

文章编号: 1000-8349(2012)03-346-16

# 星系中的 HI 空洞及其形成机制

赵君亮

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

**摘要:** 旋涡星系和不规则星系中存在众多的 HI 空洞已是不争的事实, 它们形态各异、大小不一、物理特征差别明显。人们不仅对若干近距星系中的 HI 空洞做了较为细致的观测研究, 而且随着观测资料的积累, 相关统计研究亦渐趋深入。迄今已就 HI 空洞的形成机制提出了多种理论模型, 但对这一问题的认识尚未完全取得一致。

**关键词:** 星际介质; HI 壳层; HI 空洞; 形成机制

**中图分类号:** P155.2      **文献标识码:** A

## 1 引言

除暗物质外, 构成星系的主要物质形态是恒星和星际介质 (ISM)。星际介质的密度分布很不均匀, 密度高的地方构成星际云, 物质数密度约为  $1 \text{ cm}^{-3}$  (分子云的物质数密度可大于  $100 \text{ cm}^{-3}$ ), 而云间 ISM 的数密度仅约为  $0.1 \text{ cm}^{-3}$  或更低。星系中局部小区域内的 ISM 密度特别低, 构成所谓“星际泡 (interstellar bubble)”——因其外形往往大体上呈圆形或椭圆形而得此名。泡结构通常可由性质明显不同的两种成分组成, 即密度相对较高的泡壁 (wall), 以及为泡壁所包围的甚低密度空腔 (cavity)。泡壁常被形象化地称为壳层 (shell), 它们是泡的外部边界, 物质温度相对较低 ( $T < 10^3 \text{ K}$ )。另一方面, 空腔内的物质尽管密度很低 (数密度  $n \leq 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$ ), 但温度却非常高 ( $T \approx 10^6 \text{ K}$  或更高)<sup>[1]</sup>, 因而泡有时又被称为“热泡 (hot bubble)”。

20 世纪 80 年代起的一些工作表明, 多数星际泡的泡壁 (壳层) 并不很明显, 在中性氢图像上泡和壳层只是表现为一类空洞形结构, 于是人们便把它们统称为空洞 (hole) 或 HI 空洞, 其中有明显泡壁的才称为 HI 壳层<sup>[2-4]</sup>。三维 HI 壳层的观测表象 (也就是它们在天球切平面上的二维投影) 具有环形结构, 故而又称为环 (loop)。可见, 泡、热泡、壳层、空腔、环和空洞, 这多种术语本质上指的是同一类的星际介质结构——星际泡, 不过由中性氢观测所发现的此类结构通常称为 HI 壳层或 HI 空洞, 而不称 HI 泡。

早在 20 世纪 50-60 年代, 有人就已注意到银河系内星际介质分布的泡结构特征<sup>[5,6]</sup>, 进

收稿日期: 2011-12-12; 修回日期: 2012-02-20

资助项目: 国家自然科学基金 (10773020, 10778003, 10833005)

入 21 世纪后数以百计的银河系泡得以确认<sup>[7-9]</sup>, 人们随即开始探究泡与泡之间, 以及泡与周边环境之间的相互作用<sup>[10-12]</sup>。差不多同一时期, 在一些近距离河外星系中也陆续发现了类似的泡结构<sup>[13,14]</sup>。目前, 相关研究工作做得较为细致的目标天体是本星系群内的几个旋涡星系和不规则星系, 其中特别是大、小麦哲伦云<sup>[15-21]</sup>, 以及仙女星系 (M31)<sup>[2,22]</sup>、三角星系 (M33)<sup>[3]</sup> 等。

近期实施了一项称为“近距星系 H I 巡天 (The H I Nearby Galaxy Survey, THINGS)”的计划, 该计划利用美国甚大阵 (VLA) 射电望远镜和综合孔径技术, 对 34 个近距星系进行了 21 cm H I 谱线观测, 主要科学目标之一是要探测星系中 ISM 的小尺度结构, 并进而研究其随星系形态、恒星形成率、星系质量和金属度的变化情况。THINGS 的速度分辨率好于  $5.2 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 角分辨率约为  $6''$ ; 目标星系的距离范围为  $2\sim 15 \text{ Mpc}$ , 故相应的线尺度分辨率为  $60\sim 440 \text{ pc}$ <sup>[23]</sup>。

最近, 人们利用 THINGS 计划所提供的样本, 在其中 20 个近距星系内探测到 1000 多个 H I 空洞和壳层, 并就不同形态星系, 对这些空洞的多方面性质 (如大小、膨胀速度、能量需求和运动学年龄等) 做了分类统计研究<sup>[4,24]</sup>。

在取得越来越多高质量实测资料的同时, 相应的理论研究亦日趋活跃和深入, 其中包括对星际泡各种可能形成机制的探讨<sup>[18,20,25-33]</sup>, 星系盘中 H I 壳层的演化<sup>[34]</sup>, 以及泡结构与后续的恒星形成和演化的关系<sup>[35,36]</sup> 等重要问题。

迄今为止, 涉及河外星系中星际介质空洞结构的研究和相关结论, 绝大多数基于中性氢 H I 的谱线观测, 仅有少数取自一氧化碳 (CO) 等其他波段的观测资料<sup>[15,37]</sup>, 这与银河系泡结构的观测情况颇为不同。与其他波段相比, H I 观测有诸多好处, 如不会受到星际尘埃消光的影响, 由谱线的多普勒位移可以确定气体的运动速度——据此可取得有关 ISM 物理性质和运动学状态的重要信息, 能方便地推算出观测视线方向 H I 的质量密度, 进而得到星系内 H I 的总质量<sup>[23]</sup>。

## 2 观测特征和物理性质

一个 H I 空洞的基本特性, 可以从它的观测特征, 以及由观测推知的物理性质两个方面来加以描述<sup>[4]</sup>。

### 2.1 观测特征

对于一个 H I 空洞来说, 除了它的天球坐标位置 (赤经、赤纬) 外, 通过实测还可以取得描述其基本观测特征的多种资料:

(1) 日心速度  $V_{\text{hel}}$ , 其测定精度取决于观测技术的速度分辨率。早期如对 M31 空洞的速度分辨率约为  $8 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[2]</sup>, 近期对 THINGS 星系来说为  $2.6\sim 5.2 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(2) 空洞的半长轴  $b_{\text{maj}}$  和半短轴  $b_{\text{min}}$ , 测定精度取决于观测技术的空间分辨率, 目前可达到  $3''$  左右。

(3) 轴比, 即空洞短轴与长轴之比, 其不确定性可达 25%。

(4) 空洞在天球切平面上的位置角, 由北向东计算, 其不确定性约为  $20^\circ$ 。

(5) 空洞的类型。遵照 Brinks 和 Bajaja<sup>[2]</sup> 的做法, 空洞可按它们在  $p-V$  图 (位置-速度图) 上的形态分为 1 型、2 型和 3 型三类, 其中 1 型空洞已整个吹散, 2 型空洞为单侧吹散, 而 3 型空洞两侧均未吹散 (参见图 1)。通常认为空洞按 3 型—2 型—1 型的序列演化, 因而统计上说 3 型空洞的尺度为最小。

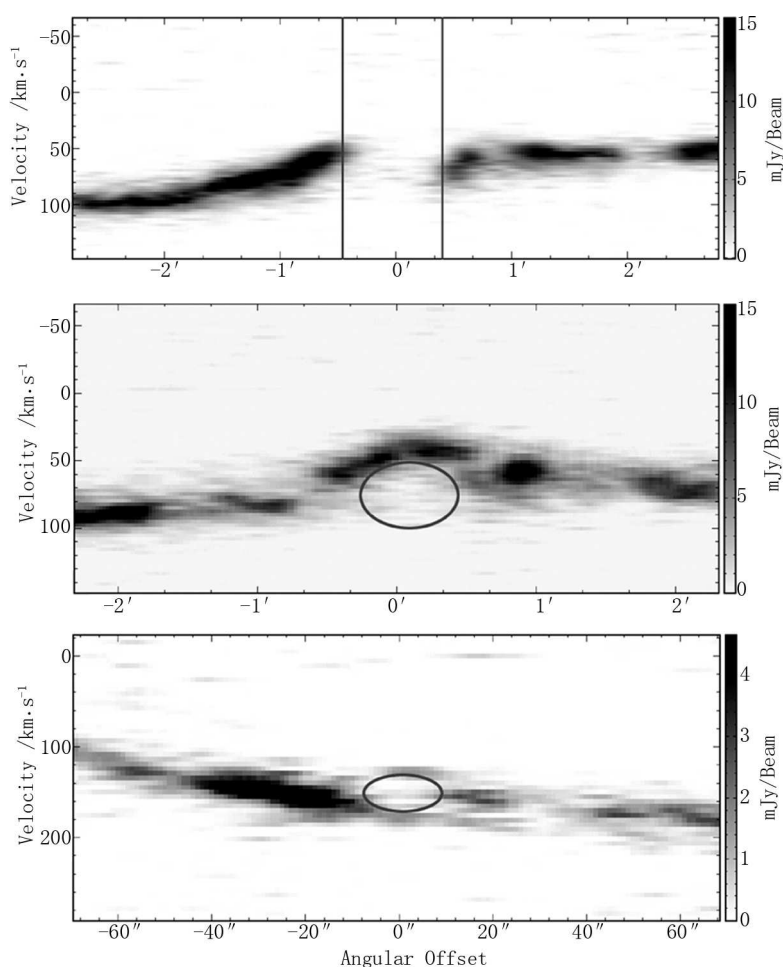


图 1 位置-速度图上三种不同类型的空洞: 1 型 (上)、2 型 (中) 和 3 型 (下)<sup>[4]</sup>。纵坐标为速度, 颜色深浅表征 HI 强度的大小, 粗线表示空洞所在位置和形状。

(6) 膨胀速度  $V_{\text{exp}}$ , 测定精度同样取决于观测技术的速度分辨率。注意, 只有 2 型和 3 型空洞才能测得  $V_{\text{exp}}$ 。

(7) 空洞周围物质的平均流量密度  $I$ , 相对误差约为 10%;  $I$  值可用于导出空洞生成前 ISM 密度的近似值。

## 2.2 物理性质

利用上述观测特征可以推算出空洞的以下物理性质<sup>[4]</sup>:

(1) 空洞 (有效) 直径  $d$ 。由于大部分空洞呈椭圆形而不是圆形,  $d$  通常按下式确定:

$$d = 2\sqrt{b_{\max}b_{\min}} \quad . \quad (1)$$

(2) 运动学年龄  $t$ 。若假设空洞在其一生中保持以速度  $V_{\text{exp}}$  膨胀, 那么就有

$$t(\text{Ma}) = 0.978 \frac{d/2}{V_{\text{exp}}} \quad , \quad (2)$$

式中  $d$  为空洞的直径, 以 pc 为单位;  $V_{\text{exp}}$  以  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  为单位。鉴于在膨胀过程中早期的膨胀速度较大, 上式给出的应该是空洞运动学年龄的上限。  $t$  值的统计不确定性约为 20%。

(3) 空洞周围 H I 的柱密度  $N_{\text{HI}}$ , 并可由此推知中面上 H I 的体密度  $n_{\text{HI}}$ <sup>[4]</sup>, 它们分别以  $\text{cm}^{-2}$  和  $\text{cm}^{-3}$  为单位。

(4) 空洞的体积  $V$ 。对于 3 型空洞可按下式计算:

$$V(\text{pc}^3) = (4/3)\pi(d/2)^3 \quad , \quad (3)$$

其中  $d$  按式 (1) 确定。对于 1 型和 2 型空洞可认为它们呈圆柱形, 其体积为

$$V(\text{pc}^3) = 2\pi(d/2)^2\sqrt{8\ln 2}h \quad , \quad (4)$$

这里  $h$  为标高, 而  $\sqrt{8\ln 2}h$  表示盘的厚度<sup>[4]</sup>。

(5) 空洞 H I 物质的质量  $M_{\text{HI}}$ 。

(6) 空洞到星系中心的线距离 (中心距)  $R$ 。

(7) 能量需求 (又称为特征能量)  $E_E$ , 即形成一个空洞所需要的能量。根据 1974 年 Chevalier<sup>[38]</sup> 的一项研究可以有:

$$E_E(J) = 5.3 \times 10^{36} n_0^{1.12} (d/2)^{3.12} V_{\text{exp}}^{1.4} \quad , \quad (5)$$

其中假设膨胀壳层的能量需求由一次超新星爆发所提供, 而  $n_0$  为粒子数密度。不过, 通常的做法是略去 He 和  $\text{H}_2$  对  $n_0$  的贡献, 于是就有  $n_0 \approx n_{\text{HI}}$ <sup>[22,39-41]</sup>。由于在导出 Chevalier 方程时引入了多项假设, 由式 (5) 推算出的  $E_E$  值可能会有 50% 的不确定性。1981 年 Brinks<sup>[22]</sup> 曾指出, 形成直径 0.1~1 kpc 空洞所需要的能量约为  $10^{43} \sim 10^{46}$  J。

就 THINGS 资料所提供的 1000 多个 H I 空洞来看, 它们的线尺度范围为 0.1~2 kpc, 膨胀速度的范围为  $4\sim 36 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 运动学年龄的范围为 3~150 Ma, 它们分布于母星系盘的各个地方, 甚至有多达 23% 的空洞位于  $R_{25}$  之外; 这里  $R_{25}$  为 B 波段面亮度  $\mu = 25 \text{ mag}\cdot\text{arcsec}^{-2}$  等光度线星系像的半长径, 通常认为  $R \leq R_{25}$  区域是星系 (可见光) 像的主体, 而中心距  $R > R_{25}$  的部分称为星系盘的外区。

### 3 若干代表性星系内的空洞结构

#### 3.1 大麦哲伦云

为深入研究星系中的恒星形成与ISM结构和动力学性质间的联系,大麦云提供了一个极好的观测样本,其原因是多方面的:距离近(约50 kpc)、倾角小(轴比 $b/a = 0.85$ )、星际红化弱( $E_{B-V} = 0.13$ ),以及与银河系晕和小麦云间存在相互作用等。因此,大麦云便成为多波段观测和多类研究的目标天体<sup>[42]</sup>,其中包括ISM的壳层和空洞结构<sup>[43]</sup>。

早在20世纪60年代,有人即利用单天线射电望远镜对大麦云进行H I谱线观测,并讨论了它与小麦云和银河系的关系<sup>[44,45]</sup>。1978年,Goudis和Meaburn<sup>[46]</sup>在大麦云中发现了4个直径大于700 pc的超巨H II壳层和许多较小的壳层结构。进入20世纪80年代后,人们开始探究大麦云中H I分布的细节<sup>[47,48]</sup>。但是,单天线H I观测的空间分辨率不高,如Parkes望远镜的角分辨率仅为 $14' \sim 15'$ <sup>[43]</sup>,相应的大麦云之线分辨率约为220 pc,不足以深入探究星际泡的性质,特别是泡结构与恒星形成的关系。

综合孔径技术的应用大大提高了H I谱线观测的分辨率。1998年, Kim等人<sup>[43]</sup>利用澳大利亚射电望远镜阵ACTA对大麦云进行了H I谱线观测,空间分辨率高达15 pc(角分辨率为 $1'$ )。在他们所获得的H I面亮度图上,最明显的特征是存在大量的H I壳层和空洞,并与纤维状结构相连(参见图2)。

翌年, Kim等人<sup>[46]</sup>通过进一步观测证认,发现了大麦云中23个直径大于360 pc的超巨壳层和103个较小的巨壳层候选样本,并给出了有关的物理参数,如半径、日心速度、膨胀速度、年龄、风光度(wind luminosity)<sup>[49]</sup>以及能量等。他们发现,样本壳层的半径范围为40~1 200 pc,它们在100~1 000 pc范围内遵循幂律分布,谱指数为 $s = -1.5 \pm 0.4$ ,与早期Meaburn<sup>[15]</sup>的电离巨壳层分布相类似。样本壳层膨胀速度的峰值在 $14 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。对于其中直径小于360 pc的巨壳层,膨胀速度随壳层长度的增大而增大,而对更大的超巨壳层则不存在这种变化趋势;对此的解释是,前者仍因受到内部恒星的能量释放而加速运动,后者则已处于动量守恒阶段。

进入21世纪后,在上述Kim等人<sup>[16,43]</sup>工作的基础上,人们继续对大麦云内H I壳层进行了探测和研究,如改进观测数据处理方法<sup>[17]</sup>,讨论射电和光学壳层结构的细节及其相互关系<sup>[21]</sup>,以及整个麦哲伦云系统(包括大、小麦云和麦哲伦桥)内壳层的形成和演化机制<sup>[20]</sup>等。

顺便指出,小麦哲伦云中H I壳层的研究进展与大麦云相类似,即尽管1980年Meaburn<sup>[15]</sup>的工作已发现了小麦云中的超巨壳层,但只是在应用了综合孔径技术之后相关研究才得以有效进行。如1997年Staveley-Smith等人<sup>[50]</sup>在小麦云中探测到了500多个巨壳层和超巨壳层,并给出了这些壳层的多项物理参数;2005年Hatzidimitriou等人<sup>[19]</sup>利用500多个H I壳层样本,讨论了壳层结构的可能形成机制。限于篇幅,本文对此不再进一步展开。

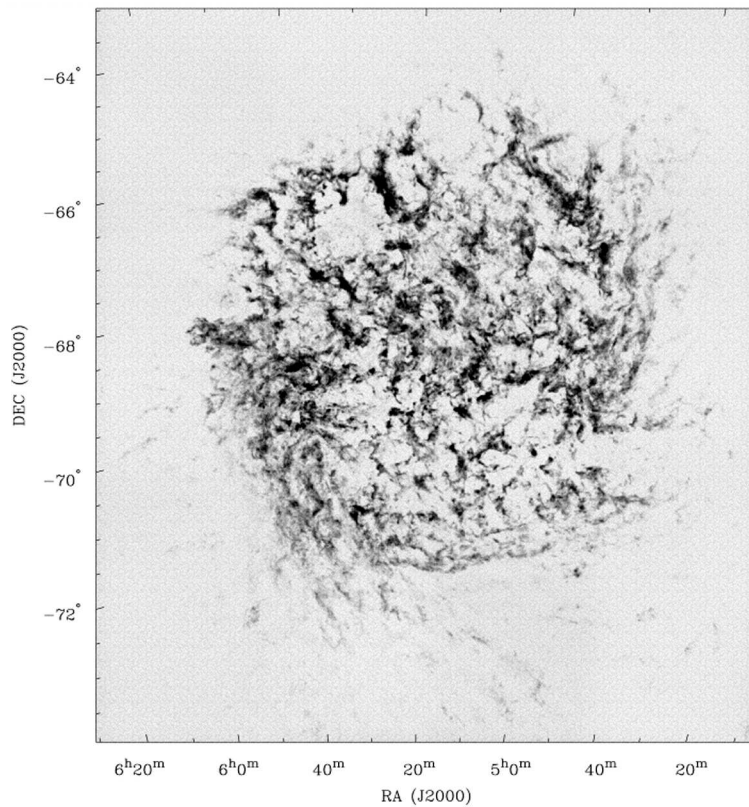


图 2 大麦云 HI 面亮度图<sup>[43]</sup>

### 3.2 仙女星系

仙女星系 (M 31) 是距离我们最近的巨旋涡星系, 倾角约为  $77^{\circ}30'$ 。早在 20 世纪 80 年代, Brinks<sup>[2,22]</sup> 就已利用荷兰 Westerbork 综合孔径射电望远镜 (WSRT) 的高分辨率 21 cm 谱线观测, 在 M31 内探测到了若干 HI 空洞结构, 发现它们在该星系中的分布范围相当大, 位置上大多与 OB 星协相重合, 并对其中与年轻星协 NGC 206<sup>[51]</sup> 成协的一个空洞做了详细的研究。Brinks<sup>[22]</sup> 认为, 既然 HI 空洞的位置往往靠近恒星形成区, 说明它们是因高温年轻星与周围星际介质间的相互作用而生成的。不久, Brinks 等人的进一步工作证实 M31 内被发现的空洞候选天体的数目达到 250~300 个<sup>[52-54]</sup>。

1986 年, Brinks 和 Bajaja<sup>[2]</sup> 依据若干判据从上述空洞候选天体中确认了 141 个 HI 空洞, 并给出了用以描述这些空洞各方面性质的观测参数, 如中心赤道坐标、日心视向速度、膨胀速度、空洞长轴的位置角、形态分类和完整性码 ( $c$  为完整空洞,  $p$  为不完整空洞) 等。由上述观测特征进而推算出空洞的一些物理参数, 如星系极坐标系中空洞的中心距和位置角、空洞有效直径、周围 HI 介质的体密度、空洞的运动学年龄、空洞的特征 HI 质量和特征能量等。

尽管 Brinks 和 Bajaja<sup>[2]</sup> 指出上述 141 个空洞并不是 M31 中空洞的完备样本,但他们还是通过细致的分析,得出了以下若干有意义的结果:

(1) 样本 H I 空洞在星系内的径向分布峰值出现在中心距约为 10 kpc 的一个环带上,与中性氢的径向分布基本一致,而空洞周边 H I 的数密度约为  $0.58 \text{ cm}^{-3}$ 。

(2) 空洞有效直径  $0.1 \sim 1 \text{ kpc}$ , 平均值约为  $0.26 \text{ kpc}$ , 且大体上遵循指数分布,由此估计可能有 70 个直径小于  $0.1 \text{ kpc}$  的空洞因探测分辨率所限而漏缺(参见图 3)。

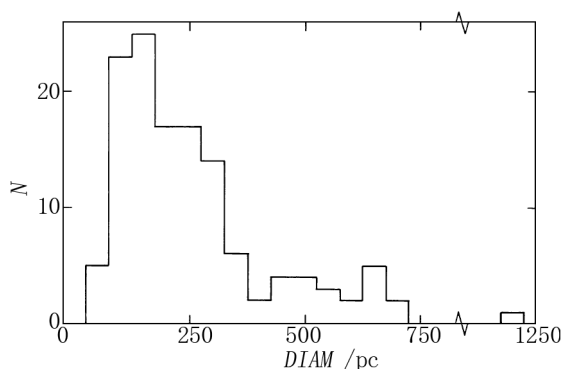


图 3 M31 H I 空洞的大小分布,横坐标为空洞直径(pc)<sup>[2]</sup>。

(3) 样本空洞的运动学年龄范围为  $2.5 \times 10^6 \sim 3 \times 10^7 \text{ a}$ (平均约  $10^7 \text{ a}$ ),故这些 H I 空洞是一些较年轻的天体,而这一年龄段也正是 OB 星协的典型年龄范围。

(4) 空洞的特征质量  $10^3 \sim 10^7 M_{\odot}$ , 分布的峰值约为  $10^5 M_{\odot}$ 。特征能量范围  $10^{42} \sim 10^{46} \text{ J}$ , 峰值约为  $10^{44} \text{ J}$ 。较小的空洞可能起源于单次超新星爆发,而大的空洞则需要超新星的多次爆发,或者另类更强的能源机制。

(5) 在 141 个样本空洞中,分类为 1、2、3 型的空洞数分别为 25、75 和 41 个,其中 2、3 型空洞的平均膨胀速度分别为  $(13.2 \pm 4.8) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $(13.9 \pm 3.7) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,可见实际上并无显著差别。

此外,作者还讨论了 M31 样本空洞的其他一些统计性质,如轴比、形态类别,以及与 H II 区和 OB 星协间的关系等。

### 3.3 不规则星系 Holmberg II

随着观测技术的提高和研究工作的深入,人们开始关注距离稍远的一些河外星系的 H I 壳层和泡结构, Holmberg II(Ho II) 可算是其中研究得最多的矮不规则星系之一<sup>[18,27,32,39,55-58]</sup>。Ho II 是大熊座 M81 星系群的成员,按伏古勒形态分类属 Im IV-V 星系,赤道坐标  $(\alpha, \delta)_{1950.0} = (8^{\text{h}}14.1^{\text{m}}, 70^{\circ}52')$ , 距离  $3.2 \text{ Mpc}$ , 轴比 0.87, 视半径  $R_{25} = 4'.1$ , 绝对 B 星等为  $-17.01 \text{ mag}$ <sup>[55]</sup>。

1992 年, Puche 等人<sup>[39]</sup> 利用美国 NRAO 的 VLA 观测,在 Ho II 中发现了 51 个 H I

空洞, 并给出它们的观测特征和有关物理参数, 如中心距、位置角、直径、轴比、年龄、质量和能量等。作者发现, Ho II 中的 HI 空洞尺度比大质量旋涡星系 (如银河系和 M31) 中的空洞大得多, 最大可达 1.7 kpc, 且至少有 7 个空洞的直径大于 1 kpc。对此的解释是, 该星系的 HI 标高为 625 pc, 比通常的星系 HI 盘标高 120 pc 大得多, 因而气体的体密度较低, 空洞在破裂前便可膨胀到较大的尺度。正因为膨胀过程的持续时间比较长, Ho II 内空洞的年龄 ( $10^7 \sim 1.5 \times 10^8$  a) 要比一些旋涡星系中 HI 空洞的年龄大。

上述 Puche 等人<sup>[39]</sup>的经典工作 (以下称 P92) 为 Ho II 空洞的许多后续研究提供了观测基础, 其中特别是有关空洞形成机制的讨论<sup>[18,27,55-57]</sup>。

2009 年 Bagetakos 等人<sup>[24]</sup>发表了 VLA 近星系 HI 巡天 (THE HI Nearby Galaxy Survey, 简称 THINGS) 的首批结果, 在 20 个近距星系中发现了 1 000 多个 HI 空洞和壳层, 其中星系 Ho II 内的空洞有 39 个。同年, Weisz 等人<sup>[32]</sup>综合利用 HST/ACS 测光资料以及 P92 和 THINGS 中的 Ho II 空洞进行了相关研究。他们分别从 P92(51 个空洞) 和 THINGS(39 个空洞) 中选取了位于 HST/ACS 测光区内的 23 个和 19 个空洞作为样本, 经分析后对 P92 的经典空洞形成机制 (指起源于同一年龄大质量星的星风和超新星爆发) 提出了质疑。

除了以上几个星系外, 人们对其他许多河外星系内的 HI 空洞也进行了不同深度的观测研究, 如 M 33<sup>[3]</sup>、M 82<sup>[37]</sup>、IC 2574<sup>[31,58]</sup>、六分仪 A<sup>[59]</sup>、NGC 2403<sup>[60,61]</sup>, 以及其他一些近距星系<sup>[4]</sup>, 本文不再逐一展开。

## 4 统计研究

随着观测资料的不断积累, 近期人们开始关注不同类型、不同质量之星系内 HI 空洞观测特征的异同之处, 并进而探究它们的一些统计性质。2011 年, Bagetakos 等人<sup>[4]</sup>利用 THINGS 观测资料就此做了较为全面的讨论。

THINGS 样本含 34 个近距星系, 距离范围 2 ~ 15 Mpc, 角分辨率约为  $6''$ , 速度分辨率  $2.6 \sim 5.2 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[23]</sup>。Bagetakos 等人根据若干判据从 THINGS 样本中选取了 20 个星系用以探讨星系 HI 空洞的统计性质, 其中最重要的是确保在每一哈勃类型中至少有 2 个星系, 而且它们应该有明显不同的 SFR 和 HI 质量, 以使比较式分析能得出较为明晰的结果。鉴于星系 DDO 53 中仅发现有 3 个空洞而予以剔除, 故实际有 19 个目标星系参与统计研究, 并进而分为旋涡星系 (共 13 个) 和矮星系 (含所有 Irr 星系和麦哲伦型星系, 计 6 个) 两大类。对目标星系中空洞 (总数为 1 014 个) 可测物理特征的分析得出了以下主要结果:

(1) 空洞数最多的是 NGC 3031 (即 M81, 306 个), 最少的是 Holmberg I (6 个)。空洞直径最大、直径范围也最大的是 NGC 6946 (0.20 ~ 2.14 kpc), 最小的是 NGC 2976 (0.13 ~ 0.24 kpc)。空洞膨胀速度和膨胀速度范围最大的是 IC 2574 ( $5 \sim 36 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 最小的是 DDO 154 ( $6 \sim 13 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ )。空洞年龄最大、年龄范围也最大的是 Holmberg II ( $10^7 \sim 1.47 \times 10^8$  a), 年龄最小、年龄范围也最小的是 NGC 2976 ( $3 \times 10^6 \sim 1.3 \times 10^7$  a)。



(2) 空洞诸多物理参数(如直径、膨胀速度、运动学年龄、质量和特征能量等)的频数分布因星系而异,且差异明显,但与母星系的类别(旋涡星系或矮星系)无关。不过,上述统计结果必然会因样本空洞观测选择效应的影响而带来某种不确定性。例如,尽管角分辨率不变,但空洞线尺度的分辨率会因星系距离的增大而降低,于是对那些相对较远的星系,小尺度空洞就探测不到。

(3) 空洞按母星系中心距的分布情况表明,只要存在 H I 气体,空洞便无处不在,即使在中心距  $R > R_{25}$  的星系盘外区仍然有相当多的空洞存在。

(4) 空洞的轴比同样因星系而异,但总体上看矮星系中的空洞较旋涡星系空洞更接近圆形——两类星系空洞轴比的平均值分别为 0.80 和 0.71,而 1992 年 Puche 等人<sup>[39]</sup>在 Ho II 中已经发现了这一现象。对此至少已提出了 2 种解释机制:1) 矮星系内区 H I 盘比旋涡星系 H I 盘来得厚,空洞形成后较不容易发生破裂,能较长时间维持球状外形<sup>[40,62]</sup>;2) 旋涡星系较差自转的剪切作用会使圆形空洞变为椭圆形,而大多数矮星系基本上为刚体自转,剪切作用不存在<sup>[4]</sup>。

(5) 对于矮星系来说,大的空洞之中心距比较大,而旋涡星系空洞则没有这种分布上的趋势。究其原因可能是多方面的,如旋涡星系外区 H I 面亮度很低,一些空洞未能探测到;或者因为中心距大的地方恒星形成效率很低<sup>[63,64]</sup>,能形成的大质量恒星数比较少,它们经超新星爆发后生成的空洞也就不会很大;或者那儿的气体密度沿星系中面垂直方向衰减很快,于是空洞往往会沿该方向拉长,但当视线方向与之斜交时细长形结构便变得较不明显。

(6) 2007 年 Stanimirović<sup>[20]</sup>曾发现空洞的膨胀速度  $V_{\text{exp}}$  随空洞尺度  $d$  的增大而增大,但对绝大多数 THINGS 星系(除 Ho II 和 NGC 4736 外)没有发现这种关系。实际上,影响  $V_{\text{exp}} - d$  关系的有两种作用相反的可能机制。其一,超新星爆发后,抛射物质的运动速度因与 ISM 的相互作用渐而减慢,因此所观测到的空洞越大,  $V_{\text{exp}}$  就越小;其二,随着母星协内超新星的持续爆发,抛射能量不断积累,空洞破裂前壳层会保持向外加速运动,结果是空洞越大  $V_{\text{exp}}$  就越大,而这种机制更可能在较小的年轻空洞中起着支配作用。正因为两种机制同时在起作用,使具体情况变得较为复杂。

(7) 星系中空洞的特征能量  $E_E$  随空洞中心距的减小而增大。还有,除 NGC 4214 外,其他星系内区 ( $R < R_{25}$ ) 空洞特征能量的平均值为  $2.1 \times 10^{45}$  J,明显比外区 ( $R > R_{25}$ ) 空洞的平均能量  $1.0 \times 10^{45}$  J 大。对此可能的解释是,由于星系内区的气体密度较高,加之那里的 SFR 亦比外区的高,可以生成较多的空洞,这两方面因素使内区空洞的外部压力较大,而生成空洞所需要的能量(亦即特征能量)就比较大。

(8) 如果进而把目标星系分为 3 组,即早型旋涡星系、晚型旋涡星系和矮星系,那么各组的平均运动学年龄分别为 13.9 Ma、31.6 Ma 和 32.5 Ma,这也许亦能用上述空洞轴比差异的两种可能机制来加以解释。

(9) 如果剔除 NGC 2841 和 NGC 3521,剩下 17 个星系中空洞的最小空间分辨率均好于 280 pc。对于这些星系中直径大于 280 pc 之空洞完备样本的分析表明,旋涡星系中空洞的直

径略大于矮星系, 原因可能是与矮星系相比, 旋涡星系中 OB 星协的质量更大, 其输入空洞的能量也较大。

总的来看, 上述统计研究尽管涉及多方面内容, 但有关结果显然是初步的, 因为星系样本不是太大, 特别是矮星系仅有 6 个。

## 5 形成机制

20 世纪 70 年代, 人们在关于银河系泡结构的研究中, 明确提出了星际泡的超新星爆发和大质量早型星星风形成机制<sup>[1,65]</sup>, 随之为一些人所接受<sup>[35,66]</sup>, 并很快用以解释河外星系中 HI 空洞的起源<sup>[2]</sup>。鉴于后来发现这一被称为“标准模型”的“剧变机制”或“恒星反馈机制”无法解释某些观测事实, 人们又提出了关于 HI 空洞的若干种其他形成机制, 如同样可以归类为剧变机制的伽马暴的爆发, 以及甚至无需有中心能源存在的高速中性氢云与星系间的碰撞, 星系际介质的冲压剥离 (ram pressure stripping), 引力不稳定性和湍流的作用等。

### 5.1 超新星爆发与大质量星星风

继 Brown 等人<sup>[6]</sup>的早期工作后, Cox 和 Smith<sup>[1]</sup>于 1974 年明确指出, 星际泡可能是 SNR 演化的产物。不久, Castor 等人<sup>[67]</sup>指出, 大质量早型星的星风非常强烈, 在其一生中可以向周围的 ISM 注入约  $10^{43}$  J 的机械能, 这一过程亦能在星际介质中生成泡结构。1979 年, Heils<sup>[68]</sup>发现银河系中的超壳层与 OB 星协弱相关。之后, 一些工作从理论上对星际泡的超新星—星风形成机制进行了探讨并给予肯定<sup>[35,49]</sup>, 有人更认为这种形成机制可以用来解释壳层的一些观测特征, 如壳层大小和形状随中心距的变化等<sup>[66]</sup>。

1986 年, Brinks 和 Bajaja<sup>[2]</sup>在 M31 中探测到 141 个直径  $0.1 \sim 1$  kpc 的 HI 空洞, 其中一部分具有壳层结构。他们注意到大部分空洞位于中心距约 10 kpc 的环带内, 而在这一区域内不仅 HI 的柱密度最高, OB 星协的数密度也达到最高值。经分析后他们确认直径小于 300 pc 的 HI 空洞在位置上与 OB 星协强相关, 并据此推算了超新星的形成率。至于那些更大的空洞, Brinks 和 Bajaja<sup>[2]</sup>认为类似的关系也可能存在, 但尚无法加以确认。1990 年, Deul 和 den Hartog<sup>[3]</sup>对 M 33 中所发现的 148 个 HI 空洞进行分析得出, 直径小于 200 pc 的 HI 空洞与 OB 星协的位置相关性相当好。上述工作, 以及嗣后对其他河外星系 (如大麦云、M82、Ho II 及 IC 2574 等) 的同类研究结果<sup>[31,37,39,69-71]</sup>, 为星系空洞的超新星—星风形成机制提供了有利的观测证据。

尽管如此, 这一机制并非无懈可击。随着观测研究工作的深入, 特别是在近期的一些工作中, 人们找到了对这种机制颇为不利的另一类观测证据。例如, Rand 和 van der Hulst<sup>[72]</sup>在星系 NGC 4631 中探测到 2 个很大的超壳层, 半径分别为 0.9 kpc 和 1.5 kpc, 与之相应的能量分别为  $(6 \sim 10) \times 10^{46}$  J 和  $(2 \sim 5) \times 10^{47}$  J。如果它们生成于超新星—星风机制, 那么作为其能源的 OB 星协中 OB 型星之数目分别应达到  $(4 \sim 10) \times 10^3$  和  $(1 \sim 3.5) \times 10^4$  个之多, 而这种情况从未观测到过<sup>[26]</sup>。又如 Rhode 等人<sup>[27]</sup>对 Ho II 中 HI 空洞的详细研究表

明, 在一些空洞中残留星团亮度的观测上限与超新星假设的预期大相径庭, 且许多 H I 空洞位于光学面亮度非常低的星系盘外区, 那里并无恒星于近期形成的任何迹象——这一点已为 21 世纪初 Bureau 和 Carignan<sup>[56]</sup> 的工作所证实。

综上所述, 至少对部分 H I 空洞而言, 超新星一星风形成机制看来并不适用, 此类机制也许可称之为“经典模型”, 甚至“主流模型”, 但恐怕算不上是一种“标准模型”。

## 5.2 高速云内落

早在 1972 年 Larson<sup>[73]</sup> 就曾预言, 气体向星系盘内落的过程中, 可能会在气体盘中形成某些特定的结构, 并进一步触发恒星的形成, 而事实上在星系盘外区确实存在中性氢云<sup>[74,75]</sup>, 有人还发现此类云团在位置上与 ISM 中的一些强扰动区相联系<sup>[76-78]</sup>。

20 世纪 80 年代初, Tenorio-Tagle<sup>[79,80]</sup> 从理论上提出了泡结构形成的高速云 (HVC) 内落机制, 认为小尺度中性氢云 (面密度约为  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ) 在与星系盘 ISM 发生碰撞过程中, 能量会在一小区域内大量聚集, 并导致高温 ( $10^6 \sim 10^7 \text{ K}$ ) 气体以超声速膨胀, 在盘 ISM 中形成大尺度低密度空腔结构, 也就是后人所称的 H I 空洞。按 Tenorio-Tagle<sup>[80]</sup> 给出的定义, 所谓高速云, 是指与气体盘相对运动速度  $v > 90 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  的中性氢云, 而 HVC 与气体盘的一次碰撞, 最多可为 ISM 注入  $10^{45} \text{ J}$  的能量, 由此生成的空腔结构在一些物理特性 (如直径、膨胀速度等) 上与观测结果相符。1986 年, Tenorio-Tagle 等人<sup>[25]</sup> 通过二维流体动力学模拟, 再次讨论了高速云内落机制生成 H I 空洞的合理性。1988 年, Tenorio-Tagle 和 Bodenheimer<sup>[81]</sup> 就大尺度 H I 空洞的 HVC 内落形成机制做了详细的评述。

继 Tenorio-Tagle 等人的上述系列研究之后, 也有人用 HVC 内落机制来解释部分大尺度 H I 空洞的形成, 如 Rhode 等人<sup>[27]</sup> 对 Ho II 的研究, Rand 和 Stone 对 NGC 4631 的研究<sup>[82]</sup>, 以及 Santillán 等人<sup>[83]</sup> 和 Murray 和 Lin<sup>[84]</sup> 对银河系的研究等。不过, 有人对这种机制亦提出了质疑, 认为 HVC 内落机制也许用来解释少数 H I 壳层的起源<sup>[57]</sup>, 但它并不具有普适性, 或者说大多数壳层不可能由 HVC 内落过程形成<sup>[2,85,86]</sup>。另外, Rand 和 van der Hulst<sup>[72]</sup> 及 Perna 和 Raymond<sup>[87]</sup> 在 20 世纪末所做的工作都已指出, 半球形的 H I 壳层有可能起因于 HVC 内落机制, 而近乎完整的环状壳层用 OB 星协中超新星的多次爆发或者一次伽马暴 (GRB) 事件来解释更为合理。

## 5.3 伽马射线暴

鉴于超新星一星风机制不能合理解释一些大尺度 H I 空洞的起源, 1998 年 Lobe 和 Perna<sup>[26]</sup> 提出了空洞的伽马暴 (GRB) 形成机制。他们认为 GRB 是宇宙中最为强烈的爆发事件, 估计每个亮星系大约每 0.3~40 Ma 出现一次 GRB 事件, 随之会有不小于  $10^{46} \text{ J}$  的爆发能量注入周边 ISM, 这要比单颗超新星爆发的能量  $10^{43} \text{ J}$  大得多, 足以生成大尺度的 H I 空洞。由 GRB 事件所产生的爆震波会因星际湍流的作用渐而减弱, 经数千万年后速度最终降为约  $10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 这意味着在每个星系内任意时刻应存在多达数以千计的 GRB 遗迹, 而细致的观测和分析有可能会揭示出一部分 H I 超壳层即是 GRB 遗迹。

事实上, 同年较早时期 Efremov 等人<sup>[88]</sup>已提出, GRB 事件所释放的能量和出现之频数, 可以用来解释旋涡星系和不规则星系内 ISM 中 1 kpc 尺度的 H I 壳层和空洞。他们认为, 在一些所观测到的 H I 壳层内并不存在明显的中央星团, 它们有可能是因 GRB 爆发而生成的遗迹。不过作者同时又谨慎地指出, 这一观点并非是结论性的。翌年, Rhode 等人<sup>[27]</sup>的工作对 H I 空洞起源的 GRB 机制给以有限度的肯定, 但他们同时指出, 与超新星—星风机制一样, GRB 机制也难以解释位于星系盘外区的空洞, 因为那里几乎不可能生成能在演化晚期发生 GRB 事件的大质量恒星。

20 世纪末, 关于 H I 空洞 GRB 形成机制的理论研究, 以及与超新星—星风机制的比较式讨论颇为热闹, 其中还涉及这两类机制如何触发恒星形成<sup>[36,88]</sup>。总的来看, GRB 事件被认为是形成 H I 空洞的一种可能且有效的能源机制, 但同时并不排斥超新星—星风机制。需要指出的是, 尽管这两种机制都可归类于剧变机制, 但由此形成的 H I 壳层的发展过程却不尽相同。对于 GRB 事件, 能量爆发是一次性的, 除了初期的瞬间暴涨阶段外, 之后壳层便近乎处于静态, 或者只是缓慢地膨胀; OB 星协中的超新星—星风作用则不同, 注入 ISM 的能量是连续性的, 而壳层会在相当长时间内较快地膨胀。

#### 5.4 小结

除了上述几种主要机制外, 关于 H I 空洞人们还提出了若干种可能的形成机制, 如星系际介质的冲压剥离<sup>[29,56]</sup>、引力不稳定性和湍流作用<sup>[18,89,90]</sup>等 (限于篇幅, 本文不再一一细述)。也有人对经典超新星—星风机制加以修正, 以克服该机制用以解释某些 H I 空洞时所面临的困难。如 Rhode 等人<sup>[27]</sup>注意到因观测误差, 对空洞能量可能估计过高, 导致对形成大尺度空洞所需超新星个数的要求就会偏多; 或者作为能源的星团可能具有异常的 IMF——大质量恒星数要比常用 IMF 所反映的多, 因而能提供更多的能量。

2009 年, Weisz 等人<sup>[31]</sup>在对星系 Ho II 的一项研究中就超新星—星风机制提出了另一类修正。他们认为, 大尺度空洞并非缘自单一年龄的星团, 它们的观测特征可以通过重建恒星形成史, 用若干代恒星的形成过程做出合理解释。这一观点已得到最近一些工作的支持<sup>[33,91]</sup>。

综上所述也许可以看出, 超新星—星风机制 (包括它们的修正版) 确能解释许多河外星系中众多 H I 空洞的多数观测特征, 如果尚不能称之为“标准模型”, 仍不失为是形成 H I 空洞 (特别是较小尺度空洞) 的主流机制。另一方面, 其他各类模型亦提供了一些 H I 空洞 (特别是较大尺度空洞) 可能的形成过程之解释。不仅如此, 正如 Tenorio-Tagle 和 Bodenheimer<sup>[81]</sup>所指出的那样, 鉴于问题的复杂性 (包括观测资料的多样性, 对观测资料认识上的欠缺, 以及不同 H I 空洞所处环境条件各异等), 很难做到从多种模型中确认一种来说明某个具体空洞的起源。他们还强调指出, 有些空洞结构甚至可以用多种模型来解释, 或者在某些情况中有可能多种过程同时在起作用<sup>[82]</sup>。

## 参考文献:

- [1] Cox D P, Smith B W. ApJ, 1974, 189: L105
- [2] Brinks E, Bajaja E. A&A, 1986, 169: 14
- [3] Deul E R, den Hartog R H. A&A, 1990, 229: 362
- [4] Bagetakos I, Brinks E, Walter F, et al. AJ, 2011, 141: 23
- [5] Blythe J H. MNRAS, 1957, 117: 652
- [6] Brown R H, Davies R D, Hazard C. Observatory, 1960, 80: 191
- [7] Ehlerová S, Palouš J. A&A, 2005, 437: 101
- [8] Churchwell E, Povich M S, Allen D, et al. ApJ, 2006, 649: 759
- [9] Churchwell E, Watson D F, Povich M S, et al. ApJ, 2007, 670: 428
- [10] Sallmen S M, Korpela E J, Yamashita H. ApJ, 2008, 681: 1310
- [11] Petriella A, Paron S, Giacani E. A&A, 2010, 513: 44
- [12] Beaumont C N, Williams J P. ApJ, 2010, 709: 791
- [13] Westerlund B E, Mathewson D S. MNRAS, 1966, 131: 371
- [14] Hindman J V. Aust.J.Phys., 1967, 20: 147
- [15] Meaburn J. MNRAS, 1980, 192: 365
- [16] Kim S, Dopita M A, Staveley-Smith L, et al. AJ, 1999, 118: 2797
- [17] Kim S, Staveley-Smith L, Dopita M A, et al. ApJS, 2003, 148: 473
- [18] Dib S, Burkert A. ApJ, 2005, 630: 238
- [19] Hatzidimitriou D, Stanimirovic S, Maragoudaki F, et al. MNRAS, 20
- [20] Stanimirović S. IAUS, 2007, 237: 84
- [21] Book L G, Chu Y-H, Gruendl R A. ApJS, 2008, 175: 165
- [22] Brinks E. A&A, 1981, 95: L1
- [23] Walter F, Brinks E, de Blok W J G, et al. AJ, 2008, 136: 2563
- [24] Bagetakos I, Brinks E, Walter F, et al. EAS, 2011, 52: 103
- [25] Tenorio-Tagle G, Bodenheimer P, Różyczka M, et al. A&A, 1986, 17
- [26] Loeb A, Perna R. ApJ, 1998, 503: L35
- [27] Rhode K, Salzer J, Westpfahl D J, et al. AJ, 1999, 118: 323
- [28] Elmegreen B G, Palouš J, Ehlerová S. MNRAS, 2002, 334: 693
- [29] Bureau M, Walter F, van Gorkom J, et al. IAUS, 2004, 217: 452
- [30] Silich S, Elias F, Franco J. ApJ, 2008, 681: 1327
- [31] Weisz D R, Skillman E D, Cannon J M, et al. ApJ, 2009, 691: L59
- [32] Weisz D R, Skillman E D, Cannon J M, et al. ApJ, 2009, 704: 1538
- [33] Warren S R, Weisz D R, Skillman E D, et al. ApJ, 2011, 738: 10
- [34] Relaño M, Beckman J E, Daigle O, et al. A&A, 2007, 467: 1117
- [35] McCray R, Kafatos M. ApJ, 1987, 317: 190
- [36] Efremov Y N, Ehlerová S, Palouš J. A&A, 1999, 350: 457
- [37] Weiß A, Walter F, Neininger N, et al. A&A, 1999, 345: L23
- [38] Chevalier R A. ApJ, 1974, 188: 501
- [39] Puche D, Westpfahl D, Brinks E, et al. AJ, 1992, 103: 1841
- [40] Walter F, Brinks E. AJ, 1999, 118: 273
- [41] Walter F, Brinks E. AJ, 2001, 121: 3026
- [42] Westerlund B E. A&AR, 1990, 2: 29
- [43] Kim S, Staveley-Smith L, Dopita M A, et al. ApJ, 1998, 503: 674

- [44] McGee R X. Australian J Phys. 1964, 17: 515
- [45] McGee R X, Milton J A. Australian J Phys. 1966, 19: 343
- [46] Goudis C, Meaburn J. A&A, 1978, 68: 189
- [47] Rohlfs K, Kreitschmann J, Siegman B C, et al. A&A, 1984, 137: 343
- [48] Luks T, Rohlfs K. 1992, A&A, 263: 41
- [49] Weaver R, McCray R. Castor J. ApJ, 1977, 218: 377
- [50] Staveley-Smith L, Sault R J, Hatzidimitriou D, et al. MNRAS, 1997, 289: 225
- [51] van den Bergh S. AJ, 1966, 71: 219
- [52] Brinks E, Bajaja E. IAUS, 1983, 100: 139
- [53] Brinks E, Bajaja E. ASSL, 1983, 105: 247
- [54] Brinks E, Shane W W. A&AS, 1984, 55: 179
- [55] Mashchenko S Y, Silich S A. Astronomy Reports, 1995, 39: 587
- [56] Bureau M, Carignan C. AJ, 2002, 123: 1316
- [57] Rhode K L, Salzer J J, Westpfahl D J, et al. AJ, 1999, 118: 323
- [58] Stewart S G, Fanelli M N, Byrd G G, et al. ApJ, 2000, 529: 201
- [59] Dohm-Palmer R C, Skillman E D, Saha A, et al. AJ, 1997, 114: 2527
- [60] Thilker D A, Braun R, Walterbos R A M. A&A, 1998, 332: 429
- [61] Mashchenko S, Thilker D A, Braun R. A&A, 1999, 343: 352
- [62] Brinks E, Walter F, Ott J. ASPC, 2002, 275: 57
- [63] Leroy A, Bigiel F, Walter F, et al. AJ, 2008, 136: 2782
- [64] Bigiel F, Leroy A, Walter F, et al. AJ, 2008, 136: 2846
- [65] McCray R, Snow T P Jr. ARA&A, 1979, 17: 213
- [66] Bruhweiler F C, Gull T R, Kafatos M, et al. ApJ, 1980, 238: L27
- [67] Castor J, McCray R, Weaver R. ApJ, 1975, 200: L107
- [68] Heiles C. ApJ, 1979, 229: 533
- [69] Sánchez-Salcedo F J. RevMexAA, 2002, 38: 39
- [70] Oey M S, Massey P. ApJ, 1995, 452: 210
- [71] van der Hulst J M. ASPC, 1996, 106: 47
- [72] Rand R J, van der Hulst J M. AJ, 1993, 105: 2098
- [73] Larson R B. Nature, 1972, 236: 21
- [74] Hulsbosch A N M. A&A, 1975, 40: 1
- [75] Verschuur G L. ARA&A, 1975, 13: 257
- [76] Mirabel F I. ApJ, 1981, 247: 97
- [77] Heiles C. ApJS, 1984, 55: 585
- [78] Hirth W, Mebold V, Müller P. A&A, 1985, 153: 249
- [79] Tenorio-Tagle G. A&A, 1980, 88: 61
- [80] Tenorio-Tagle G. A&A, 1981, 94: 338
- [81] Tenorio-Tagle G, Bodenheimer P. ARA&A, 1988, 26: 145
- [82] Rand R J, Stone J M. AJ, 1996, 111: 190
- [83] Santillán A, Franco J, Martos M, et al. ApJ, 1999, 515: 657
- [84] Murray S D, Lin D N C. ApJ, 2004, 615: 586
- [85] Ehlerová S, Palouš J. A&A, 1996, 313: 478
- [86] Kiss Cs, Moór A, Tóth L V. A&A, 2004, 418: 131
- [87] Perna R, Raymond J. ApJ, 2000, 539: 706
- [88] Efremov Y N, Elmergreen B G, Hodge P W. ApJ, 1998, 501: L163

- [89] Elmegreen B G. ApJ,1997, 477: 196  
[90] Wada K, Spaans M, Kim S. ApJ, 2000, 540: 797  
[91] Cannon J M, Most H P, Skillman E D, et al. ApJ, 2011, 735: 36

## HI Holes in External Galaxies and Their Formation

ZHAO Jun-liang

*(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)*

**Abstract:** Since 1960s observations and studies of neutral atomic hydrogen (HI) in nearby galaxies have shown there are bubbles or holes with different sizes and morphologies in the interstellar medium (ISM), which are usually referred to as HI holes or HI shells instead of HI bubbles. Because there is evolutionary relationship among HI holes, ISM and star formation, many researches have been done on the structure, physical and kinetic properties, statistics and formation mechanism of HI holes.

The observed characteristics of a hole can be described by a number of parameters as follows: (1) the equatorial coordinates of the hole, (2) its heliocentric velocity, (3) the semi-major and semi-minor axes, (4) the axial ratio, (5) the position angle of the hole on the sky, (6) the morphological type, (7) the expansion velocity, and (8) the average flux density around the hole. The above observed parameters can be used to derive the following properties of the hole: (1) the diameter, (2) the kinetic age, (3) the HI column density, (4) the volume, (5) HI mass, (6) the galactocentric distance, and (7) the estimated energy requirements.

The structure and physical and kinetic properties of holes of many nearby galaxies have been in more or less details studied, and among them some results of the three representative galaxies are briefly described, including the Large Magellanic Cloud, the Andromeda Galaxy M31 and a dwarf irregular galaxy, Holmberg II.

Recently, from the sample galaxies of “The HI Nearby Galaxies Survey (THINGS)”, more than 1000 HI holes in 20 galaxies with different morphologies were detected and a statistical discussion has been completed. It is found that the size of these holes range from 100 pc to some 2 kpc, their expansion velocities range from 4 to 36 km·s<sup>-1</sup>, and their ages are estimated to range between 3 and 150 Ma. The holes are found throughout the disks of the galaxies, out to the edge of the HI disk. The estimated energy requirements of a hole range from 10<sup>43</sup> to 10<sup>47</sup> J, and are getting bigger with the distance of the hole from the galaxy center decreasing.

Several theoretical models have been set up to explain how HI holes formed. For a long time, stellar winds and SNe from young massive stars in OB associations have been referred to as the mechanism of the creation of holes and shells, which means HI holes could in principle be the result of stellar feedback from multiple star formation episodes, and is called as the “standard” theory by some people. However, there are obvious discrepancies between such a classical model and some observational facts found later, and a few of physical mechanism other than SNe have been invoked, including infall of high velocity clouds, gamma-ray bursts, turbulence and gravitational instability, and ram pressure stripping. Some hole structures admit multiple interpretations and in other cases several different processes may be acting concurrently to build up a hole.

**Key words:** interstellar medium; HI shell; HI hole; formation mechanism