红外尘泡的研究进展和研究方法

张传朋*, 王俊杰

中国科学院国家天文台, 北京 100012

* 联系人, E-mail: cpzhang@nao.cas.cn

收稿日期: 2016-11-09; 接受日期: 2017-01-09; 网络出版日期: 2017-06-15

中国科学院国家天文台青年人才基金、国家重点基础研究发展计划(编号: 2015CB857100)和国家自然科学基金(编号: 11363004, 11403042)资助项目

摘要 银道面红外巡天发现的一类壳状结构被称作“红外尘泡”(Infrared Dust Bubble), 目前普遍认为它是由大质量恒星或星团形成时产生的电离氢区与周围中性介质相互作用形成的, 电离氢区膨胀可能触发壳层分子气体中的新一代恒星形成. 最初, 尘泡被发现主要来自于红外波段的辐射, 后来被证实与分子气体有较好的成协性. 多波段地研究尘泡与恒星形成的关系是近几年来一个比较热门的课题. 已有的观测研究表明, 某些尘泡壳层环境中存在着丰富的恒星形成现象, 这些恒星形成区与电离氢区的膨胀有着很好的相关性, 与理论模型研究结果相符. 然而, 由于缺少确切的距离等信息, 无法确定相互作用关系确实存在, 或者说无法给出触发过程发生的确凿证据. 本文, 首先概要地总结了前人研究红外尘泡与恒星形成方面的重要结论; 其次, 归纳了研究红外尘泡与恒星形成方面的主要科学方法与手段; 最后, 总结前人的研究成果, 讨论目前研究红外尘泡方面的不足之处, 分析研究红外尘泡的发展趋势等.

关键词 尘泡, 恒星形成, 电离氢区, 年轻星

PACS: 97.10.Bt, 97.10.Fy, 98.38.Gt, 98.38.Kx

1 引言

尽管目前所发现的大质量恒星的数量比较少, 但是其在星际介质的物理与化学变化过程中起着关键的作用. 电离氢区(HII Region)^[1,2]、恒星风^[3,4]和超新星爆发^[5,6]等为星际气体的演化提供了必要的动能. 年轻的大质量恒星对周围的星际介质有着非常深远的影响, 比如由电离氢区的膨胀所触发的恒星形成就是一个很好的例子. 相关的OB型星一般位于电离氢区投影的内部, 电离氢区主要是围绕OB型

星的等离子体区域. 来自尘泡中心处激发星OB型星的恒星风和电离辐射将深刻影响周围的分子云, 可能会触发新一代的恒星形成. 射电和光学的观测已经揭示出许多这类结构性的特征. 这些OB型星一般有几百万年的年龄; 相对于激发星OB型星来说, 尘泡壳状结构处的电离氢区可能是新一代大质量恒星形成的示踪物. 因此, 在大质量恒星形成过程中, 比较重要的是理解致密电离氢区的产生和它与周围团块的相互作用. 2007年, Zinnecker等人^[7]提出了3个关于大质量恒星反馈的重要问题: 第一, 大质量星反

引用格式: 张传朋, 王俊杰. 红外尘泡的研究进展和研究方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 099501
Zhang C P, Wang J J. Progresses and methods in research of infrared dust bubble (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 099501, doi: 10.1360/SSPMA2016-00476

馈所携带的能量和动量是如何对母云起作用的? 第二, 母云最终的宿命是被大质量恒星的反馈瓦解还是被触发形成新一代恒星? 第三, 在新一代的OB型星和小质量恒星形成中, 何种反馈(包括电离氢区、星风或者是超新星爆炸)才是最好的触发引擎? 基于这些问题的重要性, 大质量恒星的每一种反馈(特别是关于红外尘泡与周围介质的相互作用)都值得深入研究.

银道面中普遍存在的电离氢区在膨胀过程中对银河系内恒星, 尤其是大质量恒星的诞生具有深刻影响. 研究表明, 银河系中约22%的大质量年轻星天体可能由膨胀的电离氢区触发形成^[8]. 为了理解电离氢区对其近邻介质的反馈, 假设在一个理想的球对称模型中, 电离氢区将形成和演化于一个各向同性的介质环境中. 在理论上, 电离氢区的演化主要分为两个阶段: 短促的斯特隆根球(Strömgren Sphere)的形成阶段和漫长的电离氢区膨胀阶段^[9]. 现有用于解释电离氢区周边疑似触发恒星形成现象的主流模型有: “扫集-坍缩”(Collect-and-Collapse)^[10,11]和“辐射内爆”(Radiation Driven Implosion, RDI)^[12,13]. 困于难以捕捉确凿的证据, 触发恒星形成的观测研究长期滞后于相关理论的发展. 得益于2MASS (Two Micron All Sky Survey)、斯皮策(Spitzer)、赫歇尔等近中远红外多波段巡天的开展及分子谱线数据的积累, 触发恒星形成的实测研究迎来新的契机^[14,15].

电离氢区广泛地分布于银河系, 其最早的观测研究来源于光学望远镜. 光学波段探测的主要是电离氢区中的氢或者氢原子的复合线辐射以及金属离子的碰撞跃迁发射, 示踪的是电离气体. 比如, 通过电离氢区中的 $H\alpha$ 发射, Gum^[16]于1955年就发表了第一个位于南天的84个电离氢区的大样本源表. 基于此, Rodgers等人^[17]于1960年将样本扩充到了182个. 此外, Sharpless^[18]于1959年对北天的电离氢区进行了同样的搜寻, 一共发现313个电离氢区. 由于光学波段容易受到尘埃消光的影响, 因此, 前面观测的约500个光学电离氢区只是银河系中的一小部分. 电离氢区产生的自由-自由电子辐射和氢、氢或者某些金属原子的复合线发射(如 $H109\alpha$ 和碳线)还可以在射电波段被探测到. 通过搜集已发表的

观测, 2003年, Paladini等人^[19]编录了一个由1442个电离氢区组成的源表, 它们均是在射电波段被探测到的.

利用斯皮策空间望远镜(Spitzer Space Telescope)开展的银道面红外巡天项目GLIMPSE^[20] (Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire)和MIPSGAL^[21]为研究电离氢区膨胀触发恒星形成提供了非常关键的数据支持. Churchwell等人^[3,4]在2006和2007年利用这些红外数据编撰了591个具有“环状”或“轮胎状”特征的样本, 即红外尘泡. 尘泡的壳状结构在GLIMPSE 8.0 μm 处有较强的发射, 这些发射主要来自多环芳香烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)的发射线, 并且示踪着光致离解区(Photo-dissociation Region, PDR). 延展的MIPS 24 μm 辐射源主要位于尘泡空腔中, 这些辐射主要来自被激发星释放的UV光子所加热的尘埃颗粒. 24 μm 的热尘埃辐射和电离氢区成协, 通常利用射电连续谱示踪位于红外尘泡内部的电离氢区. 由此可知, 红外尘泡的物理环境与壳层内部电离氢区的膨胀有着密不可分的关系.

2012年, Simpson等人^[22]发起了由35000余人参与的公众科学倡议活动(Citizen Science Initiative), 名为“银河项目”(The Milky Way Project). 该项目主要利用GLIMPSE和MIPSGAL存档数据资料在银道面中证认出了5106个红外尘泡. Hou等人^[23]于2014年利用银河项目和银道面电离氢区的数据交叉认证了6124个星际尘泡样本, 获得了818个尘泡的速度信息, 为进一步的深入研究打下了坚实的基础. 2012年, Bania等人^[24]利用305 m的阿雷西博射电望远镜(Arecibo Radio Telescope)从37个未知电离氢区中观测了射电复合线(Radio Recombination Lines, RRLs), 发现很多尘泡形态特征, 这为进一步研究尘泡的触发新一代的恒星形成提供更多的参考资料. 这说明尘泡状的结构在银河系内是无处不在的, 并且这些尘泡与星团的关系比较密切. 最近, 许多人都认为他们发现了尘泡触发恒星形成的迹象, 他们主要利用毫米、亚毫米波数据在尘泡的壳层中寻找致密的团块或核, 利用红外数据筛选与尘泡成协的年轻星(YSOs), 并且寻找电离氢区与周围的星际介质相互作用的

图 1 (网络版彩图) (a) 电离氢区各向同性地向星际介质膨胀的“球状”模型. 电离区(红色区域)被致密的中性“壳状”物质包围, 该包层物质是电离区在向外膨胀并扫集周围中性介质; (b) “球状”电离氢区与周围的“壳状”中性物质的相互作用图. 数字1–4代表了触发恒星形成的不同过程, 其中数字1表示小尺度的引力不稳定性; 数字2表示大尺度的引力不稳定性, 可能导致大质量的恒星形成; 数字3表示作用在湍流介质中的电离辐射; 数字4表示由辐射驱动, 对已存在的致密团块的压缩. 以上两幅图片出自于Deharveng等人 [31]在2010年的研究工作

Figure 1 (Color online) (a) Model of a spherical HII region expanding into a homogeneous medium. The ionized region is surrounded by a shell of dense neutral material collected during the expansion phase. (b) Schematic view of a spherical expanding HII region and of its neutral environment. Different processes of triggered star formation are depicted: 1 small-scale gravitational instabilities; 2 large-scale gravitational instabilities leading to the formation of high-mass fragments; 3 ionizing radiation acting on a turbulent medium; 4 radiation-driven compression of pre-existing dense clumps. The two figures above are from Deharveng et al. [31](2010).

证据. 例如, 2016 年, Yan等人 [11]利用 ^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O , HCN , HCO^+ 5条分子或离子的 $J=1-0$ 跃迁能级线对银河系中13个红外尘泡分布区域进行了详细探索, 他们认为已经在部分尘泡附近找到了触发恒星形成的证据. 除此之外, 研究学者还对尘泡N4 [25], N10 [26], N14 [27], N22 [27,28], N46 [29], N49 [1,30,31], N65 [32], N68 [33], N74 [27], N131 [34,35], S24 [36], S51 [37], CN20 [38], CN107 [39], CN109 [39], CN148 [40], RCW120 [41], G24.136+00.436 [42] 等做了相关的研究工作.

2 研究进展

2.1 电离氢区的演化

从目前的多波段观测情况看, 尘泡的形态结构大多呈现出不规则甚至破裂的“环状”或者“轮胎状”的特征. 电离氢区的演化模型可以很好地解释尘泡的“壳状”形态结构 [9]. 在图1中, Deharveng等人 [31]于2010年给出了尘泡的形态模型与结构图, 主

要由如下两个阶段构成 [9]:

(1) 短促的斯特隆根球的形成阶段. 年轻的高温恒星发出的紫外线会将周围中性氢电离, 在离恒星越远的地方, 辐射强度越小, 电离度也就越小. 在距中心恒星某一距离处, 辐射已不能使中性氢发生电离, 形成电离氢区的边界, 边界以内的区域称为斯特隆根球, 边界到中心的距离称为斯特隆根半径. 斯特隆根半径的大小与莱曼光子率和周围中性气体的数密度有关. 观测上表明该阶段的形成时标较短, 中心星可能是O型或早型的B型大质量星, 也可能是由成团的恒星组成.

(2) 漫长的电离氢区膨胀阶段. 由于斯特隆根球的内部相对于外部有温度较高的热电离气体(约 10^4 K)和较强的辐射压, 则电离氢区将会超声速地向外膨胀. 在迅速地膨胀过程中, 电离波前与激波波前将在中性的壳层结构附近形成. 当电离气体的辐射压与周围的中性尘埃气体产生的阻力相互平衡时, 电离氢区将停止膨胀.

在电离氢区的膨胀过程中, 中性介质被扫集和

压缩到一起, 形成一致密的壳层结构. 随着时间的演化, 该壳层的质量不断增加到几千个太阳质量, 这就是新一代恒星形成的诞生地^[43]. 在围绕着的电离氢区所形成的壳层中, 小尺度的引力不稳定(如金斯不稳定性)将导致小质量的恒星形成, 而大尺度的引力坍缩可能将形成大质量的恒星(如图1). Zavagno等人于2006年与Deharveng等人于2009年分别对电离氢区RCW79^[44]和RCW120^[45]进行了研究, 该工作详尽地解释了膨胀的电离氢区触发恒星形成的过程. 然而该模型忽略了一些重要的观测事实, 比如电离氢区周围的星际介质是不均匀分布的, 这将使得尘泡的壳层结构不是完美的“球壳状”结构; 磁场的存在同样将会抑制“扫集坍缩”过程, 甚至减少恒星形成的效率^[46]; 少量的大质量星所产生的辐射压可能不足以触发周围的壳层结构和恒星形成^[47].

2.2 “扫集坍缩”

电离氢区在膨胀过程中通过扫集和挤压周围物质, 于电离波前和激波波前之间形成致密壳层; 该壳层因引力不稳定而碎裂形成致密团块; 在满足一定密度、质量和温度等条件时, 这些团块发生进一步的碎裂坍缩形成致密分子云核并最终孕育新一代恒星; 这就是所谓的研究电离氢区触发周围星际介质中大质量恒星形成的“扫集坍缩”模型^[10,11]. 为了验证此模型是否满足尘泡的演化过程, 则需要进一步比较电离氢区的动力学年龄(Dynamical Age)、尘泡的运动学时标(Kinematical Time Scale)、壳层中团块的碎裂时标(Fragmentation Time Scale)和激发星及年轻星的年龄之间的关系. 解析模型与数值模拟已经从多角度检测了“扫集坍缩”过程, 如Whitworth等人^[48]于1994的工作, 它预测了裂化时标、裂化尺度、柱密度、质量和碎裂的间距. 2006年, Hosokawa等人^[43]认为, 在电离氢区触发恒星形成过程中, 如果中心星质量大于 $20M_{\odot}$, 而周围所“扫集坍缩”的壳层结构中的分子云团块总质量为 10^4 – $10^5 M_{\odot}$, 该壳层环境的数密度为 $n \sim 100 \text{ cm}^{-3}$, 则可能在壳层中触发新一代的恒星形成; 他们还给出了自引力团块的质量分布情况. 对于电离氢区

来说, 尘埃扮演着冷却剂的角色, 吸收高能光子, 释放红外辐射; 虽然星际尘埃仅仅占据总质量的1%, 但是尘埃对电离氢区的能量聚集起着重要的作用. 1989年, Kurtz等人^[49]和Wood等人^[50]发现超致密电离氢区大约吸收了42%–99%的电离光子, 此过程可能会抑制电离氢区的膨胀率和尺度. 因此, 电离氢区包层的团块密度分布起着重要的作用.

尘泡的形态结构也是最近争论的焦点. 在视线方向上, 望远镜设备所观测到的尘泡一般是具有2维的“轮胎状”结构. 然而, 由“扫集坍缩”过程所产生的尘泡应该具有3维的球壳状结构的特征. 理论上, 应该呈现出具有蓝移特征的前端云和具有红移特征的后端云. 因此, 天文学家试图去寻找尘泡的前端(蓝移成分)与后端(红移成分). 然而, 除了Zhang等人^[37]于2012年发现的尘泡的前端云外, 还没有观测到同时具备明显的前后两端云的迹象. Beaumont等人^[51]于2010年, 使用JCMT观测了43个尘泡的CO($J=3-2$)谱线, 发现这些尘泡都是环状结构, 在尘泡中心没有发现红蓝移成分, 并认为是因为母体分子云结构较为平坦导致.

2.3 “辐射内爆”

“辐射内爆”过程常被用于解释亮边云中的恒星形成. 亮边云是由于分子云面临大质量恒星的一边被电离气体照亮而得名. 它可能在受到电离氢区作用之前就已经形成, 也可能是在电离氢区的演化过程中新形成的. 无论哪种形成方式, 当这些亮边云受到电离波前的挤压时, 可能会引发内爆(Impllosion), 进而形成一个“彗星状”或者是指尖状、象鼻状、柱状等形态的分子云, 这一过程被称之为“辐射内爆”. Bertoldi^[12]于1989年、Bertoldi等人^[13]于1990年、Lefloch等人^[52]于1994年、Bisbas等人^[53]于2011年分别对彗星状分子云开展了相关数值模拟工作. 他们发现在内爆阶段, 电离波前传播到亮边云的内部, 通过挤压的方式可以使其形成致密的分子云核. 接下来, 亮边云会经历一个短暂的再膨胀和准静态“彗星状”阶段. 彗星状的分子云表征出一个致密的头部和一个相对弥散的尾部顺着远离激发星的方向延展. 由于引力不稳定性, 彗星状致密的头部最终

可能会坍缩形成新一代的恒星.

基于已有的观测, Chen等人^[54]于2007年将触发恒星形成与辐射内爆相关联的可能的观测特征概括为4点: 第一, 亮边云的延展方向通常朝着或者是指向大质量激发星; 第二, 新一代恒星群的空间分布大致是沿着亮边云与激发星之间的连线排列的; 第三, 如果靠近亮边云的年轻星是被触发形成的, 它们应该是最年轻的; 第四, 在未受大质量激发星影响的分子云的深处(即远离激发星的区域)没有年轻星. 其中第三点和第四点观测特征可能会比较好地区分触发恒星形成和自发恒星形成, 因为通过分子云整体坍缩而自发形成的恒星可能会遍布整个分子云^[14].

2.4 尘泡的反馈

Watson等人^[1]于2008年研究了3个尘泡, 辨认了它们的激发星和年轻星, 并从多角度发现3个区域可能是由尘泡触发形成的. 后来, Watson等人^[2]于2010年又对46个尘泡周围的年轻星进行了搜索与辨别, 发现仅仅20%的尘泡与年轻星有实质上的关系. Deharveng等人^[31]于2010年利用ATLASGAL 870 μm 的巡天数据对102个尘泡进行了冷尘埃环境, 射电连续谱和年轻星分布的分析; 他们发现86%的尘泡中存在电离氢区, 20%的尘泡壳层中存在大质量恒星形成的迹象. Kendrew等人^[55]于2016年还利用ATLASGAL 870 μm 的巡天数据对银盘上的红外尘泡进行了统计研究, 发现红外尘泡的致密壳层结构可能来自于红外尘泡的向外膨胀的挤压力. Thompson等人^[56]于2012年对322个尘泡进行了统计分析, 认为银河系中的大约14%–30%的大质量年轻星是在尘泡的形成过程中触发的. 在2012年, Kendrew等人^[8]对从“银河项目”中筛选出的4434个尘泡开展了一项类似的工作; 他们发现尘泡随着尺度的增加, 在统计上与大质量年轻星的成协性会增加; 大质量年轻星和(超)致密电离氢

区中的 $67\% \pm 3\%$ 看起来与红外尘泡相关; 大质量年轻星中的 $22\% \pm 2\%$ 可能受到过正在膨胀的电离氢区的反馈作用.

单个样本的细致研究也暗示电离氢区周围存在触发恒星形成的可能性. 这些观测主要集中在搜寻与电离氢区成协的壳层和亮边云(Bright-Rimmed Clouds, BRCs). 前者通常可以用“扫集坍缩”过程解释, 后者多采用“辐射内爆”过程来解释. 例如, Zavagno课题组长期致力于搜寻那些具有简单形态的电离氢区(如Sh104^[57], RCW79^[44], RCW82^[58], RCW120^[41]), 倾向于“扫集坍缩”模型. 更多的这类观测的统计可以参考Dale等人^[59]于2015年的工作. 对于亮边云的观测, 例如, Sugitani课题组^[60–66]开展了一系列的观测. 他们通常用“辐射内爆”模型来解释成协的年轻星沿着激发星和亮边云的轴方向上的分布, 并认为该分布可能是触发恒星形成的结果. 上述这些观测均证实了触发恒星形成存在于电离氢区周围的可能性.

总的来说, 用于解释红外尘泡形成、演化和反馈的模型发展的已经比较成熟, 但是观测上的证据仍然比较匮乏. 主要的原因是无法精确计算红外尘泡的演化时标, 无法在空间3维结构上真正地区分开与红外尘泡相关的成分.

3 研究方法

3.1 尘泡的相关观测数据

目前, 研究红外尘泡所用到的天文数据主要来自红外巡天、射电连续谱和谱线观测, 其中红外巡天设备或项目主要有GLIMPSE^[20,67], MIPS-GAL^[21], 2MASS^[68], IRAS^[69], NVSS^[70], BGPS¹⁾, ATLASGAL²⁾, WISE^[71,72], MAGPIS³⁾, Herschel⁴⁾等, 射电巡天设备或项目主要有MOPRA^[73,74], JCMT⁵⁾, GRS^[75], KOSMA 和PMO⁶⁾等.

1) <http://milkyway.colorado.edu/bgps/>

2) <http://www3.mpifr-bonn.mpg.de/div/atlasgal/>

3) <http://third.ucllnl.org/gps/>

4) <http://herschel.esac.esa.int/>

5) <http://www.jach.hawaii.edu/JCMT/archive/>

6) <http://www.radioast.csd.cn/>

GLIMPSE是利用斯皮策空间望远镜对内银河系进行的一个中红外波段的巡天项目, 主要包括斯皮策-IRAC的3.6, 4.5, 5.8和8.0 μm 波段的数据; IRAC拥有较高的空间分辨率: 约在 $1.5''$ – $1.9''$ 之间^[76,77]. MIPS GAL利用安装于斯皮策空间望远镜上的MIPS (Multiband Imaging Photometer for Spitzer)设备对几乎相同的天区进行了24 μm 和70 μm 巡天. 同时, 这4个波段的GLIMPSE点源源表(GPSC)是筛选尘泡周围年轻星的主要样本. 2MASS在J, H, K_s波段对全天进行了近红外巡天, 产生的点源表是进行年轻星证认的重要数据来源. 利用工作在12, 25, 60 和 100 μm 的IRAS (Infrared Astronomical Satellite)获取的远红外点源表是分析红外尘泡周围恒星形成活动的另一关键样本. 由NRAO VLA 望远镜观测获得的1.4 GHz连续谱巡天数据(NVSS)可以用来示踪与尘泡相关的背景源的连续谱环境, NVSS巡天数据的噪声水平约为 $0.45 \text{ mJy beam}^{-1}$. BGPS (The Bolocam Galactic Plane Survey)是在1.1 mm波段对银道面(特别是北半球)开展了无偏的系统的连续谱巡天, 观测区域约170 平方度.

ATLASGAL (The APEX Telescope Large Area Survey of the Galaxy)利用APEX 望远镜在870 μm 波段对内银河系进行了400 多平方度的连续谱巡天. WISE在3.4, 4.6, 12 和22 μm 波段对全天开展了高灵敏度的中红外巡天, 产生了高质量的图像和测光数据且都已公开, 是开展尘泡与恒星形成研究的重要数据来源; MAGPIS利用VLA在20 cm做了银道面巡天, 其公开释放的数据是研究电离气体性质的重要资料(如, Deharveng等人^[31]于2010年便使用了大量的MAGPIS数据). 工作在远红外和亚毫米波的赫歇尔空间天文台(Herschel Space Observatory)可以有效探测冷尘埃, 揭示尘泡周围致密核的物理信息等, 是开展有关研究的利器. Hi-GAL (Herschel infrared Galactic Plane Survey)是赫歇尔空间天文台的一个重点巡天项目, 旨在用5个远红外波段对整个银道面成图. 在此巡天中, 两个工作波长为70和160 μm 的PACS (Photodetector Array Camera &

Spectrometer)和波长为250, 350和500 μm 的SPIRE (Spectral and Photometric Imaging Receiver)设备以平行测光模式同步工作. 观测以 $60'' \text{ s}^{-1}$ 的扫描速度在两个正交的方向上开展. 70–500 μm 5个波长上的角分辨率分别为 $10.7''$, $13.9''$, $23.9''$, $31.3''$, $43.8''$. Anderson等人^[78]于2012年和Zavagno等人^[30]于2010年使用赫歇尔望远镜开展的尘泡相关研究工作, 结合多个波段的连续谱数据可以更好的利用SED拟合计算红外尘泡的尘埃温度和柱密度等物理参数.

澳大利亚MOPRA 22 m的射电望远镜在110 GHz附近拥有约 $33''$ 的空间分辨率, 观测 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 和 $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ 分子谱线的速度分辨率约为 0.17 km s^{-1} ; MOPRA在90 GHz附近的分辨率约为 $38''$, 而速度分辨率约为 0.16 km s^{-1} , 可以同时观测到8 GHz带宽的16条谱线. 位于夏威夷的15 m JCMT射电望远镜在330 GHz的 $^{13}\text{CO}(J=3-2)$ 跃迁频率附近拥有 $14''$ 的空间分辨率, 相对应的速度分辨率为 0.055 km s^{-1} . Beaumont等人^[51]于2010年利用JCMT射电望远镜观测了46个尘泡样本, 并且公开了这些数据. 五大学天文台(FCRAO)的14 m口径射电望远镜在 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 跃迁频率附近拥有约 $46''$ 的空间分辨率, 而速度分辨率约为 0.25 km s^{-1} . 五大学天文台在 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 的巡天数据观测范围比较广(约 $18^\circ \leq \text{银经} \leq 56^\circ$, $-1^\circ \leq \text{银纬} \leq 1^\circ$), 是做尘泡分析和统计工作的主要样本数据⁷⁾. 紫金山天文台德令哈观测站的13.7 m口径的毫米波望远镜(PMO)拥有9个波束的接收系统; 它可以对 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$, $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 和 $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ 3条分子谱线进行同时观测; 观测这些分子谱线的空间分辨率是 $52'' \pm 3''$, 速度分辨率为 0.16 km s^{-1} . 拥有3 m口径的KOSMA射电望远镜⁸⁾可以同时观测到230与345 GHz附近的分子谱线, Ji等人^[28]于2012年已经利用该望远镜对尘泡N22进行了 $\text{CO}(J=3-2, J=2-1)$ 分子的观测研究. 这些分子谱线数据主要示踪尘泡周围壳状结构中的分子团块, 甚至致密核部位, 这些分子谱线探针拥有着不同的物理特征, 可以示踪不同的密度、温度和光深等物理环境, 它们将为分子气体团块的物理结构, 环境等性

7) <http://www.bu.edu/galacticring/>

8) 该望远镜已经移址到西藏羊八井, 并更名为 CCOSMA

质的研究提供必要的分析依据.

3.2 热尘埃和电离气体的分布特征

红外波段的GLIMPSE, MIPS GAL和2MASS巡天数据主要被用来分析红外尘泡周围的年轻星和暖的尘埃气体的分布. 基于对15个红外尘泡的24和70 μm 波段的发射观测, Watson等人^[2]于2010年发现位于光致离解区内部(即壳层环内)尘埃的平均温度的分布范围是49–113 K, 平均温度是80 K.

Petriella等人^[32]于2010年, Paron等人^[79]于2011年, Zhang等人^[33,34,37]于2012, 2013, 2016年等的研究工作已经给出了一些尘泡的红外辐射3色叠图, 如图2是红外尘泡N131的3色叠图^[37]. 8 μm (绿色图)光致离解区(PDR)的辐射主要来自多环芳香烃(PAH)的发射, 其轮廓勾画出了尘泡的壳状结构. 在尘泡内部, 较热的尘埃和电离气体已经破坏了多环芳香烃的成分; 在光致离解区, 多环芳香烃辐射的激发主要来自电离氢区释放的能量^[32,58]. 24 μm (红色图)的辐射主要出现在尘泡的内部, 它主要与热的尘埃辐射相关. 4.5 μm (蓝色图)的辐射主要示踪年轻星, 激发星, 以及与尘泡无关的场星(Field Star)位置. 870 μm 的辐射也与红外尘泡的壳层结构有较好的相关性, 可以有效示踪致密核(如图3和4).

大多数红外尘泡的结构表现出不规则的形态, 甚至尘泡的壳层出现了破碎的情况, 表现为半弧状壳层结构包围着尘埃和电离气体的形态, 如图4. 这说明, 来自尘泡内部的UV辐射压比较强, 使得电离氢区的辐射冲破了壳层结构的束缚. 尘泡的红外观测图像清晰地描绘了红外尘泡的这些形态结构和物理特征. $[5.8]/[4.5]$ 和 $[8.0]/[4.5]$ 强度比也可以很好地示踪多环芳香烃辐射轮廓分布^[80,81]. 从不同波段的红外数据所示踪的不同成分(温度、密度等)上看, 电离氢区的膨胀触发恒星形成的模型可以解释红外观测数据的物理形态结构. 比如, 红外数据可以很好地示踪EGO (Extended Green Object)源和红外暗云源. EGO是一类具有明显激波特征的天体, 可能与外向流活动有关. 红外暗云是致密的冷云(含尘埃)吸收了背景红外辐射而出现的一种现象, 是一类尚处于大质量恒星形成早期阶段的天体. 这种与早

图2 (网络版彩图)红外尘泡N131的RGB 3色图, 其中红色为24 μm , 绿色是8 μm , 蓝色为4.5 μm 的辐射. 另外, 轮廓图是CO (1-0)在不同速度区间的积分强度图, 来自于Zhang等人^[34]在2013年的研究工作. 其中, 蓝色轮廓图的速度积分范围是 $[-14.5, -11.5] \text{ km s}^{-1}$, 红色轮廓图的速度积分范围是 $[-9.5, -6.5] \text{ km s}^{-1}$. 图中的小方块, 9个字母和大椭圆分别标出了红外点源、分子云团块和尘泡壳层的位置. 该图片出自于Zhang等人^[35]在2016年的研究工作

Figure 2 (Color online) Integrated intensity contours of the CO (1-0) line of the blueshifted and redshifted clouds superimposed on the RGB image with 24 μm (red), 8.0 μm (green), and 4.5 μm (blue). The CO (1-0) data is from Zhang et al. ^[34](2013). The integration range is from -14.5 to -11.5 km s^{-1} for the blueshifted cloud, and from -9.5 to -6.5 km s^{-1} for the redshifted cloud. The symbols “■”, letters (A, B, ..., and I), and ellipse indicate the positions of eight IRAS point sources, nine molecular clumps, and ringlike shell of the bubble, respectively. The figure above is from Zhang et al. ^[35](2016).

期恒星形成密切相关的天体已经在尘泡的壳状结构附近发现, 如红外尘泡N22^[28], N36^[31], N68^[33]. 可以推断, 这些恒星形成区可能是由于电离氢区的膨胀触发形成的, 不过此方面的统计工作还不够充分.

3.3 壳层结构上分子气体所示踪的物理信息

射电谱线观测数据主要用来示踪分子气体的辐射, 比如不同跃迁能级的CO, HCO⁺和HCN分子及其同位素分子等. 利用分子谱线信息, 可以很好地研究尘泡的距离、温度、密度和质量等相关物理环境信息. 并且可以进一步寻找与尘泡相关的恒星形成区, 甚至是正在演化的大质量年轻星.

(1) 分析分子谱线的速度成分, 挑选出与尘泡相关的成分. 由于银河系的棒旋结构多条旋臂的存在, 导致在观测某些天区时, 在视线方向上有多种复杂

图3 (网络版彩图) 尘泡N49的多波段轮廓和等值图. 其中(a)为斯皮策-GLIMPSE 8 μm (蓝绿色)辐射与20 cm (红色)的叠图. 其他3幅图中的等值图表示870 μm 的辐射, 灰度图分别表示870 μm (b), 20 cm (c) 和24 μm (d)的辐射. 绿色十字标出了 NH_3 的位置, 同时年轻星与致密电离氢区也被标出. 以上图片出自于Deharveng等人^[31]在2010年的研究工作

Figure 3 (Color online) The contours of Bubble N49 in multiband. (a) Spitzer-GLIMPSE 8.0 μm emission in turquoise and 24 μm emission in red. Others: contours of 870 μm emission superimposed to greyscale images at 870 μm (b), 20 cm (c), and 24 μm (d); the 870 μm contour levels are 0.08 Jy beam^{-1} (used to define the limits of the collected shell), 0.25, 0.5, 1.0, and 2.0 Jy beam^{-1} . The red contours at 0.25 Jy beam^{-1} have been used to measure the integrated 870 μm flux of condensations 1 to 4. The Figures above are from Deharveng et al. ^[31](2010).

的谱线速度成分存在. 而且由于湍流运动, 旋转等活动的存在, 对谱线的轮廓分析带来一定的困难. 一般来说, 射电谱线观测的分子气体发射强度图与尘泡 8 μm 的壳状分布有很好的相关性^[33,34,37]. 因此, 可以利用此关系从多种速度成分中挑选出与尘泡相关的成分. 另外, 考虑到尘泡可能是球壳状结构的, 尘泡可能存在着前端和后端成分, 因此在利用此关系挑选相关成分时要非常谨慎地排查不同的速度成分.

(2) 尘泡壳层的速度结构. 利用速度-位置图可以很好地展示出尘泡的壳层环境的速度结构分布图. 如Zhang等人^[33]在2012年对红外尘

泡N68的研究工作中的图3, 从A到E处有明显的速度梯度变化, 并且壳层上的B处和D处的速度弥散大于壳层之外的速度. 这说明壳层上面可能有剧烈的湍流活动. 还可以看出, 壳层之外的速度(即系统速度)分布范围表现在点A, C和E处, 并且这3点的速度值有很小的差异, 分布在 $\sim 58 \pm 1 \text{ km s}^{-1}$ 附近, 可能这主要是由于距离的远近和湍动造成的. 而红移峰出现在壳层上的B处($\sim 63 \text{ km s}^{-1}$), 蓝移峰出现在壳层上的D处($\sim 53 \text{ km s}^{-1}$). 因此尘泡N68可能正在视向方向上以 $\sim 5 \text{ km s}^{-1}$ 的速度向外膨胀.

(3) 计算运动学距离. 利用银河系旋转曲线的模

图4 (网络版彩图)红外尘泡S7(a), S16(b), S36(c)和CN148(d)的870 μm 轮廓图与GLIMPSE 8.0 μm 辐射强度分布的叠图. 这些尘泡样本都表现出很好的壳层结构, 和尘泡内部星风与壳层结构的相互作用效果. 这4个样本选自于Churchwell等人[3,4]于2006、2007年的研究工作

Figure 4 (Color online) Bubbles S7(a), S16(b), S36(c), and CN148(d) contours at ATLASGAL 870 μm superimposed on colorscale at GLIMPSE 8.0 μm . These bubbles show strong correlation in the interaction of stellar wind and ringlike shell. The four samples are selected from Churchwell et al. [3,4](2006, 2007).

型[82] ($R_{\odot} = 8.5 \text{ kpc}$ 和 $\Theta_{\odot} = 220 \text{ km s}^{-1}$), 并利用挑选出的与尘泡相关的速度成分, 估算出尘泡的运动学距离. 在银道坐标的第一、四象限存在着距离模糊现象. 由于在远的运动学距离处, 望远镜所扫集到的红外辐射理论上比较弱. 所以就目前观测到的红外尘泡来说, 它们普遍分布在近的运动学位置处. 例如, Churchwell等人[3]于2006年的统计工作发现, 在距离太阳为4.2 kpc处, 红外尘泡的探测率最高.

(4) 分析尘泡的形态结构. 一般来说, 在形态结构上, 尘泡在射电观测与红外观测有较好的相关性. 如图2, 4和5, 尘泡的壳状结构上有较强的射电辐射, 而在内部形成了一个射电空腔的结构. 因此, 可以

利用射电数据进一步计算尘泡的内外环半径, 从而确定电离氢区的半径参数. 尘泡的形态结构多种多样, 比如有多个尘泡壳状环交错分布在一起, 相互作用[27]; 丝状或者纤维状的分子云交织在尘泡环周围. 这些形态上的物理现象和特征, 可能是由于电离氢区的膨胀与周围的星际介质相互作用而形成的. 如图5, 射电观测数据显示, 在尘泡N131的东部和西部出现了两条准直细长的分子云, 这可能是由于尘泡的膨胀而与周围的分子云团块相互作用而触发形成的[34]. 而且射电干涉阵的研究发现壳层中的分子云团块的碎裂程度比附近分子云中的更强, 这也是存在相互作用的证据, 如Sherman[27]于2012年的研

图 5 (网络版彩图) 红外尘泡 N131 的 CO(2-1)(a), CO(1-0)(b) 和 $^{13}\text{CO}(1-0)$ (c) 积分强度图与 $24\ \mu\text{m}$ 红外辐射的叠图. CO 轮廓图的速度积分区间为 $[-14.5, -6.5]\ \text{km s}^{-1}$. 每幅图左下角的小圆表示等值图的空间分辨率的大小. $24\ \mu\text{m}$ 红外辐射图的单位为 MJy sr^{-1} . 其中字母 A 到 I 标出了辨认的 9 个 CO 团块的分布, 小方块标出了尘泡附近的 8 个红外点源 (IRAS) 的位置. HPBW 给出了等值图的空间分辨率. 该图片出自于 Zhang 等人 [35] 在 2016 年的研究工作

Figure 5 (Color online) Integrated intensity maps of the CO(2-1) (a), CO(1-0) (b), and $^{13}\text{CO}(1-0)$ (c) lines with velocity range from -14.5 to $-6.5\ \text{km s}^{-1}$ superimposed on $24\ \mu\text{m}$ emission. The contour levels start are at 3σ in steps of 5σ for CO(2-1) ($\sigma = 1.7\ \text{K}(T_{\text{A}}^*)\ \text{km s}^{-1}$), CO(1-0) ($\sigma = 1.5\ \text{K}(T_{\text{A}}^*)\ \text{km s}^{-1}$), and $^{13}\text{CO}(1-0)$ ($\sigma = 0.4\ \text{K}(T_{\text{A}}^*)\ \text{km s}^{-1}$). The beam size of each subfigure is indicated at the bottom-left corner. The symbols “■”, letters (A, B, ..., and I), and ellipse indicate the positions of eight IRAS point sources, nine molecular clumps, and ringlike shell of the bubble, respectively. The unit of each color bar is in MJy sr^{-1} . The figure above is from Zhang et al. [35](2016).

究工作.

(5) 寻找可能的恒星形成区. 分子谱线在示踪恒星形成区时, 起着重要的作用. 对比光学薄与光

学厚的分子谱线轮廓(CO, HCO^+ 等分子), 确定光学厚的谱线是否存在自吸收, 红蓝峰不对称, 线翼加宽等特征, 从而寻找尘泡的壳状结构上是否存在

与恒星形成相关的坍缩和吸积, 外向流和内向流的物理现象. 一些分子(NH_3)是天然的温度探针, 利用这些分子谱线可以很好地示踪尘泡环境中的温度值; 一些分子(HCN , HCO^+ 等)可以很好地示踪致密核, 这些致密核是较好的恒星形成区的候选体. 射电谱线的强度分布图与致密电离氢区也有较强的相关性. 研究发现, 尘泡周围确实存在着致密核, 致密电离氢区, 脉泽源, IRAS源等较明显的恒星形成的现象 [33,34,37,83]. 例如, 尘泡N36附近存在着红外暗云(Infrared Dark Cloud, IRDC) [31], 而红外暗云示踪最年轻的恒星形成区; 尘泡N65的壳状环境的致密团块中栖息着EGO源G35.05+0.35 [32]. 这很可能说明, 尘泡的形成可以触发新一代的恒星形成. 但是, 这些恒星形成区也有可能在尘泡出现之前形成. 因此, 下一步, 需要比较电离氢区的膨胀年龄, 团块坍缩年龄与年轻星年龄的关系.

3.4 电离氢区的壳层结构与年龄

分析尘泡的连续谱观测数据可以研究尘泡的致密核分布情况, 如利用1.1 mm的毫米波连续谱BGPS的巡天数据和870 μm 的亚毫米波连续谱ATLASGAL 870 μm (如图4)的巡天数据, 可以研究电离氢区的年龄, 如利用1.4 GHz NVSS巡天数据; 结合连续谱数据与红外数据还可以研究点源的能谱分布情况. 下面将着重介绍利用1.4 GHz NVSS巡天数据研究电离氢区的壳层结构与年龄等特征.

在图3中, 20 cm的连续谱发射来自1.4 GHz NVSS巡天数据, 它主要示踪电离氢的分布. 观测研究表明, 24 μm 的红外辐射与20 cm的连续谱发射有极其相似的轮廓分布图(Contour), 主要充满地分布在8 μm 辐射的壳层环内部 [31]. 而在有些尘泡的壳层环外部也有连续谱的分布, 这可能说明内部的辐射压较强, 连续谱辐射已经冲破了壳状环的束缚, 并且电离了壳状环外部的中性气体. 然而, 致密电离氢区的形状奇异, 同样也有可能触发形成这类泡状结构特征的天体. 另外, 观测发现一些尘泡在壳层环内部的连续谱发射处存在着空洞, 这表明壳层环内部物质的辐射已经变弱, 或者已经被中心大质量恒星的星风吹散, 如图5中的尘泡N131 [34].

Mezger等人 [84]在1974年提出了一个通过连续谱流量强度估算莱曼关系数目的关系式:

$$\frac{N_{\text{Lyc}}}{\text{s}^{-1}} = \frac{4.761 \times 10^{48}}{\alpha(\nu, T_e)} \frac{S_\nu}{J_y} \left[\frac{\nu}{\text{GHz}} \right]^{0.1} \times \left[\frac{T_e}{\text{K}} \right]^{-0.45} \left[\frac{D}{\text{kpc}} \right]^2, \quad (1)$$

利用20 cm的连续谱发射数据, 可以估算尘泡壳层内部激发星释放的莱曼光子数目, 并且进一步估算与之等效的恒星类型. 莱曼连续光子数和与之等效的激发星类型的关系可以在Panagia [85]于1973年的工作中找到. 2010年, Beaumont等人 [51]发现这种方法计算出来的莱曼连续谱光子数大约低估了一半, 因此计算莱曼光子数时需要增加1倍. 多数情况下, 通过这种方法得到等效的早型O型星常常多于1颗, 甚至达到十几颗 [51]. 这说明尘泡壳层内部的激发星可能是成团存在的. 而一些情况下, 所找到的激发星不足1颗O型星, 这可能是由于尘泡壳层内部的尘埃和电离气体已经被蒸发或吹散, 尘泡活动已经处于它的晚期阶段, 不再继续向外膨胀.

为了获得电离氢区的年龄, 可以利用Higdon [86]于1980年的模型进行计算, 公式如下:

$$t(R) = \frac{4R_s}{7C_s} \left[\left(\frac{R}{R_s} \right)^{7/4} - 1 \right], \quad (2)$$

其中, $C_s=10 \text{ km s}^{-1}$ 在电离气体的声速, $R_s = (3N_{\text{Lyc}}/4\pi n_0^2 \alpha_B)^{1/3}$ 是斯特隆根球的半径, N_{Lyc} 是公式(1)中得到的每秒钟辐射的莱曼光子数, n_0 是膨胀前母体分子云的初始密度, α_B 是各激发态中氢复合线的相关系数. 对于壳层中团块的成团时标, 可以利用Whitworth等人 [48](1994)的理论模型公式:

$$\frac{t_{\text{fragment}}}{\text{Myr}} = 1.56 \left(\frac{\alpha_s}{0.2} \right)^{\frac{7}{11}} \left(\frac{N_{\text{Lyc}}}{10^{49}} \right)^{-\frac{1}{11}} \left(\frac{n_0}{10^3} \right)^{-\frac{5}{11}}, \quad (3)$$

其中, α_s 是中性气体的等温声速, 其他参数与公式(2)中的相同. 通过莱曼连续谱流量估计年龄公式, 估算团块成团坍缩的时标公式, 与壳层中的年轻星年龄进行比较, 可以很好地给出尘泡触发恒星形成的这一系列过程的时间序列. 从目前的研究工作中看, 一般团块的成团时标要大于电离氢区的膨胀年龄, 这说明团块在电离氢区对其作用之前已经

存在. 也有碎裂时标小于电离氢区的膨胀年龄的, 如Dirienzo等人^[87]于2012年的工作. 然而, 由于理论模型仍然存在着一定的缺陷, 距离尺度不够精确, 观测误差比较大, 所以目前的研究结果仍然有待改善, 但也不能完全否认尘泡膨胀触发恒星形成的相关模型. 因此, 对于更多尘泡样本的研究是很有必要的.

3.5 筛选激发星和年轻星

2006和2007年, Churchwell等人^[3,4]所编撰的591个红外尘泡主要是在电离氢区的膨胀, 触发周围星际物质过程中形成的, 如图4, 个别几个尘泡是在超新星爆炸并触发周围星际介质中形成的. 尘泡的主要形成机制还包括来自于大质量星的星风, 到底是哪种机制占主导到现在并不清楚. 因此, 研究尘泡形成的激发天体是一个非常重要的研究课题. 本文主要考虑的是电离氢区膨胀触发尘泡形成, 寻找激发星是研究尘泡主要问题. 一般认为, 尘泡的激发星属于大质量的O型或者早型的B型星.

对红外数据进行测光分析, 是研究尘泡周围年轻星与激发星的必要手段. 筛选激发星的方法有许多种, 大多数是利用红外数据进行筛选, 这里仅仅介绍几种常用但粗略的方法^[34]. 首先, 可以利用Allen等人^[88]于2004年的GLIMPSE的双色图(Color-Color)方法 $[(5.8) - (8.0)]$ vs. $[(3.6) - (4.5)]$ 可以筛选出与红外尘泡相关的Class I, Class II和Class III阶段的源, 并且要剔除掉在距离和位置关系上与尘泡的不相关的源. 其中, Class I源主要是带有下落包层的原恒星, 幂律谱为平谱; Class II源主要是带有盘状结构的主序前星; Class III源主要是以接近零龄主序为主的主序前星和不相关的场星^[89-91]. 然而该方法没有考虑各类污染源的干扰, 不能可靠地筛选出各类初始恒星体. 基于此, 可以结合2MASS的 $(H-K)$ vs. $(J-H)$ 双色图模型, 根据候选源在不同区域的分布, 进一步筛选原恒星、年轻星、主序前星以及场星. 并且, 计算候选源的消光和距离等参数^[92,93]. 最后, 利用能谱拟合(SED)工具^[94]对筛选出来的激发星候选体进行进一步的确认, 可以得到激发星的质量、温度、年龄、距离和盘质量等有用的参数. 然而, 尽管研究方法很多, 但是值得深究的是, 至今

没有更好的理论可以很好地确定这些激发星一定是触发尘泡形成的激发源. 主要的问题是, 无法精确地确定遥远天体的距离. 所以, 需要注意的是, 这些候选体在尘泡周围的分布, 仅仅是概率上的一种统计方法, 很可能这些筛选出来的候选体是与尘泡无关的场星.

相对激发星来说, 寻找与尘泡相关的年轻星比较容易些. 通过GLIMPSE双色图筛选出的Class I和II星, 是很好的年轻星样本. 与筛选激发星一样, 可以进行距离上的判断, 然后利用能谱拟合工具, 对这些年轻星进行筛选^[94]. 在Zhang等人^[37]于2012年对红外尘泡S51的工作中的图7中展示出了Class I和II型星的分布情况, 他们主要是围绕着尘泡的壳层结构附近分布的. 最后, 分析这些年轻星在尘泡周围的分布情况, 从而确定年轻星与尘泡的关系. 需要注意的是, 这种方法主要是基于概率统计的原理. 从对多个尘泡的研究来看, 年轻星主要分布在尘泡的壳层结构上, 这说明尘泡的壳层环境可能是恒星形成的诞生地. 对于年轻星的搜索, 期待着从多波段上发现与尘泡壳层环境相成协的现象, 从而进一步理解尘泡的膨胀是否能够触发新一代的恒星形成. 另外, Gutermuth等人^[95]于2009年给出了更为有效的证认初始恒星体的方法. 他们结合2MASS和斯皮策的多波段红外数据使用数个颜色规则对初始恒星体的筛选进行了详细讨论. 同时, 他们还考虑了各类河外和河内污染源. WISE数据在3.4和4.6 μm 2个波段有着比斯皮策数据更高的灵敏度, 也是可用于初始恒星体证认的优良数据, 如Koenig等人^[96]于2012年的工作.

4 总结

近些年来, 对红外尘泡物理环境方面的研究工作比较热门. 普遍认为, OB型星释放出大量的UV光子, UV光子电离周围的中性星际介质演化形成膨胀的电离氢区, 电离氢区在“扫集坍缩”和“辐射内爆”的作用下形成致密的壳状结构. 受电离氢区或者红外尘泡膨胀引起的触发恒星形成被认为可能是银河系中的一个重要物理过程. 一方面, 因为电离氢区普遍存在于银河系中; 另一方面, 目前的观测表明

银河系中大约有14%–30%的大质量年轻星天体可能是被电离氢区的膨胀触发形成的. 在观测上, 大质量恒星的形成和演化过程中的确伴随着强烈的恒星反馈, 如辐射压、外向流、星风、电离氢区以及超新星爆炸等剧烈的物理活动. 在小尺度上, 大质量星产生的辐射压、喷流及外向流可能决定恒星形成的最终质量; 在中等尺度上, 星风及电离氢区膨胀可以改变分子云的几何形状, 甚至有可能触发新一代恒星形成; 在星系尺度上, 大质量星的反馈在星系的形成、结构与演化, 以及星系尺度上的恒星形成起着至关重要的作用. 在整个宇宙尺度上, 大质量恒星的反馈还调节着宇宙中的化学元素丰度.

对于目前两种主流的理论模型: “扫集坍缩”和“辐射内爆”, 常被用于解释电离氢区周围可能的触发恒星形成现象. “扫集坍缩”主要模拟的是大尺度结构(如壳层、或环状分子云)中的恒星形成过程, 而“辐射内爆”主要针对的是小尺度结构如“彗星”状、柱状、象鼻状分子云等. 目前关于触发恒星形成的理论走在了观测的前面, 因为过去数十年里的观测很难突破至少3方面的问题: 其一, 很难从电离氢区周围复杂的物理环境中观测到电离氢区与其近邻介质相互作用的具体过程; 其二, 很难将混在一起的被触发形成的年轻星与自发形成的年轻星辨别出来; 其三, 年轻星样本的不完备性和不精确, 尤其是那些深度嵌埋在致密分子云中的最年轻的原恒星天体, 很难恢复电离氢区周围年轻星真实的空间分布. 得益于多波段巡天(如: 赫歇尔远红外、斯皮策中红外、2MASS近红外等)以及更多的分子谱线的观测, 它们使得上述问题的解决有了新的转机.

结合不同波段的观测数据研究红外尘泡的形

成、演化和反馈等物理环境是非常重要的. 比如在射电方面, 通过筛选射电望远镜观测到的与尘泡相关的分子谱线速度成分, 可以更好地得到红外尘泡的速度结构. 利用分子谱线所包含的信息, 寻找恒星形成的迹象. 进行射电数据的辐射强度图和速度-位置图的研究, 分析尘泡的形态结构上的物理特征. 而对于连续谱来说, 在视线方向上的前景源与背景源的干扰很难被剔除掉. 因此, 需要尽量利用射电数据进行速度成分上的区别对待. 利用红外数据源表进行激发星与年轻星筛选时, 由于红外数据的消光特别严重, 那么可以选择利用概率统计方法, 分析年轻星在壳层结构中的分布, 推断触发恒星形成的可能性. 对于激发星来说, 依然只能通过位置关系和年龄上的判断确定最可能的激发星候选体. 然而, 对于所筛选出来的激发星与年轻星, 它们是否真正的与尘泡相关, 仍然是一个亟待解决的问题.

对尘泡的研究工作还存在着许多不足之处, 期望利用盖亚(Gaia)空间望远镜的观测数据获取研究天体的距离信息, 从而能够更精确地计算红外尘泡演化的动力学时标, 并且筛选与红外尘泡真正相关的年轻星和激发星等天体; 还期待着利用更高空间分辨率的望远镜(EVLA, ALMA等)去观测红外尘泡的精细特征, 如进一步研究尘泡的红外辐射分布、电离程度、空间结构、相互作用、速度特征等. 利用更高速度分辨率的接收系统揭示尘泡壳层上动力学结构上的物理信息. 另外, 积累更多的研究样本是非常必要的, 可以更好地理解尘泡是如何与周围的星际介质相互作用的. 对于更大样本的统计工作, 比如, 可以利用位于夏威夷的东亚天文台JCMT望远镜, 以及紫金山天文台青海德令哈观测站的13.7 m口径的毫米波望远镜来完成.

致谢 感谢 ESO 授权我们使用文章中的部分图片.

参考文献

- 1 Watson C, Povich M S, Churchwell E B, et al. Infrared dust bubbles: Probing the detailed structure and young massive stellar populations of galactic H II regions. *Astrophys J*, 2008, 681: 1341–1355
- 2 Watson C, Hanspal U, Mengistu A. Triggered star formation and dust around mid-infrared-identified Bubbles. *Astrophys J*, 2010, 716: 1478–1492
- 3 Churchwell E, Povich M S, Allen D, et al. The bubbling galactic disk. *Astrophys J*, 2006, 649: 759–778

- 4 Churchwell E, Watson D F, Povich M S, et al. The bubbling galactic disk. II. The inner 20°. *Astrophys J*, 2007, 670: 428–441
- 5 Ingallinera A, Trigilio C, Umana G, et al. Study of the extended radio emission of two supernova remnants and four planetary nebulae associated with MIPS GAL bubbles. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 445: 4507–4517
- 6 Milisavljevic D, Fesen R A. The bubble-like interior of the core-collapse supernova remnant Cassiopeia A. *Science*, 2015, 347: 526–530
- 7 Zinnecker H, Yorke H W. Toward understanding massive star formation. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2007, 45: 481–563
- 8 Kendrew S, Simpson R, Bressert E, et al. The milky way project: A statistical study of massive star formation associated with infrared bubbles. *Astrophys J*, 2012, 755: 71
- 9 Dyson J E, Williams D A. The Physics of the Interstellar Medium. 2nd ed. R. J. Tayler R J, Elvis M, eds. Bristol, Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1997
- 10 Elmegreen B G, Lada C J. Sequential formation of subgroups in OB associations. *Astrophys J*, 1977, 214: 725–741
- 11 Yan Q, Xu Y, Zhang B, et al. Molecular lines of 13 galactic infrared bubble regions. *Astrophys J*, 2016, 152: 117
- 12 Bertoldi F. The photoevaporation of interstellar clouds. I. Radiation-driven implosion. *Astrophys J*, 1989, 346: 735–755
- 13 Bertoldi F, McKee C F. The photoevaporation of interstellar clouds. II. Equilibrium cometary clouds. *Astrophys J*, 1990, 354: 529–548
- 14 Liu H L. Interplay Between H II Regions and Their Surroundings: Triggered Star Formation (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. 1–195 [刘洪礼. 电离氢区对近邻介质的反馈-触发恒星形成. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学. 2016. 1–195]
- 15 Zhang C P. High-Mass Star Formation and Its Initial Conditions (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. 1–140 [张传朋. 大质量恒星形成及其初始条件. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学. 2015. 1–140]
- 16 Gum C S. A survey of southern H II regions. *Memoirs RAS*, 1955, 67: 155
- 17 Rodgers A W, Campbell C T, Whiteoak J B. A catalogue of H-emission regions in the southern milky way. *Mon Not R Astron Soc*, 1960, 121: 103–110
- 18 Sharpless S. A catalogue of H II regions. *Astrophys J Suppl Ser*, 1960, 4: 257
- 19 Paladini R, Burigana C, Davies R D, et al. A radio catalog of Galactic HII regions for applications from decimeter to millimeter wavelengths. *Astron Astrophys*, 2003, 397: 213–226
- 20 Benjamin R A, Churchwell E, Babler B L, et al. GLIMPSE. I. An SIRTf legacy project to map the inner galaxy. *Publ Astron Soc Pac*, 2003, 115: 953–964
- 21 Carey S J, Noriega-Crespo A, Mizuno D R, et al. MIPS GAL: A survey of the inner galactic plane at 24 and 70 μm . *Publ Astron Soc Pac*, 2009, 121: 76–97
- 22 Simpson R J, Povich M S, Kendrew S, et al. The milky way project first data release: A bubblier Galactic disc. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 424: 2442–2460
- 23 Hou L G, Gao X Y. A statistical study of gaseous environment of Spitzer interstellar bubbles. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 438: 426–437
- 24 Bania T M, Anderson L D, Balser D S. The Arecibo H II region discovery survey. *Astrophys J*, 2012, 759: 96
- 25 Liu H L, Li J Z, Wu Y, et al. Interactions of the infrared bubble N4 with its surroundings. *Astrophys J*, 2016, 818: 95
- 26 Gama D R G, Lepine J R D, Mendoza E, et al. CO observations and investigation of triggered star formation toward the N10 infrared bubble and surroundings. *Astrophys J*, 2016, 830: 57
- 27 Sherman R A. Investigation of molecular cloud structure around infrared bubbles: CARMA observations of N14, N22, and N74. *Astrophys J*, 2012, 760: 58
- 28 Ji W G, Zhou J J, Esimbek J, et al. The infrared dust bubble N22: An expanding H II region and the star formation around it. *Astron Astrophys*, 2012, 544: A39
- 29 Dewangan L K, Baug T, Ojha D K, et al. Star-formation activity in the neighborhood of W-R 1503-160L star in the mid-infrared bubble N46. *Astrophys J*, 2016, 826: 27
- 30 Zavagno A, Anderson L D, Russeil D, et al. Star formation triggered by H II regions in our Galaxy. First results for N49 from the Herschel infrared survey of the Galactic plane. *Astron Astrophys*, 2010, 518: L101
- 31 Deharveng L, Schuller F, Anderson L D, et al. A gallery of bubbles. The nature of the bubbles observed by Spitzer and what ATLASGAL tells us about the surrounding neutral material. *Astron Astrophys*, 2010, 523: A6
- 32 Petriella A, Paron S, Giacani E. The environment of the infrared dust bubble N65: A multiwavelength study. *Astron Astrophys*, 2010, 513: A44
- 33 Zhang C P, Wang J J. Star formation associated with the infrared dust bubble N68. *Res Astron Astrophys*, 2013, 13: 47–56
- 34 Zhang C P, Wang J J, Xu J L. Molecular clumps and star formation associated with the infrared dust bubble N131. *Astron Astrophys*, 2013, 550: A117

- 35 Zhang C P, Li G X, Wyrowski F, et al. N131: A dust bubble born from the disruption of a gas filament. *Astron Astrophys*, 2016, 585: A117
- 36 Cappa C E, Duronea N, Firpo V, et al. Molecular gas and star formation toward the IR dust bubble S 24 and its environs. *Astron Astrophys*, 2016, 585: A30
- 37 Zhang C P, Wang J J. Multiwavelength study of the infrared dust bubble S51. *Astron Astrophys*, 2012, 544: A11
- 38 Ortega M E, Giacani E, Paron S, et al. Study of a bright-rimmed cloud at the border of the infrared dust bubble CN20. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 458: 3684–3690
- 39 Dewangan L K, Ojha D K, Anandarao B G, et al. Triggered star formation around mid-infrared bubbles in the G8.14+0.23 H II region. *Astrophys J*, 2012, 756: 151
- 40 Baug T, Ojha D K, Dewangan L K, et al. Sh2-138: Physical environment around a small cluster of massive stars. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 454: 4335–4356
- 41 Anderson L D, Deharveng L, Zavagno A, et al. Mopra CO observations of the bubble H II region RCW 120. *Astrophys J*, 2015, 800: 101
- 42 Liu H L, Wu Y, Li J Z, et al. A feedback-driven bubble G24.136+00.436: A possible site of triggered star formation. *Astrophys J*, 2015, 798: 30
- 43 Hosokawa T, Inutsuka S. Dynamical expansion of ionization and dissociation front around a massive star: A starburst mechanism. *Astrophys J*, 2006, 648: L131–L134
- 44 Zavagno A, Deharveng L, Comerón F, et al. Triggered massive-star formation on the borders of Galactic H II regions. II. Evidence for the collect and collapse process around RCW 79. *Astron Astrophys*, 2006, 446: 171–184
- 45 Deharveng L, Zavagno A, Schuller F, et al. Star formation around RCW 120, the perfect bubble. *Astron Astrophys*, 2009, 496: 177–190
- 46 Krumholz M R, Stone J M, Gardiner T A. Magnetohydrodynamic evolution of H II regions in molecular clouds: Simulation methodology, tests, and uniform media. *Astrophys J*, 2007, 671: 518–535
- 47 Krumholz M R, Matzner C D. The dynamics of radiation-pressure-dominated H II regions. *Astrophys J*, 2009, 703: 1352–1362
- 48 Whitworth A P, Bhattal A S, Chapman S J, et al. The preferential formation of high-mass stars in shocked interstellar gas layers. *Mon Not R Astron Soc*, 1994, 268: 291–298
- 49 Kurtz S, Churchwell E, Wood D O S. Ultracompact H II regions. 2: New high-resolution radio images. *Astrophys J Suppl Ser*, 1994, 91: 659–712
- 50 Wood D O S, Churchwell E. The morphologies and physical properties of ultracompact H II regions. *Astrophys J Suppl Ser*, 1989, 69: 831–895
- 51 Beaumont C N, Williams J P. Molecular rings around interstellar bubbles and the thickness of star-forming clouds. *Astrophys J*, 2010, 709: 791–800
- 52 Lefloch B, Lazareff B. *Astron Astrophys*, 1994, 289: 559–578
- 53 Bisbas T G, Wunsch R, Whitworth A P, et al. Radiation-driven implosion and triggered star formation. *Astrophys J*, 2011, 736: 142
- 54 Chen W P, Lee H T, Sanchawala K. Triggered star formation in OB associations. *IAU*, 2006, 2: 278–282
- 55 Kendrew S, Beuther H, Simpson R, et al. The milky way project and ATLASGAL: The distribution and physical properties of cold clumps near infrared bubbles. *Astrophys J*, 2016, 825: 142
- 56 Thompson M A, Urquhart J S, Moore T J T, et al. The statistics of triggered star formation: An overdensity of massive young stellar objects around Spitzer bubbles. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 421: 408–418
- 57 Deharveng L, Lefloch B, Zavagno A, et al. Triggered massive-star formation at the border of the H II Region Sh 104. *Astron Astrophys*, 2003, 408: L25–L28
- 58 Pomarès M, Zavagno A, Deharveng L, et al. Triggered star formation on the borders of the Galactic Hii region RCW 82. *Astron Astrophys*, 2009, 494: 987–1003
- 59 Dale J E, Haworth T J, Bressert E. The dangers of being trigger-happy. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 450: 1199–1211
- 60 Sugitani K, Tamura M, Ogura K. Young star clusters in bright-rimmed clouds: Small-scale sequential star formation? *Astrophys J*, 1995, 455: L39
- 61 Sugitani K, Morita K I, Nakano M, et al. Interferometric ^{13}CO observations of the cometary bright-rimmed cloud 37 in IC 1396: Evidence for collapse phase of radiation-driven implosion? *Astrophys J*, 1997, 486: L141–L144
- 62 Sugitani K, Tamura M, Nakajima Y, et al. Near-infrared study of M16: Star formation in the elephant trunks. *Astrophys J*, 2002, 565: L25–L28
- 63 Ikuko M, Itoh Y, Sugitani K, et al. Sequential formation of low-mass stars in the BRC 14 region. *Publ Astron Soc Jpn*, 2006, 58: L29–L34
- 64 Sugitani K, Watanabe M, Tamura M, et al. Near-Infrared polarimetry of the eagle nebula (M 16). *Publ Astron Soc Jpn*, 2007, 59: 507–517
- 65 Ikeda H, Sugitani K, Watanabe M, et al. Sequential star formation in a cometary globule (BRC37) of IC1396. *Astron J*, 2008, 135: 2323–2335
- 66 Fukuda N, Miao J, Sugitani K, et al. Triggered star formation in a bright-rimmed cloud (BRC 5) of IC 1805. *Astrophys J*, 2013, 773: 132
- 67 Churchwell E, Babler B L, Meade M R, et al. The Spitzer/GLIMPSE surveys: A new view of the milky way. *Publ Astron Soc Pac*, 2009, 121: 213–230
- 68 Skrutskie M F, Cutri R M, Stiening R, et al. The two micron all sky survey (2MASS). *Astron J*, 2006, 131: 1163–1183

- 69 Neugebauer G, Habing H J, van Duinen R, et al. The infrared astronomical satellite (IRAS) mission. *Astrophys J*, 1984, 278: L1–L6
- 70 Condon J J, Cotton W D, Greisen E W, et al. The NRAO VLA sky survey. *Astron J*, 1998, 115: 1693–1716
- 71 Mainzer A, Bauer J, Grav T, et al. Preliminary results from NEOWISE: An enhancement to the wide-field infrared survey explorer for solar system science. *Astrophys J*, 2011, 731: 53
- 72 Wright E L, Eisenhardt P R M, Mainzer A K, et al. The wide-field infrared survey explorer (WISE): Mission description and initial on-orbit performance. *Astron J*, 2010, 140: 1868–1881
- 73 Lo N, Cunningham M R, Jones P A, et al. Molecular line mapping of the giant molecular cloud associated with RCW106 - III. Multimolecular line mapping. *Mon Not R Astron Soc*, 2009, 395: 1021–1042
- 74 Foster J B, Jackson J M, Barnes P J, et al. The millimeter astronomy legacy team 90 GHz (MALT90) pilot survey. *Astrophys J Suppl Ser*, 2011, 197: 25
- 75 Jackson J M, Rathborne J M, Shah R Y, et al. The Boston University-five college radio astronomy observatory galactic ring survey. *Astrophys J Suppl Ser*, 2006, 163: 145–159
- 76 Werner M W, Roellig T L, Low F J, et al. The Spitzer space telescope mission. *Astrophys J Suppl Ser*, 2004, 154: 1–9
- 77 Fazio G G, Hora J L, Allen L E, et al. The infrared array camera (IRAC) for the Spitzer space telescope. *Astrophys J Suppl Ser*, 2004, 154: 10–17
- 78 Anderson L D, Zavagno A, Deharveng L, et al. The dust properties of bubble H II regions as seen by Herschel. *Astron Astrophys*, 2012, 542: A10
- 79 Paron S, Petriella A, Ortega M E. The HII region G35.673-00.847: Another case of triggered star formation? *Astron Astrophys*, 2011, 525: A132
- 80 Povich M S, Stone J M, Churchwell E, et al. A multiwavelength study of M17: The spectral energy distribution and PAH emission morphology of a massive star formation region. *Astrophys J*, 2007, 660: 346–362
- 81 Churchwell E. Pathways through an eclectic universe. In: *Proceedings of Pathways Through an Eclectic Universe ASP Conference*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2008. 390: 63
- 82 Fich M, Blitz L, Stark A A. The rotation curve of the Milky Way to 2 R(0). *Astrophys J*, 1989, 342: 272–284
- 83 Ingallinera A, Trigilio C, Leto P, et al. Searching for OH maser emission towards the MIPSGAL compact Galactic bubbles. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 453: 3204–3213
- 84 Mezger P G, Smith L F, Churchwell E. IR-excess radiation and the absorption characteristics of dust in galactic H II regions. *Astron Astrophys*, 1974, 32: 269–282
- 85 Panagia N. Some physical parameters of early-type stars. *Astron J*, 1973, 78: 929–934
- 86 Higdon J C. The physics of the interstellar medium. *Astron Q*, 1982, 4: 139–140
- 87 Dirienzo W J, Indebetouw R, Brogan C, et al. Testing triggered star formation in six H II regions. *Astron J*, 2012, 144: 173
- 88 Allen L E, Calvet N, D'Alessio P, et al. Infrared array camera (IRAC) colors of young stellar objects. *Astrophys J Suppl Ser*, 2004, 154: 363–366
- 89 Lada C J. Star formation - From OB associations to protostars. *Proc IAU*, 1987, 115: 1–17
- 90 Greene T P, Wilking B A, Andre P, et al. Further mid-infrared study of the rho Ophiuchi cloud young stellar population: Luminosities and masses of pre-main-sequence stars. *Astrophys J*, 1994, 434: 614–626
- 91 Bachiller R. Bipolar molecular outflows from young stars and protostars. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1996, 34: 111–154
- 92 Rieke G H, Lebofsky M J. The interstellar extinction law from 1 to 13 microns. *Astrophys J*, 1985, 288: 618–621
- 93 Bessell M S, Brett J M. JHKLM photometry - Standard systems, passbands, and intrinsic colors. *Publ Astron Soc Pac*, 1988, 100: 1134–1151
- 94 Robitaille T P, Whitney B A, Indebetouw R, et al. Interpreting spectral energy distributions from young stellar objects. II. Fitting observed SEDs using a large grid of precomputed models. *Astrophys J Suppl Ser*, 2007, 169: 328–352
- 95 Gutermuth R A, Megeath S T, Myers P C, et al. A Spitzer survey of young stellar clusters within one kiloparsec of the sun: Cluster core extraction and basic structural analysis. *Astrophys J Suppl Ser*, 2009, 184: 18–83
- 96 Koenig X P, Leisawitz D T, Benford D J, et al. Wide-field infrared survey explorer observations of the evolution of massive star-forming regions. *Astrophys J*, 2012, 744: 130

Progresses and methods in research of infrared dust bubble

ZHANG ChuanPeng* & WANG JunJie

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

The infrared dust bubble, with ringlike shell, was found by the infrared survey of Galactic plane. Massive stars (OB-type stars) within bubble strongly influence their surrounding environment, throughout their lifetime via stellar wind, ionizing radiation, heating of dust, and expansion of their HII regions. The expansion of HII regions may trigger new generation star formation by compressing neighboring pre-existing molecular material to the point of gravitational instability. Many studies have been focusing on the relationship between the infrared dust bubble and star formation, because there are lots of star formation signatures on borders of bubbles. Previous works have well studied the environment of many bubbles using infrared and radio data from different telescopes. However, there are many problems about the observational research and theoretical model, such as how to make sure the distance scale of the bubble from the Sun, how to find reliable exciting stars and young stars, why not observed the front and rear cloud of the three-dimensional bubble, how to know the ages of different objects and processes around bubbles more exactly, how to further understand the interaction between HII region and ringlike shell.

bubble, star formation, HII region, YSO

PACS: 97.10.Bt, 97.10.Fy, 98.38.Gt, 98.38.Kx

doi: [10.1360/SSPMA2016-00476](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00476)