随时间的演化图; (b) HCN/CO 强度比随红外光度的演化关系; (c) HCN/CO 强度比随时间的演化; (d) 星暴星系归一化的空间数密度与 HCN/CO 强度比的关系。

学结构^[33]。依据线强比, 从结构上可明显地区分 PDR 主导源和 XDR 主导源, 从而加深对星暴星系的主导能源机制的认识。而且对于低密度区的源考虑了宇宙射线反馈以及机械能反馈, 分析得出超新星遗迹更可能是其机械能反馈的来源。

图 5 中 (a) 是 HCO^+/HCN 与 HNC/HCO^+ 的诊断图; (b) 是 HCO^+/HCN 与 HNC/HCN 的诊断图; (c) 是 HNC/HCN 与 HNC/HCO^+ 的诊断图。图 5 中的 X 和 P 分别标示 PDR 区和 XDR 区, 图 5 中正方形代表所有观测的源, 三角形标示线强比的上下限, 实心正方形表示的源均是 OH 或 H_2CO 超脉泽 (megamasers) 源; 彩色的线标示了模型拟合的结果, 不同颜色标示模型输入参数不同, 具体的 PDR 和 XDR 模型参数在表 4 中均给出了详细的数值^[33]。

对比模型和数据可以得出以下结论: (1) HNC/HCN 线比可以用来很好地区别 PDR 区和 XDR 区, PDR 中 $\text{HNC}/\text{HCN} < 1$, XDR 中 $\text{HNC}/\text{HCN} > 1$; (2) 对于 PDR 区来说, HCO^+/HCN 或者 HCO^+/HNC 的线比标示了密度的变化, 这两者都随着密度的增加而减小; (3) 有一部分源同时具有较低的 HNC/HCN 和 HCO^+/HCN , 无法用常规标准的 PDR 或者 XDR 模型解释, 需要引入其他的反馈机制。其中低的 HCO^+/HCN 比值可以通过降低密度来达到, 同时 HCO^+ 分子与电子复合而离解 ($\text{HCO}^+ + e^- \rightarrow \text{CO} + \text{H}^{[28]}$) 也能解释较低的 HCO^+/HCN 线比; 而低

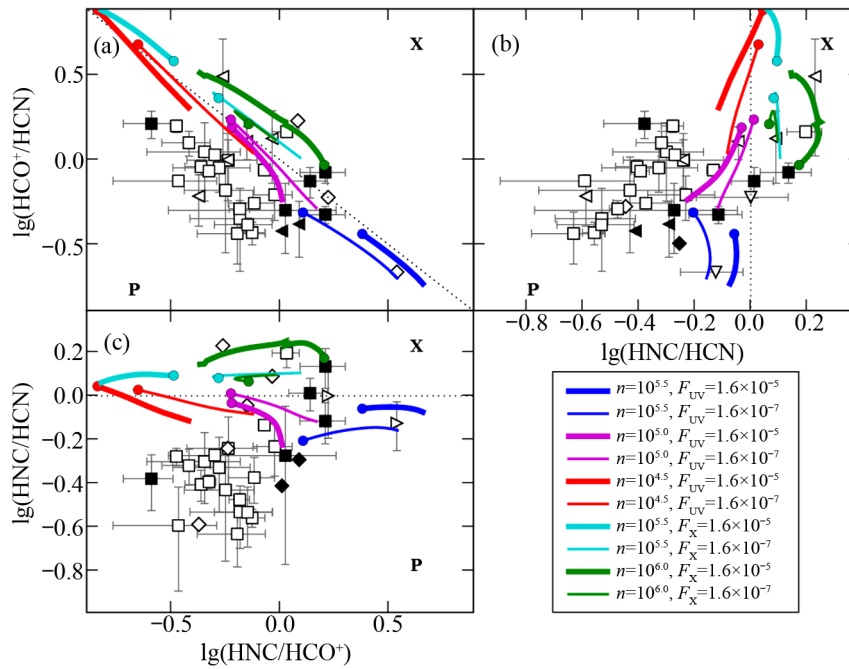


图5 HCN、HNC 和 HCO⁺ 的 PDR 和 XDR 模型诊断图^[33]

(a) HCO⁺/HCN–HNC/HCO⁺ 线比的关系图; (b) HCO⁺/HCN–HNC/HCN 线比的关系图; (c) HNC/HCN–HNC/HCO⁺ 线比的关系图。

表4 图5和图6中PDR和XDR模型的输入参数^[33]

	n/cm^{-3}	$F/\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$		$\Gamma_{\text{mech}}/\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-3}$		
		光薄	光厚	实线(图5)	虚线(图6)	点线(图6)
PDR	$10^{4.5}$	1.6×10^{-7}	1.6×10^{-5}	0	3×10^{-26}	5×10^{-26}
	$10^{5.0}$	1.6×10^{-7}	1.6×10^{-5}	0	2×10^{-25}	9×10^{-25}
	$10^{5.5}$	1.6×10^{-7}	1.6×10^{-5}	0	9×10^{-25}	2×10^{-24}
XDR	$10^{5.5}$	1.6×10^{-7}	1.6×10^{-5}	0	—	—
	$10^{6.0}$	1.6×10^{-7}	1.6×10^{-5}	0	—	—

的 HNC/HCN 比值无法用密度降低或复合反应来解释。2006 年 Meijerink 等人^[12] 引入宇宙射线 (CRs) 来解释也不能达到这个比值, 这就说明还有其他的因素影响气体的性质。下面具体分析机械能反馈的机制。

4.2.2 机械能反馈 (Mechanical heating)

解释 HNC/HCN 比值低的理论有很多, 1992 年 Schilke 等人^[34] 和 1996 年 Talbi 等人^[35] 都提出, HCN 和 HNC 的相互转化 ($\text{HNC}+\text{H}\rightarrow\text{HCN}+\text{H}^{[33]}$) 可以解释比值低的观测事实。可是这个转化条件是云的温度要大于 100 K。虽然 Ott 等人^[36] 在 2005 年证实 NGC 253 的动力学温度可以达到 150 K, 甚至 240 K, 但是在所用的这个样本中, 大部分星系的气体温度在 100 K 以下, 温度高于 100 K 只在边缘处达到, 而那时的 HNC 和 HCN 没有探测到, 这就排除了这种

解释方式。而机械能反馈的引入可以很好地解释低密度区的观测数据。图 6 给出了加上机械能反馈的 PDR 模型诊断图, 具体的模型参数参照表 4。

从图 6 中不难发现, 单纯的 PDR 模型加上宇宙射线反馈仍不足以解释过低的 HNC/HCN 强度比, 而加上机械能反馈的 PDR 模型可以很好地解释低密度区的观测数据。综合图 5 和图 6 发现, 所有的源可以分为 XDR 源 ($\text{HNC}/\text{HCN} > 1$) 和 PDR 源 ($\text{HNC}/\text{HCN} < 1$); 而 PDR 源可以细分为部分标准的 PDR 源, 还有部分是需要机械能反馈加热的 PDR 源。在星系的活跃期, 能够提供有效机械能加热的途径只有两种可能: 一是年轻恒星形成时的超声速外流, 二是大质量恒星演化晚期的超新星遗迹。计算分析的最终结果倾向于认为超新星遗迹的机械反馈效率更高、更可能占主导地位。

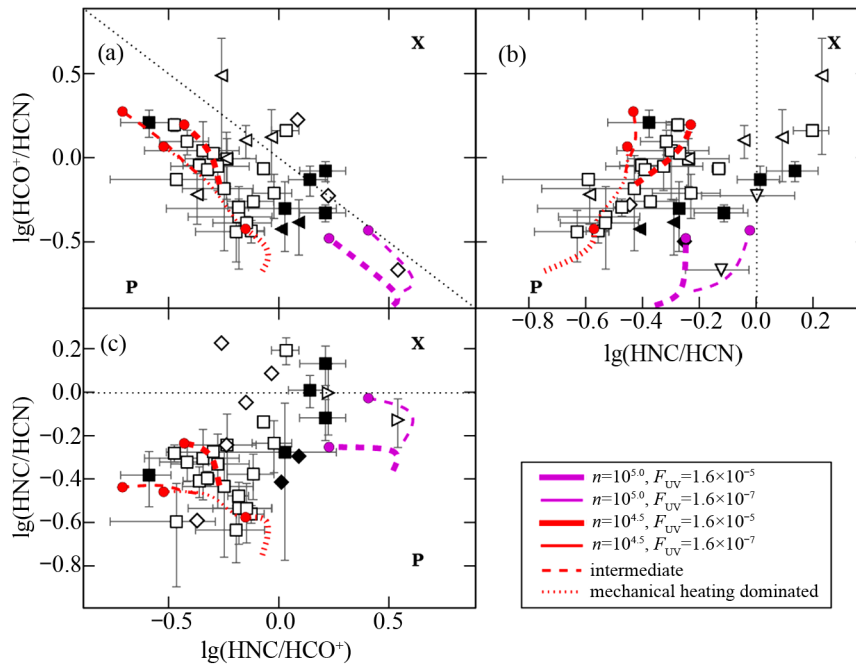


图 6 机械能反馈的诊断图^[33]

(a)、(b)、(c) 的图注与图 5 相同。

5 总结和展望

5.1 总结

微波谱线诊断方法给研究星际介质物理和化学性质带来了新的生机, 成为区分 PDR 和 XDR 的一个有效工具。不同分子、分子不同跃迁能级、同位素分子之间的发射线强度比可以用来诊断和指示星际介质的物理和化学性质。星暴星系和超亮红外星系的极高红外辐射一直

是一个谜,一种观点认为大量的恒星形成活动产生了极高的红外光度,另一种观点认为活动星系核的黑洞吸积对红外光度有相当大的贡献。超亮红外星系和星暴星系分子谱线线强比的研究结果支持了第一种观点,即恒星形成活动是极高红外光度的主要原因。

在今后的研究中,我们拟将 PDR 模型(银河系恒星形成区 XDR 区很少)应用于银河系恒星形成区,能够实现对单个分子云高分辨率的观测。银河系恒星形成区的谱线诊断反过来可以作为河外源星际介质研究的一个标尺。

5.2 展 望

毫米、亚毫米波以及红外望远镜的发展,使得更深入研究星际介质和恒星形成成为可能。Herschel 空间天文台的工作波长为 $65 \sim 672 \mu\text{m}$,即频率为 $400 \text{ GHz} \sim 4 \text{ THz}$,其搭载的设备 PACs 和 SPIRE 可以对恒星形成区进行高分辨率($3''$)的成像,HIFI 可以高谱分辨率($R \approx 10^7$)接收所有分子、原子和离子的发射、吸收线。ALMA(Atacama Large Millimeter Array)是由欧洲、北美和东亚国家共同建设的、迄今最大的地面天文观测计划。ALMA 由 66 面望远镜组成,最长基线是 16 km,工作频率范围是 $31 \sim 950 \text{ GHz}$,它的宽视场和长基线优势赋予它很高的空间分辨率(最高达 4 毫角秒)和位置测量精度。ALMA 的高灵敏度还有助于扩展我们对河外星系恒星形成的研究,同时使得高红移星系中恒星形成的研究成为可能。计划中的 JWST(James Webb Space Telescope)采用 6.5 m 的空间望远镜,它的工作波段是 $0.6 \sim 27 \mu\text{m}$ 。它有助于解决恒星形成的关键问题,例如:恒星形成与其周围环境的相互影响,原恒星云如何坍缩,小于太阳质量的恒星初始质量函数等。

在厘米和长毫米射电波段,国内已建成的贵州 500 m FAST 和上海 65 m 射电望远镜,在分子谱线研究方面将发挥重要作用。FAST 工作带宽内将包含中性氢原子谱线、羟基(OH)、甲醇(CH_3OH)等 12 种分子谱线。FAST 的高灵敏度特别适合用来搜寻银河系中的长链碳分子和星际空间的有机大分子,也可对超亮红外星系、高红移星系、活动星系和类星体进行 OH 和 CH_3OH 分子超脉泽的广泛搜寻。上海 65 m 射电望远镜设计的工作波段从 21 cm 到 7 mm,除了发挥毫米波甚长基线干涉测量(VLBI)高分辨率成像和测量的优势外,更重要的天文观测将是作为独立单元开展大量的单天线谱线和脉冲星观测研究。上海 65 m 射电望远镜的综合观测能力将位居世界前列,能够观测羟基、甲醇、氨分子、甲醛、水和一氧化硅等许多重要的分子谱线,提高我国分子谱线研究方面的国际影响力。

致谢

衷心感谢 Baan 教授提供观测数据和对本文的建议,也感谢 Edo Loenen 博士在数据处理上给予的帮助。同时,作者也非常感谢两位审稿人的建设性意见和建议。

参考文献:

- [1] Evans N J. ARA&A, 1999, 37: 311
- [2] Spitzer L. ARA&A, 1990, 28: 71

- [3] Baan W A, Klöckner HR. *Ap&SS*, 2005, 295: 263
- [4] Curran S J, Aalto S, Boot R S. *A&A*, 2000, 141: 193
- [5] Ott J, Weiss A, Henkel C, et al. *ApJ*, 2005, 629: 767
- [6] Yorke H W. *ARA&A*, 1986, 24: 49
- [7] Hollenbach D J, Tielens A G G M. *Reviews of Modern Physics*, 1999, 71: 173
- [8] Habing H J. *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, 1969, 20: 177
- [9] Draine B T. *ApJS*, 1978, 36: 595
- [10] Maloney P R, Hollenbach D J, Tielens A G G M. *ApJ*, 1996, 466: 561
- [11] Meijerink R, Spaans M. *A&A*, 2005, 436: 397
- [12] Meijerink R, Spaans M, Israel F P. *ApJ*, 2006, 650: L103
- [13] Bakes E L O, Tielens A G G M. *ApJ*, 1994, 427: 822
- [14] Hollenbach D, McKee C F. *ApJS*, 1979, 41: 555
- [15] Field G B, Goldsmith D W, Habing H J. *BAAS*, 1969, 1: 240
- [16] Tielens A G G M, Hollenbach D. *ApJ*, 1985, 291: 722
- [17] Spaans M, Tielens A G G M, van Dishoeck E F, et al. *ApJ*, 1994, 437: 270
- [18] Neufeld D A, Lepp S, Melnick G J. *ApJS*, 1995, 100: 132
- [19] Zaritsky D, Kennicutt R C, Huchra J P. *ApJ*, 1994, 420: 87
- [20] Vila-Costas M B, Edmunds M G. *MNRAS*, 1992, 259: 121
- [21] Jenkins E B. *In Origin and Evolution of the Elements*, Cambridge: Cambridge University 2004: 339
- [22] Schöier F L, van der Tak F F S, van Dishoeck E F, et al. *A&A*, 2005, 432: 369
- [23] Wolfire M G, Tielens A G G M, Hollenbach D J. *ApJ*, 1990, 358: 116
- [24] Kaufman M J, Wolfire M G, Hollenbach D J. *ApJ*, 2006, 644: 283
- [25] Meijerink R, Spaans M, Israel F P. *A&A*, 2007, 461: 793
- [26] Poelman D R, Spaans M. *A&A*, 2005, 440: 559
- [27] Poelman D R, Spaans M. *A&A*, 2007, 464: 1023
- [28] Sun K. *Physics and Chemistry of the Interstellar Medium*. Hong Kong: University of Hong Kong, 2007: 343
- [29] Kohon K, Matsushita S. *ASP Conf. Proc.*, 2002, 249: 672
- [30] Gao Y, Solomon P M. *ApJS*, 2004b, 606: 271
- [31] Gao Y, Solomon P M. *ApJS*, 2004a, 152: 63
- [32] Baan W A, Loenen A F, Spaans M. *A&A*, 2010, 516: A40
- [33] Loenen A F, Spaans M, Baan W A, et al. *A&A*, 2008, 488: L5
- [34] Schilke P, Walmsley C M, Pineau Des Forets G, et al. *A&A*, 1992, 256: 595
- [35] Talbi D, Ellinger Y, Herbst E. *A&A*, 1996, 314: 688
- [36] Ott J, Weiss A, Henkel C, et al. *ApJ*, 2005, 629: 767

Diagnosis of PDRs and XDRs of the ISM Using Radio-waveband Spectral Lines

LIAN Xiao-li^{1,2,3}, AN Tao^{1,3}, HONG Xiao-yu^{1,3}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The physical properties and chemical balance of the interstellar medium (ISM) are af-

ected by a variety of heating and cooling mechanisms. Photon dominated region (PDR) and X-ray dominated region (XDR) are two structures in the process of star formation. The dominant energy sources in PDRs and XDRs are different, resulting in variations of physical properties and chemical composition of the ISM. The emission line intensity changes with different molecule species, different transitions of a same molecule, and isotopes. Therefore the ratios between different molecular lines can be used as indicators of the PDRs and XDRs. The modeling of the PDR and XDR shows the intensity ratios of HNC/HCN, HCN/HCO⁺, HCN/CO and CO(16–15)/CO(1–0) are good tracers to diagnose PDRs and XDRs. In addition, the column density ratios of CN/HCN, NO/CO and HOC⁺/HCO⁺ may also be used as tracers. The diagnosis tool using molecular line ratios has been successfully applied to extra-galaxies study, opening a new window to learn the molecular gas properties in the centers of galactic nuclei. The inclusion of mechanical feedback to the models makes the fitting more consistent with the observational data.

Key words: AGN; ISM; PDR; XDR