

文章编号: 1000-8349(2012)02-186-16

# 银河系中的泡结构

赵君亮<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 上海师范大学, 上海 200233)

**摘要:** 观测表明银河系内存在为数众多的星际泡, 泡壁的二维投影亦称壳层, 太阳系便位于称之为本地泡的一个泡结构之内。随着越来越多星际泡的发现和确认, 人们对泡的研究渐趋深入, 包括泡结构的多种统计性质, 星际泡的若干可能的形成机制, 以及泡与恒星形成和演化的关系等。从上述诸方面介绍了银河系泡结构的多波段研究进展。

**关键词:** 银河系; 泡; 壳层; 恒星形成

**中图分类号:** P156      **文献标识码:** A

## 1 引 言

众所周知, 银河系内的物质形态除恒星外还存在由气体和尘埃组成的各类星际介质 (ISM), 亦称星际物质。星际介质的密度分布颇不均匀, 其中密度高的地方便构成星际云, 中性氢云的物质数密度约为  $1 \text{ cm}^{-3}$  (分子云物质的数密度可大于  $100 \text{ cm}^{-3}$ ), 而云间物质的数密度仅约为  $0.1 \text{ cm}^{-3}$ 。随着多波段天文学的长足进展, 特别是射电、红外等观测技术的日臻完善, 人们对星际介质及其分布的认识渐而深入, 其中之一就是泡 (bubble), 或曰星际泡, 而尺度较大的泡亦称超泡 (superbubble)。

早在 1974 年 Cox 和 Smith<sup>[1]</sup> 就已指出, 星际泡可能是超新星在爆发后, 随着其遗迹 (SNR) 的膨胀、演化, 并向周边星际介质推进过程中的产物。泡结构可区分为性质明显不同的两种成分: 膨胀中的薄壳层 (泡壁) 和该壳层所包围的空腔。壳层 (shell) 也就是泡的外部边界, 物质密度较高而温度很低, 内中包含了大部分被向外驱出的星际介质。空腔因内部介质密度很低而得名, 但温度却可高达约  $10^6 \sim 10^8 \text{ K}$ , 因而泡有时又被称为“热泡” (hot bubble)。翌年, Castor 等人<sup>[2]</sup> 认为, 大质量早型星的星风之强, 同样可以在星际介质中“吹”出类似的泡结构。在他们的模型中, 除最外层密度较高的低温膨胀壳层, 以及壳层内的高温、低密度物质区外, 最内层则是超声速星风区。

事实上, 在更早的 20 世纪 60 年代, 人们已通过射电观测注意到了星际介质的某些分

收稿日期: 2011-06-02; 修回日期: 2011-10-14

资助项目: 国家自然科学基金 (10773020, 10778003, 10833055)

布特征, 如从银道面附近  $l^{\text{II}} \approx 30^\circ$  的地方起, 朝北银极延伸的长条形“北极支 (North Polar Spur)”, 该支条形结构的宽度约为  $10^\circ$ , 它有可能是某个环形结构 (Loop I) 的一部分<sup>[3]</sup>, 而 Loop I 环的视角直径约为  $116^\circ$ <sup>[4]</sup>。在南银半球则有所谓“鲸鱼座弧 (Cetus Arc)”, 它可能是另一个环形结构 Loop II 的一部分, 该环的视角直径约为  $91^\circ$ <sup>[4,5]</sup>。在 Berkhuijsen 等人<sup>[4]</sup>1971 年的工作中, 已明确提到了 4 个此类环结构, 并给出了它们的天球位置和几何结构参数。实际上, 环乃是三维泡结构在视线方向天球切平面上的二维投影, 或者说是泡的观测表象, 而 Loop I 环亦可称为 Loop I 泡或 Loop I 超泡。

20 世纪 80 年代, 人们渐而认识到太阳系亦位于一个星际泡结构之内, 称之为本地超泡或本地泡<sup>[6-8]</sup>。之后, 天体物理学家对包括本地泡在内的银河系泡的实测和理论研究日趋活跃<sup>[9-14]</sup>。进入 21 世纪后, 随着观测工作的深入, 数以百计的银河系泡得以确认<sup>[15-17]</sup>, 甚至有人声称“泡结构比比皆是”<sup>[18]</sup>。鉴于空间红外观测用于星际泡的探测和研究, 这一时期形成了所谓“红外泡”或“(红外) 尘埃泡”的概念<sup>[18-23]</sup>, 有人开始深入探究泡与泡之间、或者泡结构与周边环境之间的相互作用<sup>[24-26]</sup>。

泡的形态各不相同, 具体情况取决于泡的年龄, 所处的环境条件, 是否与其他泡发生过相互作用, 以及这种作用的发生时间等诸多因素。一般来说, 一个孤立的泡迟早终将消失, 这是因为随着泡的不断膨胀, 泡壁最终会碎裂, 而泡周边的低温 ISM 便会涌入泡的空腔, 并使空腔内的高温气体渐而冷却。不过, 由于周边 ISM 注入空腔的速度不大会超过  $10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 这一过程至少需持续  $4 \times 10^6 \text{ a}$ <sup>[1]</sup>。图 1 是一个近乎圆形的星际泡, 其局部泡壁已经出现破裂。如果一个新形成的泡在膨胀过程中与另一个早期形成的“旧泡”相遇、碰撞, 那么它们就有可能合并为一个较大的泡, 或者并不完全并合, 而是形成某种有内壁隔开的双空腔泡结构<sup>[27]</sup>, 一些有复杂结构的所谓“多重泡 (multiple bubble)”很可能就是在此类碰撞多次发生的过程中形成的<sup>[18]</sup>。

银河系泡结构的研究内容颇为丰富, 下文仅就本地泡、H I 壳层、红外泡以及泡的形成机制等方面给以简要的介绍。

## 2 本地泡及其与 Loop I 环的相互作用

1984 年, Innes 和 Hartquist<sup>[6]</sup> 在前人一些工作<sup>[1,28-30]</sup> 的基础上, 讨论了太阳系位于一个“旧超泡”之内的可能性。他们利用背景软 X 射线、极紫外 (EUV) 发射谱和宇宙线观测资

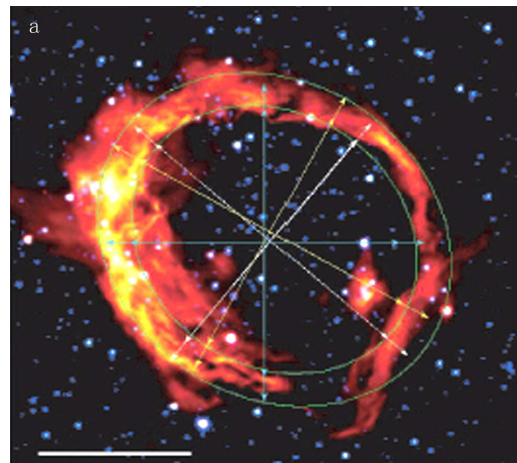


图 1 一个典型的星际泡, 下部泡壁已出现小段破裂; 图中左下方的标度水平线段表示角直径为  $2'$  的尺度大小<sup>[16]</sup>。

料, 并经有关理论计算后推断, 在约  $4 \times 10^6$  a 前, 大约有  $10^{45}$  J 的能量注入了太阳附近的星际介质, 从而形成了一个超泡, 这些能量可能来自若干星团中早型星的星风和超新星爆发。翌年, Morfill 和 Hartquist<sup>[7]</sup> 的工作再次表述了这一观点, 并认为发生在几百万年前的那次能量注入事件应涉及到距太阳约 100 pc 以内的 100 颗左右 OB 型星, 它们在不太长的时段 (约  $2 \times 10^6$  a) 内出现超新星成团性爆发, 而太阳则是在约  $2 \times 10^5$  a 或更早些时间才进入泡结构。他们不太赞成同一时期 Clayton 的结论<sup>[31]</sup>, 后者认为可以用  $10^4 \sim 10^6$  a 前距太阳约 20 pc 以内的一次超新星爆发来解释本地 ISM 中元素的丰度分布。

Cox 和 Reynolds<sup>[8]</sup> 在 1987 年的一篇综述文章中, 明确肯定了本地泡的客观存在——观测到的软 X 射线背景辐射即起源于泡所处的有限区域之内, 并对本地泡的诸方面情况做了详细的讨论, 包括泡的结构、性质和成因, 空腔内低密度高温物质的可能解释, 泡内可能存在的超低密度云块及其对泡演化的影响, 以及本地泡与 Loop I 环的关系 (参见图 2) 等。

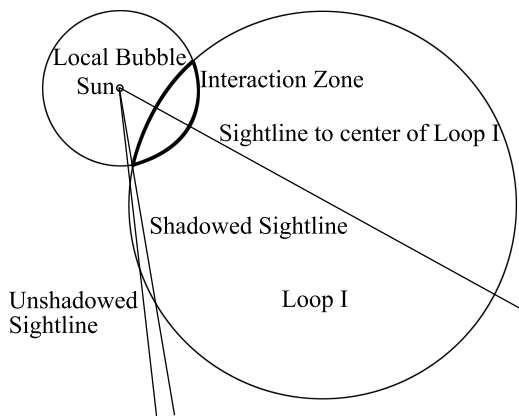


图 2 本地泡与 Loop I 环几何关系的投影示意图粗线所围区域表示致密中性氢环带的截面位置<sup>[27]</sup>。在穿越环带的视线方向上探测不到背景远紫外和软 X 射线辐射或使之大为减弱。

的距离小于其平均半径之和, 故而它们很可能已经发生了相互作用。射电观测发现, 在一个环带区 (最小日心距约为 70 pc) 内中性氢的柱密度从  $N_{\text{H}} \leq 10^{20} \text{ cm}^{-2}$  跳跃式地升高到  $N_{\text{H}} \geq 7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ , 而这可以用两个泡壁间的相互作用来解释。由于两个泡结构壳层间的碰撞, 在它们的交界处就会形成一圈致密的中性氢环带 (即相互作用区, 参见图 2), 它对 0.25 keV 波段的 X 射线辐射是不透明的, 环带以远的该波段辐射会完全被吸收掉, 而这已为观测所证实。在早些时候, Yoshioka 和 Ikeuchi<sup>[27]</sup> 关于膨胀球形激波之间碰撞过程的流体动力学模拟已从理论上对此作了预言, 而无论从定量上还是定性上看, 实测结果都与理论预期相符。

近期, Sallmen 等人<sup>[24]</sup> 利用 FUSE (Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer) 卫星的远紫外观测资料 (主要是波长 103.8 nm 的 O VI 辐射), 对本地泡与 Loop I 环间的相互作用再次作了研究, 所用方法的基本原理与软 X 射线探测相同。他们发现穿越中性氢环带的视线 (称

1994 年, Breitschwerdt 和 Schmutzler<sup>[12]</sup> 通过对软 X 射线背景辐射资料的分析后指出, 本地泡乃是一个旧超泡的遗迹, 后者是在约  $4 \times 10^6$  a 前、由大约 10 颗质量  $M \geq 30M_{\odot}$  的恒星产生, 而这些恒星曾位于一块密度约为  $10^4 \text{ cm}^{-3}$  的致密云块内。本地泡形成时的半径约为 24 pc, 经约  $4 \times 10^6$  a 的扩张, 目前已呈现椭圆形, 拉长方向的尺度达到 300 pc 左右, 空腔内物质的质量约为  $5000 M_{\odot}$ , 但现已看不出有明显膨胀的迹象。

1995 年, Egger 和 Aschenbach<sup>[13]</sup> 通过对 X 射线天文卫星 ROSAT 巡天资料的分析, 首次从观测上 (X 射线观测波段为 0.1 ~ 0.4 keV 和 0.5 ~ 2.0 keV) 证实了本地泡与 Loop I 环之间存在相互作用。鉴于这两个泡结构中心间的

为受遮视线) 方向上以光子计的 O VI 辐射强度为  $(2750 \pm 550) \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ , 而未遮视线方向上则为  $(10800 \pm 1200) \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ , 比前者大得多, 从而证实了高密度物质环带的存在, 并推知本地泡与 Loop I 环之间的相互作用。

在最近十多年中, 人们从实测和理论模型两方面对本地泡的起源、结构、物理性质和演化做了许多工作<sup>[14,32-39]</sup>, 包括 Santos 等人<sup>[40]</sup> 利用光学偏振观测研究本地泡与 Loop I 交界面的结构和物理性质, Reis 等人<sup>[41]</sup> 由多波段测光资料讨论了本地泡和 Loop I 天区的星际红化与尘埃的大尺度分布等。目前对本地泡及相关问题的认识大体上可表述为以下几个方面:

(1) 在太阳所处位置上的局域 ISM 中, 有一个称之为本地空腔 (Local cavity) 的低密度区, 其中的局部区域充满了高温 (约  $10^6 \text{ K}$ )、低数密度 (约  $0.005 \text{ cm}^{-3}$ ) 等离子气体, 此类气体可以在软 X 射线波段探测到。本地空腔的这种热成分称为本地泡<sup>[35]</sup>。不过, 在不少工作中人们通常对泡和空腔这两个概念不作严格区分。

(2) 本地空腔的线尺度在银道面上约为 200 pc 或更大些, 但沿银河系转轴方向的延伸尺度比这更大, 有人甚至认为可能达到约 600 pc<sup>[36]</sup>, 且与银极方向斜交成  $20^\circ$  左右的角<sup>[39]</sup>, 而朝北银极方向的延伸范围要比沿南银极方向远得多。另一方面, 在周向分布上则表现为朝某些方向 (如沿  $l^{\text{II}} = 310^\circ$  方向等) 有手指状外突结构<sup>[35]</sup>。不过鉴于实际结构的复杂性, 以及探测技术、设备灵敏度和分析方法上的差异, 不同作者得出的结果不尽相同。

(3) 本地泡可能起源于距太阳最近的年轻 OB 星协——天蝎-半人马星协中 14~20 颗大质量星的超新星爆发, 这些爆发向周边介质注入的能量足以形成目前所观测到的那么大的本地泡<sup>[38,39]</sup>, 而最近一次超新星爆发事件大约发生在  $5 \times 10^5 \text{ a}$  之前<sup>[37]</sup>。

(4) 近期, Fuchs 等人<sup>[38,39]</sup> 根据太阳附近直径 400 pc 范围内所有 B 型星的日心距和三维空间速度资料, 对它们之前的运动轨线进行反演, 由此估得本地泡的年龄范围为  $(10 \sim 15) \times 10^6 \text{ a}$ , 与前人由其他途径推算出的结果相符, 如 Breitschwerdt 和 de Avezil<sup>[37]</sup> 曾得出本地泡的年龄为  $14.5_{-0.4}^{+0.7} \text{ Ma}$ 。

(5) 本地泡与 Loop I 环的相互作用确实存在。Breitschwerdt 和 de Avezil<sup>[37]</sup> 的模拟工作预言, 从现在起经约  $3 \times 10^6 \text{ a}$  后它们的相互作用使泡壁开始碎裂, 热气体会从 Loop I 环转移到本地泡, 而再经过约  $1.2 \times 10^7 \text{ a}$  (即距今  $1.5 \times 10^7 \text{ a}$ ) 后这两个泡将会并合在一起。

### 3 H I 壳层

除 Loop I 等环结构和本地泡外, 自 20 世纪 70 年代起人们发现了越来越多的银河系泡结构。如 1996 年利用 ROSAT 卫星观测资料证实了一个开放型的近距离泡结构——猎户-波江超泡, 它沿  $b^{\text{II}} = -40^\circ$  方向呈拉长形, 泡壁近、远端的距离约分别为 155 pc 和 410 pc, 并随之进行了多波段观测研究<sup>[42,43]</sup>, 实际上人们注意到这一结构已有十多年的历史<sup>[44-46]</sup>。同年, 由 21 cm 中性氢观测在沃尔夫-拉叶星 WR 149 周围发现了一个具有双泡结构的 H I 泡, 距离约为 6.5 kpc, 双泡的半径均接近 60 pc<sup>[47]</sup>。2001 年, 在著名煤袋暗

星云的远方发现了 2 个 H I 壳层, 它们的距离分别约为 1.2 kpc 和 2.2 kpc, 其线尺度分别为  $280 \times 200$  pc 和  $280 \times 440$  pc<sup>[48]</sup>。在这一时期还发现了其他一些泡结构, 如天蝎-人马泡<sup>[49,50]</sup>和天鹅泡<sup>[51,52]</sup> 等。

除了上述对各别泡的观测研究外, 为了进一步认识银河系中泡结构的总体性质, 如泡在银河系中的分布及其与旋臂的关系等, 人们开始编纂各类泡表。1979 年, Heiles<sup>[53]</sup> 发表了第一份 H I 壳层和超壳层表 (即 H I 泡和超泡表, 不过人们更多地称由中性氢观测所发现的为 H I 壳层, 而不称 H I 泡), 其中给出了 63 个壳层的物理参数, 包括壳层中心的银道坐标, 相对 LSR 的运动速度、角大小、银心距和日心距、线半径、壳层形成前周边介质的数密度、质量、膨胀速度, 以及因爆发式事件形成壳层所需的能量  $E$  等, 而  $E > 3 \times 10^{45}$  J 的壳层又称为超壳层; 对于其中 17 个处于膨胀中的壳层还给出了膨胀线速度和膨胀动能。表列壳层大体上都接近圆形, 只是沿银道面方向上稍显拉长些。5 年后 Heiles<sup>[54]</sup> 发表了第二份壳层表, 给出了另外 42 个 H I 壳层的有关物理参数。1996 年 Ehlerová 和 Palouš<sup>[55]</sup> 曾利用 Heiles 的第一份表资料<sup>[51]</sup> 进行了一项统计研究, 结果发现样本壳层形成率在银盘内的径向分布与恒星分布很接近, 这说明银河系内大部分所观测到的壳层应该与恒星形成, 而不是与高速云 (high velocity cloud, HVC) 的内落有关。

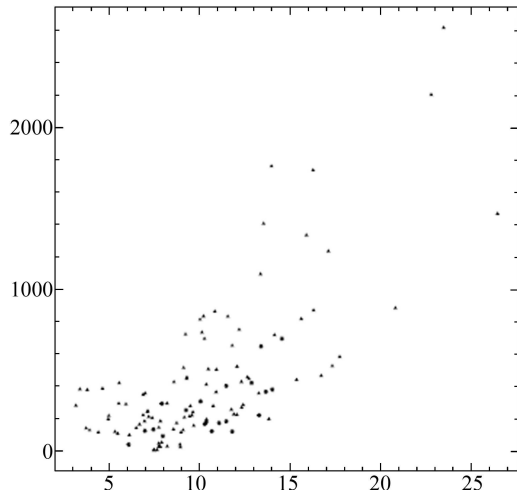


图 3 银河系 H I 壳层的线尺度 (纵坐标, 单位 pc) 随银心距 (横坐标, 单位 kpc) 的径向分布情况<sup>[54]</sup>。

2002 年, McClure-Griffiths 等人<sup>[56]</sup> 在南银道面巡天 (Southern Galactic Plane Survey, SGPS) 资料中发现了 19 个新的 H I 壳层, 它们的角直径均大于  $1^\circ$ , 而线尺度的范围为  $40 \sim 1000$  pc。他们利用这些新发现的样本和 Heiles<sup>[53,54]</sup> 的样本, 讨论了 H I 壳层的空间分布, 结果发现壳层的线尺度有随银心距的增大而增大的趋势 (参见图 3), 与河外星系中 H I 壳层线尺度的径向分布趋势相一致<sup>[57-59]</sup>。通常认为造成这一现象的原因是 H I 盘的标高随银心距而增大, 只要壳层尺度小于 H I 盘的标高, 壳层可以在三维方向上膨胀, 所以它们的尺度便与 H I 盘的标高密切相关。

2005 年, Ehlerová 和 Palouš<sup>[60]</sup> 由 Leiden-Dwingeloo 的 H I 巡天资料 LDS, 发现了 600 多个 H I 壳层。他们用其中位于银经第二象限中

276 个 H I 壳层的完备样本, 经统计分析后发现以下主要结果:

(1) 样本壳层在银河系中的径向分布大体上服从指数律  $D \propto \exp[-(R/\beta)]$ , 这里  $D$  为 H I 壳层的面数密度,  $R$  为银心距。观测样本的标长  $\beta \approx 3$  kpc, 与银河系恒星盘的标长差不多, 这也许可算是壳层形成与恒星活动有关的一项佐证。另一方面, 样本中约有半数壳层的银面距  $z_{\text{HI}}$  小于 500 pc, 且随着银心距  $R$  的增大  $z_{\text{HI}}$  值也随之有少量的增大, 如在  $R = 12 \sim 14$  kpc 范围内有  $z_{\text{HI}} = 590$  pc。

(2) 在年龄分布上, 所有样本壳层的年龄均大于  $1 \times 10^6$  a, 且仅有少数壳层的年龄大于  $5 \times 10^7$  a. 对此的解释是更年轻的壳层尺度太小, 而老年壳层则在旋臂等的外力作用下已严重(甚至彻底)破碎, 它们都很难探测到。

(3) 壳层线半径遵循幂律分布  $N(r) \propto r^{-\alpha}$ , 幂指数  $\alpha = 2.1 \pm 0.4$ , 不过线半径较小的壳层其幂指数也比较小, 即分布更显得平坦些。线半径小于 50 pc 左右的较小的壳层应该是一些风成泡 (wind-blown bubble), 或者是一次超新星爆发后的遗迹, 它们的膨胀速度约为  $10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  或更小些。大尺度超壳层的线半径可大于 100 pc, 它们是星协中若干个大质量 OB 型星的产物, 膨胀速度大于  $10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。尽管如此, 壳层线半径与膨胀速度间的关系并不很确定。

(4) H I 壳层的能量  $E$  可按下列 Chevalier 公式<sup>[61]</sup> 计算:

$$E = 5.3 \times 10^{36} n^{1.12} r^{3.12} v_{\text{exp}}^{1.4}, \quad (1)$$

式中  $E$  以焦耳为单位,  $n$  是壳层周边介质每立方厘米的数密度, 线半径  $r$  以秒差距为单位, 而膨胀速度  $v_{\text{exp}}$  以千米每秒为单位。如记一次超新星爆发的能量为  $E_{\text{SN}}$  (典型值是  $10^{44}$  J), 则许多壳层的能量  $E < 0.1 E_{\text{SN}}$ , 对大多数这类低能量结构有  $r < 100$  pc, 它们很可能是一些风成泡, 而并非产生于超新星爆发。不过, 许多大尺度壳层的能量未必最高, 原因在于其周边介质的数密度往往要比小壳层的周边介质明显来得低。

(5) 一个星系内, 全体 H I 壳层所占的观测面积 (或体积) 与该星系的观测总面积 (或体积) 之比, 称为星系中壳层的二维 (或三维) 填充因子 (filling factor), 它们对于研究星际介质的演化具有重要意义。计算表明, Ehlerová 和 Palouš<sup>[58]</sup> 样本壳层的二维填充因子为  $f_{2D} \approx 0.4$ , 而三维填充因子为  $f_{3D} \approx 0.05$ 。

应该指出的是, 鉴于所用的 H I 壳层观测样本仅限于银经第二象限等因素, 上述结果显然是初步的, 需要取得更大、更完备的样本 (如在 2007 年 Ehlerová 已试图将 HI 壳层的搜寻工作扩展到银经第三象限, 但至今尚未有结果发表, 可参见 <http://adsabs.harvard.edu/>), 以能对 H I 壳层的各方面性质做更为深入的探究。

Ehlerová 和 Palouš<sup>[60]</sup> 及之前的一些工作主要涉及尺度相对较大的 H I 壳层。2007 年, Daigle 和 Joncas<sup>[62]</sup> 利用人工神经网络 (ANNs) 模型, 经自动搜索在英仙臂内发现了 7100 个小尺度 ( $< 40$  pc) 的 H I 壳层候选天体。尽管他们主要在于说明方法的可行性, 但也得出了一些有趣的结果, 如这些候选天体的空间分布与银河系盘族恒星的分布相一致, 但充其量只有其中的 23% 与前身恒星成协等。

除上述大样本统计分析外, 近期人们对各别 H I 壳层也进行了研究<sup>[63-65]</sup>, 其目的除了深入认识 H I 壳层的结构和物理性质外, 更在于进而探究 H I 壳层与触发恒星形成之间可能存在的关系。

## 4 红外尘埃泡

星际介质由星际气体和星际尘埃组成。Boulanger 和 Perault<sup>[66]</sup> 的工作表明, 星际尘埃

含量与 H I 含量密切相关, 由此推知物质密度较高的 H I 壳层 (即泡壁) 中星际尘埃的密度也比较高。因此, 可以借助红外观测来探测星际介质的泡结构, 通过这条途径发现的泡便称为红外泡或 (红外) 尘埃泡。

#### 4.1 中红外观测

红外泡最早引起人们的注意缘自 ISO (Infrared Space Observatory)<sup>[67]</sup> 和 MSX (Midcourse Space Experiment)<sup>[68-70]</sup> 取得的红外观测资料。2006 年, Churchwell 等人<sup>[16]</sup> 从 Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordiante (Spitzer 的科学项目之一) 的红外巡天资料 (GLIMPSE I, 观测波段 3.6~8.0  $\mu\text{m}$ ), 在 ( $|l| = 10^\circ \sim 65^\circ, |b| \leq 1^\circ$ ) 天区内发现了 322 个部分闭合或全闭合的圈形结构 (以下简称 G I 样本), 它们也就是部分或全闭合三维尘埃泡在天球上的投影, 平均面数密度约为 1.5/平方度, 涉及的观测天区总面积为 220 平方度。翌年, Churchwell 等人<sup>[17]</sup> 从 GLIMPSE II 观测资料在银心附近  $10^\circ$  范围内又搜索到 269 个中红外泡 (以下简称 G II 样本), 面数密度高达约 5/平方度, 观测天区总面积为 54 平方度。与 MSX 相比, Spitzer 的空间分辨率提高了约 10 倍, 灵敏度提高了约 100 倍, 因而可探测到更小、更暗的泡结构。Churchwell 等人在上述两份样本中给出了每个泡的银道坐标 ( $l^{\text{II}}, b^{\text{II}}$ )、泡壁内外边缘的视半长轴 ( $a_1, a_2$ ) 和视半短轴 ( $b_1, b_2$ )、偏心率  $e$ 、平均角半径  $\bar{r}$  和泡壁的平均角厚度  $\bar{T}$ , 其中  $\bar{r}$  和  $\bar{T}$  按下式计算:

$$\bar{r} = \frac{(a_2 b_2)^{0.5} + (a_1 b_1)^{0.5}}{2}, \quad \bar{T} = (a_2 b_2)^{0.5} - (a_1 b_1)^{0.5} \quad (2)$$

两份泡表都对这近 600 个泡作了形态分类, 以注明泡壁是否完整, 泡内可能有一个星团, 多重泡 (泡内或泡边缘有一个或数个较小的次级泡), 泡结构内可能存在一个或数个初期恒星体 (YSO), 但尚未形成次级泡, 泡壁相互接触的双泡或三泡结构, 以及看上去泡内可能存在驱使泡形成的一个或数个中心星, 等等。此外, 两份表中的泡都按北区 (银经第一象限) 和南区 (银经第四象限) 分别列出。

Churchwell 等人<sup>[16,17]</sup> 在发表 G I 和 G II 两份表的同时, 对表列样本进行了多方面的统计研究, 如泡的空间分布, 泡的角大小、偏心率和泡壁厚度的分布, 不同形态泡的统计性质等, 并得出以下主要结果:

(1) 在  $|\Delta l| \leq 10^\circ$  范围内 G II 样本泡对银心方向呈对称分布, 但数密度随角距离  $|\Delta l|$  的增大而增大, 从  $|\Delta l| = 2^\circ$  到  $|\Delta l| = 10^\circ$  约增大 1 倍, 如综合考虑 G I 样本则这一趋势大致可保持到  $|\Delta l| = 13^\circ$  范。除了诸如弥漫背景亮度随  $|\Delta l|$  的增大而减小等因素外, 这一变化趋势有可能反映了大质量星的面数密度确实随着  $|\Delta l|$  的增大而增大。Benjamin 等人<sup>[71]</sup> 2005 年的工作表明了存在这一变化趋势的可能性, 且可以持续到  $|\Delta l| \approx 30^\circ$ , 不过 G I 样本未能对此提供确凿的观测证据。

(2) G II 样本泡的观测银纬分布可以很好地用两个高斯分布来拟合, 其中窄成分标高为  $0.23^\circ \pm 0.04^\circ$ , 宽成分标高为  $0.82^\circ \pm 0.01^\circ$ , 而峰值银纬均为  $-0.06^\circ \pm 0.02^\circ$  (参见图 4)。窄成分泡可能反映了日心距范围内 O 型和最早型 B 型星的分布, 它们的银面距标高为 20 ~ 32 pc, 这与  $|\Delta l| < 50^\circ$  的小射电源的标高相近, 而后者可能是一些因极端星族 I 恒星电离而形成的致密 H II 区<sup>[72]</sup>。宽成分所对应的星族之银面距标高为 72 ~ 114 pc, 它们可能

是一些老年极端星族 I 恒星, 或者更像是旋臂中的超巨星和造父变星。G I 和 G II 两个样本中泡的峰值银纬均为很小的负值, 这可以用太阳位于银河系中面之北约 10 pc 来加以解释。

(3) G I 和 G II 样本中泡的平均角直径分布近乎相同, 主要差异是 G I 表中角直径  $> 1'$  的泡要比 G II 表来得多。前者平均角直径约为  $4'$ , 少数泡的尺度特别大, 最大的可接近  $30'$ ; 而后的平均角直径在  $2'$  左右, 最大的也不到  $15'$ , 加之表 G II 对小尺度泡的搜索更为彻底, 因而 G II 泡的平均面数密度要比表 G I 泡大两倍多。正因为 G II 表多为小泡, 两份样本中全部泡的天区面积之和在观测天区总面积中所占的比例都约为 0.9%。

(4) 泡壁平均角厚度  $\bar{T}$  与泡平均角半径  $\bar{r}$  之比  $\eta = \bar{T}/\bar{r}$  是描述泡结构的一个重要参数。G I 和 G II 泡样本中  $\eta$  的频数分布之峰值都处于  $\eta_0 = 0.25 \sim 0.30$  的范围内 (其中 G I 泡分布的宽度较窄), 但并不呈对称分布,  $\eta > \eta_0$  一侧泡的频数减小得较为平缓 (可参见文献 [17] 之图 6), 或者说对相当一部分泡会有  $\eta > \eta_0$ , 而这与泡的星风演化模型中  $\eta$  应逼近约 0.32 不相符 [73-75]。对此, Churchwell 等人 [17] 给出的解释是,  $5.8 \mu\text{m}$  和  $8.0 \mu\text{m}$  波段的红外光度主要来自 PAH (多环芳香烃) 发射, 其分布范围可能比受星风压缩的气体壳层更大。

(5) G I 和 G II 样本泡壁偏心率  $e$  的峰值分别约为 0.65 和 0.70, 差异并不显著; 其中对  $e \leq 0.5$  的泡, 两者的频数分布是类似的, 但当  $e > 0.5$  时 G I 泡的频数较之 G II 泡更陡地升至峰值, 进而又更快地远离峰值 (可参见文献 [17] 之图 9)。在星风演化模型中星风的强度很可能不是各向同性的, 而泡周边的 ISM 往往并非均匀分布, 后者使泡在膨胀过程中不同方向上受到的阻力会有所不同; 这两方面原因使泡的外形更接近椭圆形而不是圆形, 并使其中一些泡具有很大的扁度, 甚至导致局部泡壁发生破裂。在 G II 样本中, 有 53% 的泡是破裂的, 69% 的泡有  $e > 0.5$ 。统计分析表明, 无论扁形泡的长轴取向, 还是泡壁的破裂方向, 相对银道面而言均呈随机分布, 不存在任何偏优方向。这一结论说明, 决定泡结构形态的主要因素是 ISM 的局域密度结构, 并不是 ISM 密度随银面距增大而减小的大尺度变化趋势。鉴于 G I 样本同样表现出有相当高比例的破裂泡和很扁的泡, 这就意味着银道面附近 ISM 的分布是很不均匀的, 驱动泡结构演化的星风和辐射压强度也并非各向同性。

尽管 Churchwell 等人 [16,17] 对样本中少部分与 H II 区相重叠的泡的运动学距离作了估算 (其中用到了银河系自转模型), 并在此基础上讨论了泡的线尺度 (包括半径和泡壁厚度) 的统计性质, 不过由于日心距测定值的不确定性太大, 所得到的一些结果并无明确的物理意义。

近年来, 星际泡中红外波段的观测研究仍呈方兴未艾之态势, 包括泡样本研究和单个

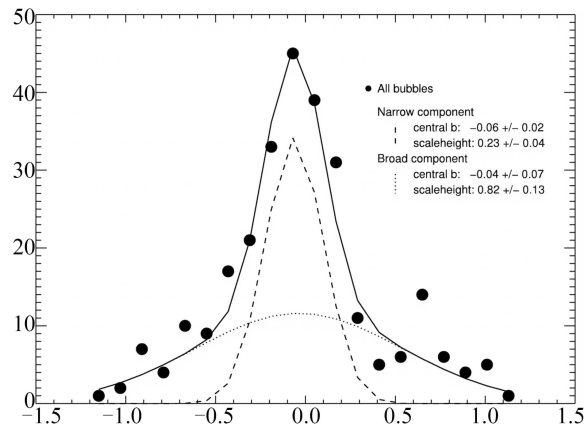


图 4 红外泡的银纬分布, 横坐标为银纬, 纵坐标为 G II 样本中泡的个数 [17]。



泡研究。如 Deharveng 等人<sup>[76]</sup> 讨论了部分 Churchwell 2006 年泡样本与 HII 区的关系以及触发周边大质量恒星形成的作用, Beaumont 和 Williams<sup>[26]</sup> 利用分子谱线与红外泡的对应观测研究了泡对分子云及恒星形成的影响, Watson 等人<sup>[77]</sup> 由中红外泡的周围环境来分析恒星形成触发机制, Petriella 等人<sup>[25]</sup> 讨论了尘埃泡 N65 的周围环境, 以及其他的一些工作<sup>[19-21,78]</sup>。

#### 4.2 远红外观测

1984 年, Low 等人<sup>[79]</sup> 已注意到了弥漫 ISM 在远红外图像上所呈现的某种结构, 称之为银河系红外卷云。嗣后, 有关星际远红外环的发现渐而增多。例如, 1987 年 Schwartz<sup>[80]</sup> 由 IRAS 的 60  $\mu\text{m}$  和 100  $\mu\text{m}$  观测, 发现了银道面附近的 16 个远红外环, 并给出了它们的位置和角直径等参数。1996 年, Marston<sup>[81]</sup> 利用 IRAS Skyflux 图像资料 (中心波长为 12、25、60 和 100  $\mu\text{m}$ ), 在 van der Hucht 等人<sup>[82]</sup> 提供的 156 个 WR 星周围发现了 49 个角直径  $> 20'$  的可能环结构, 他们认为这类环结构很可能就是因前身 O 型星的物质抛射所产生的风成泡。

上述工作仅涉及低银纬区的远红外环结构, 所有的环均有  $|b| \leq 10^\circ$ , 对绝大部分环有  $|b| < 5^\circ$ 。为取得更为完备的观测样本, 2004 年 Kiss 等人<sup>[83]</sup> 利用 IRAS 的远红外观测资料, 对银经第二象限天区, 即 ( $90^\circ \leq l \leq 180^\circ, |b| \leq 90^\circ$ ) 范围内可能存在的环结构进行了巡天式搜索, 共发现 145 个远红外环。Kiss 等人<sup>[83]</sup> 除给出环中心的银道坐标、环拟合椭圆的半长轴、半短轴和位置角, 以及环壁内外边缘的长轴等参数外, 还根据这一样本做了若干统计分析和讨论, 如环的天球分布、大小分布、环壁的宽度分布、环拟合椭圆的轴比分布、颜色分布等。

2007 年, Könyves 等人<sup>[84]</sup> 把上述 Kiss 等人的工作扩展到全天区, 在其他 3 个象限又发现了 317 个环, 从而形成了样本容量为 462 的“银河系远红外环表”, 表中给出环中心的银道坐标、环的大小和拟合椭圆的位置角, 以及用以描述远红外环图像之观测特征的其他一些参数 (参见图 5)。他们对样本做了较为详细的统计分析, 并得出下列主要结果:

(1) 环的分布与 ISM 的分布有关, 因此它们的银经分布应该在一定程度上反映了银河系的旋涡结构, 而环的计数结果证实了这一点——在朝向几条主旋臂 (如本地旋臂等) 的方向上环的数目显著增多。另一方面, 环的银面距分布应该如 ISM 那样按指数律衰减; 然而, 在高银纬处环的数目明显要比理论预期结果来得多, 且无法用投影效应或距离不确定性来加以解释。这一观测事实也许说明了除大质量星的超新星爆发和星风外, 环可能还有其他的有效形成机制。

(2) 环在天球上的视分布表现出某种更大尺度的结构, 如在一些区域呈链式结构, 其中有的与 H I 碎片弧相一致, 有些则与分子云复合体 (如大熊分子云等) 重合, 可见其间很可能有内在的联系。

(3) 如以  $l = 70^\circ \sim 250^\circ$  为界 (大致沿本地旋臂方向) 把全天分为内区和外区两部分, 那么外区中环的数目几乎是内区的两倍, 且低银纬内区环的角直径略小于低银纬外区的环, 分别为  $4^\circ.1$  和  $5^\circ.2$  (高银纬区域并无此差异)。对这一观测现象的可能解释有二: 其一, 在低银纬内区因红外背景很强, 大尺度环有可能漏失; 其二, 由于超新星爆发和强星风作用这类剧

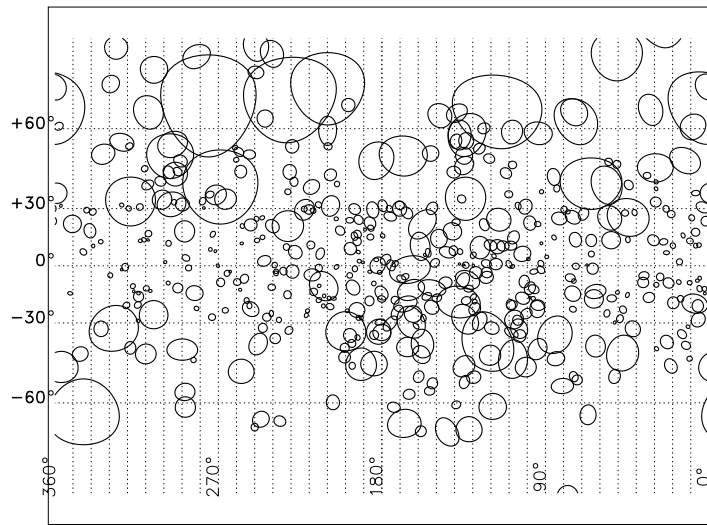


图 5 远红外环在天球上的分布<sup>[84]</sup>

变事件的频繁发生,使得早期形成的大环已完全毁坏。不过,现有的观测资料尚未能对这两种可能性做出判定。

(4) 在全部 462 个环中已取得距离估值的有 73 个,它们都位于低银纬区。对这一子样本的统计分析表明,内区的许多环密集在太阳附近日心距不超过 0.2 kpc 左右的小区域内,而其余的则在  $0.4 \leq R \leq 4$  kpc 范围内呈随机分布,并没有集聚在任何特定的距离上。鉴于该子样本的容量并不很大,分布又不均匀(有 30 个环集中在银经第二象限,占 41%),且更多的环没有取得有关它们距离的信息,特别是高银纬区的环,因而涉及线尺度方面的讨论显然是不充分的。

## 5 形成机制和后续效应

### 5.1 星际泡的形成机制

从历史上看,在 Brown 等人<sup>[3]</sup>首次明确提出“北极支”的概念之前,Blythe<sup>[85]</sup>于 1957 年已在 38 MHz 射电频段上观测到了这一枝条状结构存在的迹象(后人把此类由射电观测发现的结构称为“射电支”)。翌年,Tunmer<sup>[86]</sup>即试图从理论上对其起源做出解释。她认为这一结构起因于相对论性电子绕着星际磁场的旋进式运动所产生的定向发射,而磁场的取向则与本地旋臂的走向相一致。两年后,Brown 等人<sup>[3]</sup>指出,这一机制所预期的射电支几何形态与实测结果不符,从而有力地否定了 Tunmer 的理论模型。Brown 等人<sup>[3]</sup>同时还提出了两种可能的替代机制:射电支的观测表象缘自本地旋臂结构的不规则性或超新星遗迹,并认为后者的可能性更大,但对之并未作详细的讨论。

1974 年 Cox 和 Smith<sup>[1]</sup>明确指出,星际泡可能是 SNR 演化的产物。他们认为,超新星爆发后随着 SNR 的膨胀并向周边低密度(数密度约为  $1 \text{ cm}^{-3}$ )的均匀星际介质扩展,在约

$10^4$  a 时段内, 大约有三分之一的爆发能量 (其初始值约为  $4 \times 10^{43}$  J) 会以硬紫外线和软 X 射线形式向外辐射掉。这一过程所生成的星际泡由外边缘薄壳层和内部空腔两种物质成分构成, 此时壳层半径约为 20 pc, 物质密度较高但温度很低 ( $< 10^3$  K), 而空腔内的物质密度很低 (约  $0.1 \text{ cm}^{-3}$ ), 但由于 SNR 早期高速膨胀的加热作用, 温度却可高达约  $10^6 \sim 10^8$  K。不久, Castor 等人 [2] 指出, 大质量早型星 (光谱型早于 B2 型) 的星风非常强烈, 其端速度可高达  $1500 \sim 3000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 质量损失率接近  $10^{-6} M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$ , 一生中可向周围星际介质注入约  $10^{43}$  J 的机械能, 这一过程同样可以在星际介质中生成泡结构, 其典型半径为 30 pc。

上述工作之后, 超新星爆发和大质量早型星的星风被人们深入研究并广泛用于解释银河系泡的起源和各类观测性质, 成为泡结构形成机制的主流观点。1979 年, McCray 和 Snow [87] 注意到, 一个 OB 星协中多颗恒星的星风和多次超新星爆发, 可以在盘气体中生成一个很大的膨胀壳层 (半径有可能达到 100 pc 或更大), 而这一重要观念很快为一些人所接受 [88,89], 且用以解释 H I 壳层和红外尘埃泡的起源 [20,21,53], 其中包括研究得最多的本地泡——它很可能就是在 10 多次超新星爆发事件的共同作用下所形成的结构 [37-39]。

除上述“剧变机制”外, Tenorio-Tagle [90] 于 1980 年提出了泡结构形成的高速云 (HVC) 内落机制。他通过计算表明, 一块小尺度中性云 (面密度约为  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ) 在与等密度银盘介质发生碰撞的过程中, 大量的能量会在一个小区内积聚, 其结果是高温 ( $10^6 \sim 10^7$  K) 气体以超声速膨胀, 在银盘介质中形成大尺度低密度空腔, 并随之远离银道面。不过, 有人对之颇有质疑, 例如 1996 年 Ehlerová 和 Palouš [55] 通过对 61 个 H I 壳层的研究后指出, 大多数此类壳层不可能由 HVC 的内落过程形成。另一方面, Kiss 等人 [83] 在谈及泡结构的形成机制时认为, 北天极环 [91] 可算缘自 HVC 与银盘相互作用的一个典型例子。这一形成机制看来并不具有普适性, 也许可用来解释少数星际泡的起源 [60]。

1981 年, Larson [92] 率先从理论上讨论了分子云内超声速湍流与恒星形成的关系。2004 年, MacLow 和 Klessen [93] 明确提出超声速湍流对控制恒星形成可能起着重要的作用。2007 年 Könyves 等人 [84] 指出, 如果上述思想正确的话, 那么超声速湍流也可能影响到 ISM 的结构, 包括生成星际云和星际泡空腔, 而且泡的表观形态与剧变事件所形成的结构是类似的。据此他们认为, 低、高银纬处远红外泡在实际大小分布上的差异, 可以用不同的物理过程来解释——低银纬泡起源于剧变事件, 而高银纬泡则缘自超声速湍流。

20 世纪末, 另一类剧变机制被用来解释泡的形成 (特别是大尺度泡), 这就是伽马暴 (GRB) 的爆发 [94,95]。这一机制认为, 一次 GRB 爆发可以把约  $10^{46}$  J 甚至更高的能量注入其周边 ISM, 从而形成 1 kpc 尺度的超泡。直到 20 世纪末, 人们还认为泡的 GRB 爆发形成机制尚未从观测上得以确证 [60,96], 也没有用于银河系内的泡结构。不过, 近期 Su 等人 [97] 利用 Feimi 伽马射线空间望远镜等资料所做的一项研究证实, 在银河系中心两侧存在 2 个大尺度伽马射线泡, 且与 WMAP 的微波背景观测以及 ROSAT 的软 X 射线观测有着很好的空间对应性。这一工作很快引起人们对伽马射线泡形成机制等问题的广泛讨论 [98-100]。看来, 至少对少数具体的银河系星际泡来说, 伽马射线爆发不失为一种可能的形成机制, 或可归入上述“剧变机制”之列。

总的来看, 鉴于具体情况的复杂性, 不同星际泡很可能有着不同的形成机制, 单一机制

难以对各类泡结构的多种观测性质做出合理的解释。

## 5.2 泡结构触发传播式恒星形成

早在 1953 年, Öpik<sup>[101]</sup> 就已大致描述了超新星爆发事件如何引起恒星的传播式形成 (propagating star formation): 超新星在爆发后, 它的膨胀壳层会向外推进, 从而使周围的星际气体受到压缩, 同时壳层因吸积周边气体质量不断增大, 膨胀速度则随之减小。当速度减小到几千米每秒时, 壳层的总质量可望达到几千倍太阳质量, 一批恒星便可能由此而诞生。从膨胀壳层生成的这些恒星会继续向外运动, 相互间的距离不断增大, 恒星之间的引力渐而减小, 最终会形成一个由年轻恒星构成的星协。这种因一颗恒星的死亡导致大量新恒星诞生的过程便称为传播式恒星形成, 又称自传播式恒星形成 (self-propagating star formation), 或后续恒星形成 (sequential star formation)。

1977 年 Elmegreen 和 Lada<sup>[102]</sup> 就上述机制构筑了详细的物理模型, 并成功地用于 OB 星协中各次群结构的结联式形成, 包括合理解释了一个给定星协中不同 OB 型星次群的不同空间分布和系统性年龄差异, 各个次群在质量上表现出的规律性, 它们相对银道面的取向及其膨胀特性等。

McCray 和 Kafatos<sup>[89]</sup> 在 1987 年的一项工作中指出, OB 星协中多颗恒星的星风和超新星反复爆发可以生成半径大于 100 pc 的膨胀超壳层。经几千万年后这个超壳层便处于引力不稳定态, 进而能形成多个巨分子云, 而这些巨分子云就是新恒星的诞生地。他们认为超壳层的引力不稳定性为诱发次级恒星形成提供了一种合理的物理机制, 且可以触发一批二代恒星的暴发式形成。同年, Schwartz<sup>[80]</sup> 通过对 IRAS 红外图像的分析后发现, 红外环结构既表现有展源发射, 也有离散发射 (每个环至少含有 3 个离散辐射源), 前者来自星际壳层中的尘埃成分, 后者则是新近形成的早型星, 从而充分说明在星际泡的泡壁附近已有次级恒星形成, 所经历的时间尺度为  $10^6 \sim 10^7$  a。Schwartz 还认为, 太阳邻域内的相当一部分早型星正是在环结构内形成的。

1994 年 Whitworth 等人<sup>[74]</sup> 的理论工作表明, 膨胀壳层的碎裂应该偏重于产生大质量的恒星。如果情况确实如此的话, 那么鉴于能产生足够多的 O 型星来触发下一代恒星的形成, 对自传播恒星形成模型无疑是强有力的支持<sup>[103]</sup>。不过, 后来 Wünsch 和 Palous<sup>[104]</sup> 更详细的研究指出, 壳层碎裂所形成的恒星应该具有幂律质量函数。尽管理论研究的结论颇有分歧, 但近期的一些观测确实表明, 在许多泡的周边区域普遍存在年轻的恒星, 而且它们往往是一些大质量星<sup>[101-103]</sup>。最近, Dale 等人<sup>[103]</sup> 借助流体动力学模拟方法探讨了膨胀壳层的碎裂问题, 在引入某种吸积机制后发现可以形成足够多的大质量恒星。不过他们同时又指出, 就目前来看, 要想通过实测来验证恒星或星团的质量函数是极其困难的。

既然泡壁附近会因引力坍缩而触发早型星的形成, 那么这些次级早型星能否因同样的机制 (如超新星爆发和星风) 进而形成次级泡呢? 回答应该是肯定的, 至少是有可能的。对此, Churchwell 等人<sup>[16,17]</sup> 就中红外泡的情况进行了讨论。他们发现在 G II 样本中至少 18% 泡的形态表现有恒星的触发形成, 其中只有 6 个泡在泡壁投影位置附近至少有一个次级泡, 而在 43 个泡的泡壁投影位置附近发现可能有初期恒星体, 但没有发现次级泡。1:7 的比例说

明,大部分泡并未观测到次级泡,不过这也许只是因为这类泡还非常年轻,没有足够的时间使之演化到能显露真身;或者因形成不久而尺度很小,以目前的观测技术尚难以探测到。有意思的是,Churchwell 等人<sup>[17]</sup>把恒星触发形成的机制归于膨胀壳层侵入原本就存在的密度不规则性,而不是缘自壳层的碎裂。

## 6 结 语

近年来的观测充分表明,作为星际介质的一种特征结构,银河系内不同尺度的星际泡可谓比比皆是、无处不在,它们的形成和演化乃是银河系结构和演化的重要组成部分,涉及到恒星的形成和演化,以及星际介质的结构和化学演化等重要课题,因而受到广泛关注。鉴于相关内容颇为丰富,本文只能就其若干主要方面给以简要评述。事实上,不仅银河系,在一些河外星系中也已观测到了为数众多的星际泡结构<sup>[53]</sup>,限于篇幅笔者拟择时另文予以介绍。

### 参考文献:

- [1] Cox D P, Smith B W. *ApJ*, 1974, 189: L105
- [2] Castor J, McCray R, Weaver R. *ApJ*, 1975, 200: L107
- [3] Brown R H, Davies R D, Hazard C. *Observatory*, 1960, 80: 191
- [4] Berkhuijsen E M, Haslam C G T, Salter C J. *A&A*, 1971, 14: 252
- [5] Quigley M J S, Haslam C G T. *Nature*, 1965, 208: 741
- [6] Innes D E, Hartquist T W. *MNRAS*, 1984, 209: 7
- [7] Morfill G E, Hartquist T W. *ApJ*, 1985, 297: 194
- [8] Cox D P, Reynilds R J. *ARA&A*, 1987, 25: 303
- [9] Snowden S L, Cox D P, McCammon D, et al. *ApJ*, 1990, 354: 211
- [10] Slavin J D, Cox D P. *ApJ*, 1993, 417: 187
- [11] Hartquist T W. *ApSS*, 1994, 216: 185
- [12] Breitschwerdt D, Schmutzler T. *Nature*, 1994, 371: 774
- [13] Egger R J, Aschenbach B. *A&A*, 1995, 294: L25
- [14] Breitschwerdt D. *SSRv*, 1996, 78: 173
- [15] Quillen A C, Bland-Hawthorn J, Brookes M H, et al. *ApJ*, 2006, 641: L29
- [16] Churchwell E, Povich M S, Allen D, et al. *ApJ*, 2006, 649: 759
- [17] Churchwell E, Watson D F, Povich M S, et al. *ApJ*, 2007, 670: 428
- [18] Churchwell E. *ASPC*, 2008, 388: 309
- [19] Churchwell E. *ASPC*, 2008, 390: 63
- [20] Watson C, Povich M S, Churchwell E B, et al. *ApJ*, 2008, 681: 1341
- [21] Watson C, Corn T, Churchwell E B, et al. *ApJ*, 2009, 694: 546
- [22] Pavel M, Pinnick A, Carveth C, et al. *Proceedings of The Fourth Spitzer Science Center Conference*, 2009: E51
- [23] Everett J E, Churchwell E. *ApJ*, 2010, 713: 592
- [24] Sallmen S M, Korpela E J, Yamashita H. *ApJ*, 2008, 681: 1310
- [25] Petriella A, Paron S, Giacani E. *A&A*, 2010, 513: 44
- [26] Beaumont C N, Williams J P. *ApJ*, 2010, 709: 791

- 
- [27] Yoshioka S, Ikeuchi S. *ApJ*, 1990, 360: 352
- [28] McKee C F, Ostriker J P. *ApJ*, 1977, 218: 148
- [29] Rosner R, Avni Y, Bookbinder J, et al. *ApJ*, 1981, 249: 15
- [30] Cox D P, Anderson P R. *ApJ*, 1982, 253: 268
- [31] Clayton D D. *ApJ*, 1984, 280: 144
- [32] Breitschwerdt D, Egger R, Freyberg M J. *SSRv*, 1996, 1996, 78: 183
- [33] Sfeir D M, Lallement R, Crifo F, et al. *A&A*, 1999, 346: 785
- [34] Breitschwerdt D, Freyberg M J, Egger R. *A&A*, 2000, 361: 303
- [35] Maíz-Apellániz J. *ApJ*, 2001, 560: L83
- [36] Lallement R, Weish B Y, Vergely J L, et al. *A&A*, 2003, 411: 447
- [37] Breitschwerdt D, de Avillez M A. *A&A*, 2006, 452: L1
- [38] Fuchs B, Breitschwerdt D, de Avillez M A, et al. *MNRAS*, 2006, 373: 933
- [39] Fuchs B, Breitschwerdt D, de Avillez M A, et al. *SSRv*, 2009, 143: 437
- [40] Santos F P, Corradi W, Reis W. *ApJ*, 2011, 728: 104
- [41] Reis W, Corradi W, de Avillez M A, et al. *ApJ*, 2011, 743: 8
- [42] Burrows D N, Guo Z. *MPE Report*, 1996, 263: 221
- [43] Guo Z, Burrows D N. *BAAS*, 1996, 28: 834
- [44] Reynolds R J, Ogden P M. *ApJ*, 1979, 229: 942
- [45] Guo Z, Burrows D N, Sanders W T, et al. *ApJ*, 1995, 453: 256
- [46] Brown A G A, Hartmann D, Burton W B. *A&A*, 1995, 300: 903
- [47] Cappa C E, Niemela V S, Herbstmeier U, et al. *A&A*, 1996, 312: 283
- [48] McClure-Griffiths N M, Dickey J N, Gaensler B M, et al. *ApJ*, 2001, 562: 424
- [49] Weaver R. *IAUS*, 1979, 84: 295
- [50] Egger R. *IAUC*, 1998, 166: 287
- [51] Cash W, Garmire G, Riegler G. *ApJ*, 1980, 238: L71
- [52] Uyamker B, Fürst E, Reich W, et al. *A&A*, 2001, 371: 675
- [53] Heiles C. *ApJ*, 1979, 229: 533
- [54] Heiles C. *ApJS*, 1984, 55: 585
- [55] Ehlerová S, Palouš J. *A&A*, 1996, 313: 478
- [56] McClure-Griffiths N M, Dickey J N, Gaensler B M, et al. *ApJ*, 2002, 578: 176
- [57] Deul E R, den Hartog R H. *A&A*, 1990, 229: 362
- [58] Walter F, Brinks E. *AJ*, 1999, 118: 273
- [59] Crosthwaite L P, Turner J L, Ho P T P. *AJ*, 2000, 119: 1720
- [60] Ehlerová S, Palouš J. *A&A*, 2005, 437: 101
- [61] Chevalier R. *ApJ*, 1974, 188: 501
- [62] Daigle A, Joncas G. *ApJ*, 2007, 661: 285
- [63] Arnal E M, Cordi M. *A&A*, 2007, 476: 255
- [64] Dawson J R, McClure-Griffiths N M, Kawamura A, et al. *ApJ*, 2011, 728: 127
- [65] Cichowolski S, Pineault S. *A&A*, 2011, 525: 121
- [66] Boulanger F, Perault M. *ApJ*, 1988, 330: 964
- [67] Kessler M F, Steinz J A, Anderegg M E, et al. *A&A*, 1996, 315: L27
- [68] Price S D. *SSRv*, 1995, 74: 81
- [69] Egan M P, Shipman R F, Price S D, et al. *ApJ*, 1998, 494: L199
- [70] Price S D, Egan M P, Carey S J, et al. *AJ*, 2001, 121: 2819
- [71] Benjamin R A, Churchwell E, Babler B L, et al. *ApJ*, 2005, 630: L149
- [72] Becker R H, White R L, McLean B J, et al. *ApJ*, 1990, 358: 485
- [73] Weaver R, McCray R, Castor J, et al. *ApJ*, 1977, 218: 377
- [74] Whitworth A P, Bhattal A S, Chapman S J, et al. *MNRAS*, 1994, 268: 291
- [75] Capriotti E R, Kozminsky J F. *PASP*, 2001, 113: 677

- [76] Deharveng L, Schuller F, Anderson L D, et al. *A&A*, 2010, 523: 6
- [77] Watson C, Hanspal U, Mengistu A. *ApJ*, 2010, 716: 1478
- [78] Deharveng L, Zavagno A, Schuller F, et al. *A&A*, 2009, 496: 177
- [79] Low F, Beintema D A, Gautier F N, et al. *ApJ*, 1984, 278: 19
- [80] Schwartz P R. *ApJ*, 1987, 320: 258
- [81] Marston A P. *AJ*, 1996, 112: 2828
- [82] van der Hucht K A, Conti P S, Lundstrom I, et al. *Space Sci. Rev.*, 1981, 28: 227
- [83] Kiss Cs, Moór A, Tóth L V. *A&A*, 2004, 418: 131
- [84] Könyves V, Kiss Cs, Moór A, et al. *A&A*, 2007, 463: 1227
- [85] Blythe J H. *MNRAS*, 1957, 117: 652
- [86] Tunmer H. *Philosophical Magazine*, 1958, 3: 370
- [87] McCray R, Snow T P Jr. *ARA&A*, 1979, 17: 213
- [88] Bruhweiler F C, Gull T R, Kafatos M, et al. *ApJ*, 1980, 238: L27
- [89] McCray R, Kafatos M. *ApJ*, 1987, 317: 190
- [90] Tenorio-Tagle G. *A&A*, 1980, 88: 61
- [91] Meyerdierks H, Heithausen A, Reif K. *A&A*, 1991, 245: 247
- [92] Larson R B. *MNRAS*, 1981, 194: 809
- [93] MacLow M - M, Klessen R S. *Rev. Mod. Phys.*, 2004, 76: 215
- [94] Efremov Y N, Elmegreen B G, Hodge P W. *ApJ*, 1998, 501: L163
- [95] Loeb A, Perna R. *ApJ*, 1998, 503: L35
- [96] Efremov Y N, Ehlerová S, Palouš J. *A&A*, 1999, 350: 457
- [97] Su M, Slatyer T R, Finkbeiner D P. *ApJ*, 2010, 724: 1044
- [98] Mertsch P, Sarkar S. *Physical Review Letter*, 2011, 107: 091101
- [99] Zubovas K, King A R, Nayakshin S. *MNRAS*, 2011, 415: L21
- [100] Chang K -S, Chernyshov D O, Dogiel V A. *ApJ*, 2011, 731: L17
- [101] Öpik E J. *AJ*, 1953, 2: 219
- [102] Elmegreen B G, Lada C J. *ApJ*, 1977, 214: 725
- [103] Dale J E, Wünsch R, Smith R J, et al. *MNRAS*, 2011, 411: 2230
- [104] Wünsch R, Palouš J. *A&A*, 2001, 374: 746

## Bubbles in the Milky Way Galaxy

ZHAO Jun-liang<sup>1,2</sup>

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Normal University, 200233 Shanghai, China*)

**Abstract:** Bubbles are a ubiquitous feature of the interstellar medium (ISM) on a wide range of mass and size scales, and the study of them gives information about the stellar winds that produce them and the structure and physical properties of the ambient ISM. An interstellar bubble is composed of an expanding thin shell with cool matter of relatively high density, which is the outer boundary of the bubble, and a cavity with very diffuse and hot material bounded by the shell. Bubbles with large size are also referred to as superbubbles.

In 1980's it was confirmed that our solar system is in an old bubble, which is referred

to as the Local Bubble (LB). The LB was formed by injecting the energy of about  $10^{45}$  J into the ISM surrounding the Sun  $(1 - 1.5) \times 10^7$  a ago, and this energy injecting event was caused by a burst of supernova activity that involved some 14-20 massive OB stars in a nearby young association. The LB extends to about 200 pc in the Galactic plane and 600 pc perpendicular to it, but is inclined some  $20^\circ$  relative to the direction of the Galactic pole.

Bubble structure discovered by 21 cm radio observations is usually referred to as HI shell. Since 1979 more and more HI shells have been found and collected in the literature, where important parameters used to describe the morphological and physical features of HI shell are listed, such as the LSR velocity, the angular size, the galactocentric and heliocentric distances, mass, expansion velocity, the density of the ambient ISM, etc. It is shown from statistical analyses that: (1) HI shells are concentrated towards the Galactic plane and their radial distribution follows an exponential law with a scale length of about 3 kpc; (2) there are no shells younger than 1 Ma and only a few shells with ages older than some 50 Ma; (3) the size distribution of shells follows a power law with an index of  $-2.1$ ; (4) there are many low-energy shells, the majority of which are small with radii  $<100$  pc. However, all of large shells are not the most energetic structures.

Infrared observations can be used to probe the spatial distribution of the ISM composed of dust and gas, including the various morphologies of bubbles, which are bright at mid-infrared wavelengths. Among others, the observations and studies completed in 2006–2007 are the most successful, from which some 600 infrared dust bubbles are found. Besides, similar observations in far-infrared wavelengths are also made, from which more than 460 bubbles are discovered, and corresponding studies are completed. Based upon the published data of these bubbles, statistical analyses are made and some interesting results and conclusions are obtained.

Several possible physical processes have been used to explain the origin of bubbles: (1) energy release from massive stars (winds and supernova explosions), which is the most probable mechanism of bubble formation, especially at low galactic latitude; (2) high velocity clouds with a large amount of energy infalling into the Galactic disc of constant density; (3) supersonic turbulence, which may be important in the control of star formation and can also govern the structure of the ISM above the Galactic plane; (4) Gamma-ray burst explosions, which can deposit enough energy into the ambient ISM to create large-size shells. No matter how bubbles are formed, a sequential and very important effect is that expanding shells can eventually trigger bursts of star formation because of the onset of gravitational instability.

**Key words:** Galaxy; bubble; shell; star formation