



# 低红移河外星系中性氢原子气体观测

王菁\*

澳大利亚国立射电望远镜机构, CSIRO 天文与空间科学, 埃平 NSW 1710, 澳大利亚

\* 联系人, E-mail: j.wang@csiro.au

收稿日期: 2016-07-20; 接受日期: 2016-09-14; 网络出版日期: 2017-02-07

**摘要** 我们回顾了近年来近邻宇宙星系中 HI 的研究进展, 包括星系怎样吸积 HI 气体、HI 在星系中的含量和分布、HI 跟恒星形成率的关系以及环境对星系中 HI 的影响. 近邻宇宙中仍然没有发现直接的证据支持 HI 吸积, 说明这个过程很缓和. 星系团、组尺度的环境以及局部星系密度环境对星系中 HI 含量有很明显的影响, 然而我们仍不清楚实现这一过程的具体细节. 不同星系内 HI 的分布具有很多共性, 例如 HI 质量 - 直径关系, HI 盘在光学盘外沿弯曲的普遍性, 然而从宇宙学下的星系形成模型上理解这些共性仍然是个难题. 在没有可探测的分子气体的低气体面密度区, HI 与恒星形成活动有密切联系, 表现在恒星形成覆盖面积比例和恒星形成面密度都与 HI 面密度相关. 然而 HI 和恒星形成之间的联系怎样被激发以及被哪些物理条件约束仍然未明. 相信接下来几年到几十年里, 射电数据量的大爆炸会让一些未解之谜逐渐明朗.

**关键词** 中性氢, 星系形成, 星系演化, 星系形态

**PACS:** 11.25.Tq, 04.70.-s, 04.50.Kd

## 1 引言

星系天文学研究的一个核心课题是星系怎样在形态和星族组成上演化. 而研究这一课题的一个关键就是研究冷气体, 因为星系的基本零件——恒星是由冷气体塌缩形成的. 恒星形成活动的触发和抑制一定会表现在冷气体的含量、形态和运动上. 冷气体按状态分作氢原子气体 HI 和分子气体. 二者中分子气体跟恒星形成在时空上的相关性极为密切, 然而原子氢 HI 对于研究星系演化同样重要, 因为 HI 是星系中冷重子物质的起点, 是形成分子气体和恒星的

材料库. 我们通过 HI 的运动和分布来追踪冷气体的获得或失去, 来预测恒星形成活动的将来. HI 盘的存在预示着恒星盘的形成, 所以跟星系形态的演化也密切相关.

过去的几十年里射电观测相对其他波段发展较为缓慢, 然而这个情况很快就要改变. 在接下来的几年里全球多个新的或者改良了的射电望远镜就要开始观测, 包括 ASKAP, WSRT (Apertif), MeerKat, 以及中国的 FAST. 从长远来看 2020 年 SKA 一期 (SKA1) 将建设完毕, 会把射电的观测能力提升到前所未有的高度. HI 射电观测分成两类, 天线阵综合孔径观测

**引用格式:** 王菁. 低红移河外星系中性氢原子气体观测. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 049809

Wang J. Neutral atomic hydrogen observation of low redshift galaxies (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 049809, doi: 10.1360/SSPMA2016-00340

和单孔径望远镜观测. 天线阵观测直接成像, 可以分辨气体的空间结构, 但是因为它的基线不能无限短, 将无法探测到大尺度低面密度的气体成分. 这个困难可以由空间分辨率较低 (通常为几个角分) 的单孔径望远镜 (基线长度相当于 0) 克服. 所以, 如果我们想全面测定星系中以及周围 HI 的性质, 需要将两种观测联合起来. FAST 是接下来几年里观测能力最强, 可探测天区最宽的一个单孔径射电望远镜, 将发挥重要的作用.

在这个背景下, 我们对现有 HI 星系天文学做了一个回顾综述. 现有 HI 星系天文学, 尤其是 HI 图像星系天文学, 大体局限于近邻星系, 偏向于气体丰富的星系, 样本小, 多波段数据缺乏, 文献中研究成果的分析讨论常常建立在古旧的哈勃星系形态分类基础上, 该综述也因此某些话题上会有这个局限性. 我们将提到, 近 10 年来这些缺点中的大多数都在逐步被改进, 然而改进度最小的是样本的光学完备性, 即观测仍然大多偏向于气体丰富的星系. 气体丰富的样本里星系的不同性质间表现出很好的相关性<sup>[1]</sup>, 大概因为这类星系的质量积累历史曲线比较简单平滑, 于是对于星系形成模型, 它们能为一些基本过程 (如恒星形成活跃星系内的重子物质的转化) 提供有效的线索, 却无法展示星系演化的整体框架. 我们相信在不久将来, 建立在 HI 新巡天数据基础上的研究会更充分全面地考虑那些待改进因素, 将获得更完整的星系图像.

受篇幅限制, 我们将不具体讨论星系中基于 HI 旋转曲线的暗物质质量分布研究、HI 的热力学性质、HI 与氢分子间的转换、HI 的电离、HI 的流体力学特性以及磁流体力学特性. 我们也将不讨论银河系的 HI 观测, 近域宇宙星系的 HI 图像普查, 高红移关于氢原子的吸收线观测, 以及宇宙学意义的 HI 面密度成像 (Intensity Mapping). 我们推荐已有的一些关于星系 HI 研究的综述, 如 Giovanelli 和 Haynes<sup>[2]</sup> 关于单孔径望远镜 HI 巡天的综述, Putman 等人<sup>[3]</sup> 关于星系气体晕的来源跟演化的综述, Sánchez 等人<sup>[4]</sup> 和 Fraternali<sup>[5]</sup> 关于气体吸积从而维持恒星形成率的综述, Koribalski 等人 (准备中) 关于 local volume 星系的 HI 观测图鉴. Wang 等人<sup>[6]</sup> 对现有 HI 成像巡天数据有一个较好的整理归纳, 可参阅其表 1 列

出的引用文章来了解 HI 成像巡天现状. 本文所引用的图全部来自中国天文学家. 本文“低红移”特指红移  $z < 0.05$ , “近邻宇宙”将特指离银河系距离小于 100 Mpc 的范围; 大质量星系指恒星质量  $M_* > 10^{10} M_\odot$ . 本文采用  $\Lambda$ CDM 宇宙学, 参数  $\Omega_m = 0.3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$  以及  $h = 0.7$ .

## 2 星系 HI 质量以及与星系其他性质的相关性

### 2.1 星系性质相关性

我们通过研究星系中 HI 质量与其他性质之间的关系来弄清统计意义上 HI 在星系演化过程中扮演的角色. 很早期研究就已经发现星系的 HI 质量比例, 早期通常量化为  $M_{\text{HI}}/L_B$  或者  $M_{\text{HI}}/M_{\text{dyn}}$ , 随哈勃序列从早到晚而增大, 随光学光度以及动力学质量的增大而减小<sup>[7,8]</sup>. 但这些早期研究有三个缺点, 一是哈勃序列的定义没有参数化, 二是样本数据不同源, 三是 HI 样本通常偏向于气体特别丰富的星系. 这些研究给出一些定性的并且代表观测上限的结论.

后来出现两个大型 HI 巡天项目提供了 HI 数据同源的大样本, ALFAFLA (Arecibo Legacy Fast ALFA Survey<sup>[9]</sup>) 和 HIPASS (The HI Parkes All-Sky Survey<sup>[10]</sup>). 它们仍然偏向于气体丰富的星系, 但是可以用于定量地测量 HI 质量相关关系的上限了. 一些研究基于 ALFALFA 来测量 HI 质量 - 恒星质量关系的上限轮廓, 发现该轮廓在  $10^9 M_\odot$  恒星质量上有个拐点, 较低恒星质量端星系中的 HI 质量相比通过较高恒星质量端星系的 HI 质量 - 恒星质量关系推算的量要低. 气体吸积模式或者恒星形成效率的改变都有可能造成该拐点的原因.

这些 HI 浅观测漏掉了大量冷气体较贫的星系, 其中一个代表是早型星系. 已有观测表明一些早型盘星系<sup>[11]</sup> 甚至椭圆星系 (尤其是有尘埃那些)<sup>[12]</sup> 包含可观的 HI 气体. 一个基于光学完备早型星系样本的射电合成孔径望远镜巡天 Atlas3D (面密度灵敏度到  $10^{19} \text{ cm}^{-2}$ ) 在 40% 的星系里探测到了 HI 气体<sup>[13]</sup>. 早型星系相比晚型星系, HI 丰度跟恒星形成活动以及星系形态 (如快旋转体和慢旋转体, S0 星

系和椭圆星系)的联系更为不明显,暗示着早型星系中的 HI 气体跟星系长期的形成历史之间的联系很弱<sup>[14,15]</sup>.一些极端情况的早型星系有相当多的 HI 气体 ( $M_{\text{HI}}/L_B \sim 0.2$ ),却基本只有年老的星族,这类星系内的 HI 一般面密度较低<sup>[16]</sup>.

ALFALFA 巡天探测到的大部分是蓝星系,大量对应于非蓝星系的光谱没有直接信号,光谱叠加技术成功地利用起这一部分数据,估算平均意义上的 HI 质量.例如 Fabello 等人<sup>[17-19]</sup>利用叠加技术研究了早型星系里恒星形成抑制的可能机制,包括恒星核球,活动星系核以及星系间环境的作用.叠加技术的缺点是无法获得 HI 质量对单个星系的分布,在分布函数未知的情况下获得的平均量有时不足以代表数据整体.举个例子,星系其他性质与恒星质量的关系是星系研究常关注的关系,HI 叠加技术也常用于测量这个关系.然而近期研究发现在同样的恒星质量上,星系中 HI 质量的分布跟颜色或者星族一样具有双峰性<sup>[20]</sup>.那么平均的 HI 质量 - 恒星质量关系并不是单个星系本征性质的关系,而在一定程度上是由气体丰和贫星系的比例随恒星质量变化引起的.值得一提的是,发现气体双峰性的工作<sup>[20]</sup>也是基于 HI 光谱叠加技术,但是他们是基于气体和星系颜色的紧密关系(下面将提到)先验性的假定了双峰性,然后用叠加技术进行检验.很多时候我们是无法这样预知 HI 质量的分布的.

直接测量 HI 质量相关关系不仅需要光学(恒星质量)完备的观测样本还需要针对气体贫星系进行长时间曝光的 HI 深观测.这样的样本目前仅有一个,针对  $M_* > 10^{10} M_\odot$  星系进行 Arecibo 单孔径观测的 GASS 样本. GASS 的观测策略是进行长时间曝光,直到探测到 HI 发射线或者 3 倍 rms 到达一个很低的下限(气体质量比在 0.015-0.05 之间,下限的具体设定请参考 C10).这样就决定了 GASS 会探测到恒星形成以及过渡星系,但是无法观测到气体贫的早型星系(气体质量比  $< 0.01$ ). GASS 样本包含 760 个星系,其中 469 个有直接探测到的 HI 质量,其余只有由观测下限决定的质量上限.在统计分析时对未探测到的星系可以取 HI 质量上限跟 0 两种值作为实际情况的上下限,由于上下限数值很接近(相对那些探测到的源的 HI 质量),在平均值统计上 GASS 样本可看作一个

几乎完备的 HI 星系样本.基于 GASS 样本的研究发现,HI 恒星质量比  $f_{\text{HI}} (= M_{\text{HI}}/M_*)$  跟星系的颜色,恒星质量面密度(恒星质量的一半除以半光半径围住的面积)有着最紧密的相关关系.相比这些星系性质,  $f_{\text{HI}}$  与星系形态(如可见光聚集度,早型星系的旋转快慢程度)以及恒星质量的相关性要弱得多<sup>[21]</sup>.另一方面,一些基于不太完备和同源的样本的研究显示,  $f_{\text{HI}}$  跟颜色的关系在星系蓝带以外逐渐减弱,暗示着蓝带以外星系的恒星形成历史演化比较剧烈<sup>[22]</sup>.

由于  $f_{\text{HI}}$  和星系颜色及恒星质量面密度分别表现出强相关性,Zhang 等人<sup>[23]</sup>最早提出用颜色和恒星质量面密度的线性组合来预测  $\log M_{\text{HI}}/M_*$ ,并指出其物理依据是 Kennicutt-Schmidt 定律,即恒星形成率面密度和气体面密度之间的相关关系.Catinella 等人<sup>[21]</sup>基于 GASS 样本的重新测定了  $\log M_{\text{HI}}/M_*$  跟 NUV-r 颜色以及恒星质量面密度的关系(此后称作 C10 公式).因为 GASS 在  $10^{10} M_\odot$  以上是一个恒星质量完备的样本,C10 公式在该质量范围内相比 Zhang 等人<sup>[23]</sup>以及其他类似的公式(如 Huang 等人<sup>[24]</sup>基于 ALFALFA 样本)具有更加普适的意义.后来有改进版的 C10 公式加入其他星系参数的修正项,可以使对一些特殊样本的  $f_{\text{HI}}$  估算误差有所降低,如加入颜色梯度的修正项可以更适用于 HI 丰富的星系<sup>[25,26]</sup>(图 1),加入光学聚集度的修正项可以更适用于恒星形成被抑制的星系(Xiao in prep).

HI 平面常见的应用有两类,第一类是对光学样本直接估算  $f_{\text{HI}}$  做统计研究<sup>[25,27,28]</sup>,第二类是用星系真实  $f_{\text{HI}}$  到 HI 平面的距离当作星系 HI 丰度的指针(称作 HI 富余量<sup>[26]</sup>).负的 HI 富余量通常跟失去气体的过程有关系,暗示着接下来恒星形成会被抑制;正的 HI 富余量情况则比较复杂,可以是有多余的气体,也可以是因为恒星形成过程受到了气体质量以外因素的抑制.HI 富余量跟早期定义的 HI 贫乏量有类似性和负相关性<sup>[29]</sup>.HI 贫乏量定义为一个星系 HI 质量和同样哈勃形态以及大小的场星系的平均 HI 质量的差别<sup>[30]</sup>.这两个量在环境效应研究中经常应用.

## 2.2 HI 质量函数

HI 质量函数<sup>[31-33]</sup>的测量对研究星系重子物质

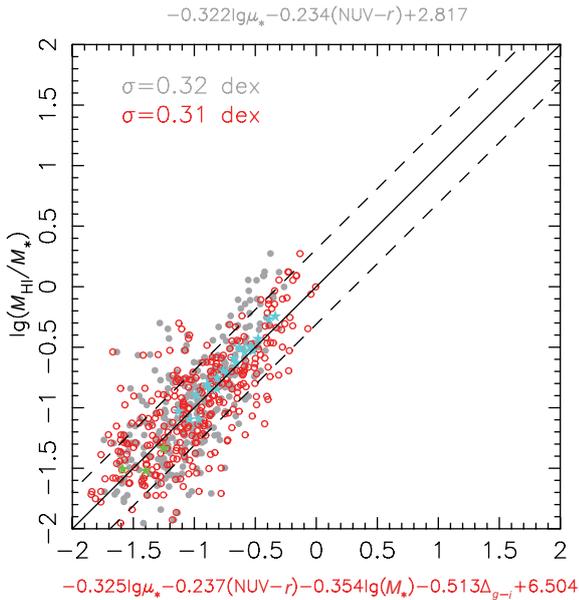


图 1 (网络版彩图) 用测光量预测星系中 HI 含量 (HI 平面). 图中灰点是 C10 公式 [21] 预测的 HI 含量跟实际观测量的比较, 红点是加入颜色梯度修正以后 [25] 的预测量跟观测量的比较. 可以看到, 灰点在高 HI 含量端有系统偏离, 而红点较好地修正了这一偏离 [25]

Figure 1 (Color online) Photometric estimator for HI mass fraction in galaxies (HI plain). The grey dots compare C10 formula [21] estimates with observed HI mass fractions. The red dots have the C10 estimates revised based on the colour gradients [25]. It is obvious the grey dots deviate from the one to one line at the high HI mass fraction end, while the red dots do not [25].

跟暗物质之间的关系, 以及限制星系的恒星形成模型都很重要. CDM 宇宙学下一个长期未解的谜题是小质量星系的缺失问题: 理论和数值模拟预测暗物质质量函数在小质量端随质量减小而增大的斜率 ( $\alpha$ ) 约为  $-1.8$ , 而观测到的星系光度函数在暗端的变化要平缓得多 [34]. 这表明小质量的暗物质晕中, 重子物质形成恒星的效率很低, 很多物理过程 (如预热, 紫外光加热, 恒星形成反馈) 可能导致这个结果. HI 作为重子物质形成恒星的一个中间状态, 它的质量函数可以更好地限制解决这个问题的不同理论模型, 并实际上限制重子物质的转换以及星系形成模型本身. 目前基于 ALFALFA 巡天 HI 选的星系样本 (10119 个星系), HI 质量函数在小  $M_{\text{HI}}$  端 ( $10^6 M_{\odot}$  附近)  $\alpha = -1.33 \pm 0.02$  [31], 相比暗物质质量函数跟星系光度函数的斜率更为接近. 值得一提的是, 基于 HIPASS

数据, HI 的旋转速度函数在较低端也远低于 (接近 20 倍) CDM 宇宙学的预测 [35]; 最新同类研究基于更大样本的 ALFALFA 数据和新的星系形成模型, 二者间差距略小 (约 5 倍) 但仍然存在 [36].

如果将星系分为不同的类型, 对于早型星系, 基于一个光学完备的 HI 样本 ATLAS<sup>3D</sup>,  $\alpha = -0.68 \pm 0.16$ , HI 质量函数在小质量端随质量减小而减小, 跟星系总体以及晚型星系的情况相反. 早晚型星系的这个区别跟它们在恒星质量函数上的区别相似 [37]. 另一方面, 由于观测深度的限制, 星系团环境中 HI 质量函数的误差棒在小质量端很大,  $\alpha$  的测量目前尚无定论. Zwaan 等人 [33] 基于 HIPASS 数据发现高密度环境的 HI 质量函数比低密度环境更陡, Springob 等人 [32] 基于早期 ALFALFA 数据则得到完全相反的结果, 其中一个可能的原因是前者用的 HI 选的样本, 而后者用的光学选的样本. 然而, Kilborn 等人 [38] 基于一个包含 16 个星系组的 HI 选样本 (GEMS 巡天) 发现星系组中星系 HI 质量函数比场星系平; 最近基于 70% ALFALFA 和光学选样本的结果是小质量端的斜率对环境没有依赖性 [39]. 此外 HI 速度宽度函数也遭遇类似尴尬 [40].

低红移对 HI 宇宙学质量密度的测量  $\Omega_{\text{HI}}$  也很重要. 这个数值可以和较高红移通过 damped Ly $\alpha$  系统观测到的  $\Omega_{\text{HI}}$  比较, 从而测定中性氢在重子物质中的比例随红移的演化. 基于 ALFALFA 巡天的研究给出的结果是  $\Omega_{\text{HI}} = (4.3 \pm 0.3) \times 10^{-4} h_{70}^{-1}$  [31].

### 3 星系的 HI 形态

不同星系内 HI 的分布具有很多共性, 例如下面将提到的 HI 质量 - 直径关系, HI 盘在光学盘外沿弯曲的普遍性, 它们对星系形成模型有很强的限制作用, 因为任何模型在制造星系其他性质的多样性的同时需要维持这些共性.

#### 3.1 HI 的三维空间分布

星系在其他波段观测到旋臂或者环时, 我们一般都能找到对应的 HI 分布. HI 有时候在星系光学可探测范围外展现出巨大的旋臂结构. 非对称性对

星系 HI 盘是普遍现象. 在矮不规则星系里, 约一半的星系有不对称的整体谱线, 约三分之一的有 HI 空间分布的不对称性, 约一半表现出运动不对称性<sup>[41]</sup>. HI 在星系盘上的分布布满中心非对称的小尺度结构, 团和洞. 即使是大质量的星系, 在 10 kpc 的低分辨率下看起来依然如此<sup>[42]</sup>. 一般认为这些小结构尤其是洞的形成跟恒星形成反馈有关, 因为这些洞附近有观测到过高速 HI 成分<sup>[43]</sup> 或者热气体晕内正在膨胀的 HI 泡<sup>[44]</sup>.

大质量漩涡星系的 HI 盘通常较薄 (典型厚度轴比为 0.2), 矮星系的 HI 盘要厚很多. 对  $M_B < -14.5$  的暗矮不规则星系, 平均厚度达到 0.6, 和它们相比漩涡星系大得多的速度离散与转动速度间的比值是相一致的<sup>[45]</sup>.

HALOGAS 项目 (Hydrogen Accretion in Local Galaxies Survey<sup>[46]</sup>) 发现盘星系中旋转延迟的 HI 厚盘非常普遍, 而且它们的性质常常跟恒星形成相关联. 有的星系在盘平面的 HI 气体可以多达 HI 总量的 30%(如 NGC 891<sup>[47]</sup>). 盘外 HI 往往面密度较低 (几倍  $10^{19}$  atoms  $\text{cm}^{-2}$ ), 能延伸到距离盘平面几个 kpc 的高度 (常被称作厚 HI 盘), 旋转速度相对星系盘有延迟, 有较大的速度离散 (几十 km/s, 常被称作中温 HI), 以及有径向速度梯度 ( $\sim 10$  km/s). 观测盘外 HI 对侧向的星系比较直接: 如果星系存在盘外 HI, 当增加观测深度时可以看到 HI 盘变厚却没有明显变大 (如 NGC 891<sup>[47]</sup>). 对于倾角较小的星系, 在位置 - 速度 (PV) 投影图上, 它们表现为旋转曲线上同一半径处向低速度端延伸的低面密度 HI 成分 (如 NGC 2403<sup>[48]</sup>). 盘外 HI 多分布在 HI 面密度较高和恒星形成较强的盘内区, 在空间分布上与恒星形成有一定相关性, 跟盘上的 HI 洞分布也有一定相关性<sup>[43]</sup>, 因此被认为跟恒星形成反馈导致的喷泉机制有关系<sup>[49]</sup> (见章节 4). 银河系的 HVC 被认为是一种盘外 HI. 此外近邻宇宙中具有盘外 HI 的经典例子包括 NGC 891<sup>[47]</sup> 和 NGC 2403<sup>[50]</sup>.

整体上看晚型和矮星系 HI 速度场的方位角和倾角跟光学主体对齐得很好. 一半左右探测到的早型星系 HI 速度场和光学主体有偏离, 甚至完全反向<sup>[13]</sup>. 存在极少数星系, HI 由一大一小两个反向转动的盘组合在一起 (如 NGC4449, NGC6798,

NGC4826). 漩涡星系中旋臂对速度场的扰动通常比较小 (小于 20%), 只在非常高分辨率 (盘半径与点扩散函数半高全宽比  $R/B \geq 10$ ) 的图像中可以看出. 当有棒存在时, 在对应的半径范围内 HI 速度方位角会随半径而变化并且与光学主轴方向有偏差, 有时和次轴方向还不垂直, 暗示非圆形速度的存在; 与此同时 HI 速度倾角却没有明显变化, 表示这些特殊速度成分与星系盘主体很可能仍然在同一个平面上. 棒特征速度场的后一个特点让我们可以区分它和 HI 弯曲现象. 星系有 HI 弯曲现象时, 速度倾角和方位角在盘的外区都有突然的变化.

对于侧向观测的星系, HI 盘在的外区的弯曲是十分普遍的现象: 几乎所有比光学盘延展的 HI 盘都是弯曲的<sup>[51]</sup>. HI 弯曲发生的位置跟光学盘截断 (表面亮度陡降) 的位置很接近<sup>[52]</sup>, 因此通常认为 HI 盘弯曲和气体的吸积有关. HI 弯曲发生在所有环境中, 但是高密度环境中的 HI 弯曲程度更加明显, 而且 HI 弯曲表现出不对称性<sup>[51]</sup>.

### 3.2 面密度轮廓

星系的恒星面密度分布通常峰值在中心然后随着半径急剧下降. HI 的半径分布则很不一样, 通常在星系中心附近变化很平缓甚至向中心下降形成一个中心空洞. 在外区, 大多数星系的 HI 面密度随半径指数下降. 对星系的 HI 面密度半径轮廓的 PCA 分析显示<sup>[53]</sup>, 这个描述包含了星系 HI 面密度轮廓 81% 的总变化度. HI 面密度轮廓其次显著的形态特征, 表现为一些局部的小鼓包结构, 在 PCA 分析里只占 7% 的总变化度.

平均上讲, HI 盘大小和恒星盘大小有相关性<sup>[41,53]</sup>. 不同晚型星系 (Sb 或者更晚) 的 HI 平均面密度差不多, 分布很窄 (几倍范围内). 早型星系 (Sab 或更早型) 的 HI 平均面密度分布宽很多, HI 最丰富的那些有着跟晚型星系差不多的面密度, 有些却要低多于 1 个数量级<sup>[8]</sup>.

不同星系 HI 面密度的差别比光学面亮度的差别要小得多, 当光学面亮度跨 4 个星等时, HI 面密度变化范围在 4 倍以内. HI 面密度轮廓变化缓慢的内区一般在恒星盘以内. 最高面密度一般不超过

$9M_{\odot} \text{pc}^{-2}$  [54]. 矮星系在内区 (恒星盘内) 的 HI 面密度和光学面亮度成正比 [41]. 大质量星系是反过来的, 光学面亮度高的早型星系有着整体较低的内区 HI 面密度 [8].

在外区, 不同晚型星系和矮星系 HI 的外区半径轮廓表现出很强的共性, 除了可以用指数函数很好地描述外, 如果用  $R_1$  (HI 在  $1M_{\odot} \text{pc}^{-2}$  面密度对应的半径) 做归一, 它们将基本重叠 (图 2) [26, 55]. 如果我们顺着 HI 在外区的半径分布往内做插值, 它们会有一样的中心面密度. 早型星系在  $R_1$  归一化的面密度轮廓图上相对晚型星系和矮星系下降更慢, 即表现出更大的指数标长 (Scale-Length) [55]. 晚型星系的 HI 普遍延伸到光学星系体以外 2 倍左右的距离; 早型盘星系 HI 盘分两类, 一类很小, 集中在光学星系体以内, 另一类很宽很延展有时是光学星系体以外的环 [13]. 从现有数据看这两类 HI 形态不同的早型星系在恒星体以及所处环境上没有明显区别.

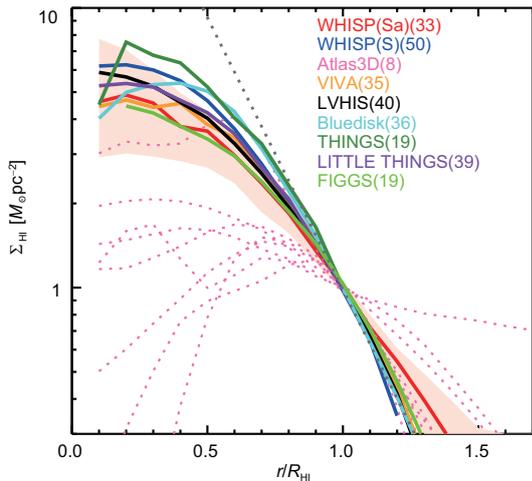


图 2 (网络版彩图) 不同样本星系的中值 HI 面密度径向轮廓. 其中 WHISP (Sa) 和 Atlas3D 样本为早型盘星系, WHISP (S), LVHIS, Bluedisk 和 THINGS 样本主要为漩涡星系, LITTLE THINGS 和 FIGGS 样本为不规则星系, VIVA 为 Virgo 星系团星系. 可以看到漩涡星系跟不规则星系的 HI 径向轮廓很相似, 早型盘星系比较不同 [6].

**Figure 2** (Color online) Median of HI surface density radial profiles for different galaxy samples. The WHISP (Sa) and Atlas3D samples are for the early-type galaxies, WHISP (S), LVHIS, Bluedisk and THINGS for the spiral galaxies, LITTLE THINGS and FIGGS for the irregular galaxies, and VIVA for the Virgo Cluster galaxies. We can see that spiral galaxies have similar HI radial profiles as the irregular galaxies, while the early-type disk galaxies are different [6].

星系 HI 一个很超乎寻常紧密的相关关系是直  $\log M_{\text{HI}}$  和  $\log D_{\text{HI}}$  之间的相关性, 直径质量关系:

$$\log M_{\text{HI}} = (1.95 \pm 0.01) \log D_{\text{HI}} + (6.54 \pm 0.01), \quad (1)$$

关系离散度在  $\log M_{\text{HI}}$  方向上仅有 0.06. 这个关系最早由 Broeils 等人 [53] 指出, 最近在 Wang 等人 [6] 中有比较详细的探究. 由于系数 1.95 接近 2, 这个关系表示不同星系有着类似的 HI 面密度. 这看起来似乎很容易理解, 因为 HI 密度太高就会转化为氢分子进行恒星形成, 太低就会被电离. 然而真正的物理机制并不是这样简单, 因为极小质量的矮星系 ( $M_{\text{HI}} \sim 10^6 M_{\odot}$ ) 和大质量星系有同样的 HI 直径质量关系以及关系离散. 矮星系的氢分子转化效率以及恒星形成效率非常低, 而且恒星形成历史非常不连续并且有多次星暴, 于是我们预测矮星系的  $D_{\text{HI}}-M_{\text{HI}}$  关系相比其他星系有一个平移并且离散更大, 然而这些预测都与观测不符.

## 4 星系 HI 吸积

低红移星系对 HI 气体的持续吸积是一个基于星系其他观测现象推断而存在的过程, 我们推断它存在, 跟银河系相关的两大经典论据是太阳附近的金属丰度 [56], 以及持续的恒星形成活动 [57]. 前者又叫做 G-dwarf 问题. 它指银河系 Fe 元素丰度分布 (作为恒星数目的函数) 峰值相比封闭系统 (Close-Box) 模型所预测的更高, 如果这个系统有原始气体流入则可以修正这个问题. 现在认为这个问题在其他星系中普遍存在 [58]. 后者是指银河系这样的星系里现有的氢气原子和分子的总和只能维持现有的恒星形成率 1 Gyr 左右, 只有持续的气体供给才能维持这些星系长期以来连续的恒星形成历史. 其他间接性证据还包括低红移大质量星系与 HI 丰度相关的由内而外形成模式. 在  $\Lambda$ CDM 宇宙学下的星系形成模型里, 星系吸积气体而形成盘, 后吸积的气体具有较大的特殊角动量 (Specific Angular Momentum), 形成较大的气体盘, 从而星系从内而外生长. 观测发现气体丰富的星系外盘有恒星形成加强, 且金属丰度更低 [59-61], 与这个模型相一致. 低红移大质量星系气体金属丰度和恒星形成率的相关性也被认为是气体吸积的间

接证据: 这个现象被认为是因为吸积的原始气体冲淡了金属丰度却由于低面密度而没有有效地形成恒星<sup>[62]</sup>. 从星系形态看, 如果一个星系内存在旋转运动相独立的多个成分, 通常也被作为气体吸积的证据, 如 HI 弯曲、反向旋转 HI 双盘.

银河系怎样吸积足够的 HI 气体用于支持恒星形成是一个未解之谜. 银河系内的高速度云被认为是气体吸积的来源之一, 然而利用它们计算出的冷气体下落效率比现有恒星形成率小了近一个数量级<sup>[63,64]</sup>. 该领域详细现状请参看文献<sup>[3]</sup>的综述. 基于近邻星系的研究也得到类似结果<sup>[65]</sup>.

河外星系的气体吸积模式更是一个谜题. 通常认为有气体时主并合(质量相似的两个星系间的合并)现象会引发星暴活动, 并且破坏掉星系原有的形态形成椭圆星系. 然而有理论预测如果发生主合并的星系中有大量的气体, 那么最后不一定耗尽气体或显著改变形态. 因此主并合可以是气体吸积的模式之一. 然而在低红移宇宙主合并率并不高, 并且从 HI 形态上看, HI 特别丰富那一类漩涡星系统上最近并没有明显的主合并现象<sup>[26,66]</sup>. 事实上, 相对同样质量和光学结构的普通星系, HI 特别丰富的漩涡星系形态更加规则(尤其是从 3 维的中心不对称性看), 和光学星系体的排列度更好, 似乎证明它们受到外界的扰动更小<sup>[26]</sup>. 也许正是因为这样它们才能保持巨大的 HI 盘的稳定性.

星系的次并合现象(质量相差大于 3 倍的两个星系并合)能否作为主要的气体吸积模式呢? 毕竟, 次并合现象发生的概率比主并合高得多, 质量较小的星系气体丰富. 并且次并合现象比主并合温和得多, 不会剧烈改变较大质量星系原有的形态, 也不会引发非常强烈的星暴现象, 更有可能在并合结束后仍然保留一定量的冷气体. 然而对近邻恒星形成星系的卫星星系中 HI 含量的统计显示, 次并合能提供的气体还是远远小于维持恒星形成率需要的量(仅占 1/10 不到<sup>[27,65]</sup>). 是因为有更小质量的卫星星系没有观测到的缘故吗? 从 HI 质量函数看, 这个效应对我们结论的影响不大.

另一方面, 并合对少数 HI 丰富的早期星系气体吸积可能却比较重要. 在第 3.2 节我们提到, 大部分早期星系 HI 盘(如果可以观测到)和恒星盘排列错

位, 有部分早期星系具有非常延展的 HI 盘, 甚至是分布在光学星系体以外的环状盘. 这暗示着星系并合很可能是这些 HI 气体的来源<sup>[67]</sup>. Bregman 等人<sup>[68]</sup>甚至提出椭圆星系除了那些 HI 有内流运动学特征的, 不存在可探测到的 HI 气体. 这些观测结果暗示着在研究 HI 气体吸积时, 我们需要将早晚型星系分开. 毕竟相比晚期星系只有极少数早期星系存在大量 HI 气体<sup>[13]</sup>, 此外 HI 丰富的早、晚期星系表现出很不相同的外盘金属丰度以及星系与外部环境的联系<sup>[69]</sup>, 这也暗示着它们不同的吸积模式. 然而对于不同类型(如快旋转体和慢旋转体)的早期星系, HI 气体分布的形态似乎并无区别<sup>[70]</sup>.

$\Lambda$ CDM 宇宙学理论预测星系从星系间介质吸积气体分为热吸积与冷吸积. 在早期宇宙里下落进入星系引力势的气体一部分被冲击加热到暗物质晕的维里温度. 这部分气体慢慢辐射冷却重新落回星系, 这称作热吸积<sup>[71]</sup>. 同时有一部分气体从来没有被加热到那么高的温度. 这部分气体沿着宇宙大尺度线状结构运动, 从星系的维里半径外被运送到星系上, 称作冷吸积(K05). 理论模型预测冷吸积是中小质量暗物质晕里星系主要的吸积模式<sup>[72]</sup>. 数值模拟里, 冷模式吸积的线状结构由成团的较低温( $\sim 10^4$  K)气体团组成, 气体团周围围绕着电离气体<sup>[73]</sup>.

热吸积在观测上通过 X 射线研究. 局限于 X 射线观测技术, 跟持续星暴产生的星风无关的 X 射线晕只在最大的那些漩涡星系周围以及星系团/组里被观测到过<sup>[74,75]</sup>. 有研究对漩涡星系周围的 X 射线进行叠加, 能得到一些跟星风无关联的辐射信号, 但是其流量表征的气体冷却率比这些星系的恒星形成率少一半<sup>[76]</sup>. 另一方面, 通过喷泉机制获得的吸积效率会略高一些<sup>[65,77]</sup>. 喷泉机制指恒星形成活动伴随的超新星爆发将金属增丰的气体喷到低金属丰度的热气体晕中, 两种金属丰度的气体混合时的相互作用加速热气体的冷却, 使得多于外流气体量的热气体冷却落回星系. 在一些近邻星系附近观测到可观的盘外 HI 气体, 其分布及动力学特征和喷泉机制的理论预测相符. HALOGAS 项目选择了 22 个非常近邻的漩涡星系, 对每个星系进行了 120 h 的极长观测, 试图找寻延展开的低面密度(约  $10^{19}$  atom  $\text{cm}^{-2}$ )的 HI 气体. 但是到目前为止, 并没有报道发现像 NGC 891

(30%<sup>[47]</sup>) 或者 NGC 2403(10%<sup>[50]</sup>) 中那么多的盘外气体. 喷泉机制也不能解释所有富气体星系的 HI 来源, 尤其它无法解释大质量星系与 HI 丰度紧密关联的由内而外的形成模式<sup>[78]</sup>.

天文学家在 HI 观测上做了很大的努力找寻星系冷吸积的痕迹, 然而总体上并不成功. 在一些近邻星系周围观测到过线状气体结构 (比如 Shostak 等人<sup>[79]</sup>, Oosterloo 等人<sup>[47]</sup>, de Blok 等人<sup>[80]</sup>, 见 Sancisi 等人<sup>[81]</sup> 的综述, 但是它们都更像是星系间相互作用或者恒星形成反馈作用的遗迹. 比如宇宙大尺度空洞环境巡天项目 (VGS) 在空洞里找到过一些接近冷吸积特征的星系个例. 它观测到的一个线状星系组 VGS\_31, 被包围在一个线状的 HI 气体团里, HI 从一端流入星系内<sup>[82,83]</sup>. 观测到的另一个孤立的星系 VGS\_12 在大尺度墙结构上, 即两个空洞之间. 它与墙几乎同平面, 有一个两极方向的 HI 环, 看起来就像该星系从两个空洞里吸积了气体<sup>[84]</sup>. 然而, 这些空洞环境里在小尺度上仍然存在不少星系组, 因而并不能完全排除星系并合产生极向气体环以及造成气体内流运动的可能性. 我们也不能排除星系组因巧合排列成线状的可能性. 将来对更大类似样本的分析, 以及对该类星系出现概率的分析可能可以提供更多线索.

通常认为冷吸积会产生高红移观测到的成块状的那样的星系<sup>[85]</sup>, 我们并没有发现低红移高 HI 丰度的星系有类似的形态<sup>[26]</sup>. 我们很难从观测上直接找到气体冷吸积的痕迹. 一个很大的可能性是在低红移宇宙, 中等到大质量星系周围有着更大质量的热气体晕, 冷气体在落向星系的过程中和热气体晕相互作用, 被维里化, 和热气体晕融为了一体<sup>[3]</sup>; 星系中的冷气体直接由热气体晕冷却获得. 那么, 要在低红移观测冷吸积, 我们只有在星系热气体晕以外找寻证据.

一个突破口是星系的“一致性”现象: 卫星星系的颜色和中心星系的颜色有相关性<sup>[27,42,86]</sup>. Kauffmann 等人<sup>[27,69]</sup> 的一系列工作发现这种现象对恒星形成活跃的中心星系更明显, 并且延伸到星系的维里半径以外, 于是指出这暗示着中心星系和卫星星系由一个共同的大尺度气体库支持着恒星形成活动. 她进一步指出, 这个可能的气体库可以是冷吸积. 近期类

似的一致性在 HI 观测上首次被证实: HI 丰的星系周围环境 (500 kpc, 500 km/s 范围内) 也更加 HI 丰富. 这不仅仅表现在周围星系的 HI 丰富程度上<sup>[55]</sup>(图 3), 还表现在无法单个探测到但是叠加起来产生可观信号的小质量系统里<sup>[87]</sup>. 对于这个观测现象进一步的量化描述以及它跟冷吸积模式的可能联系的进一步验证有待在将来的工作中利用来自新 HI 巡天的数据完成.

不难看出, 到目前为止我们讨论到的气体吸积研究都是围绕较大质量的非矮星系. 文献中仍然几乎是空白的一个难题是, 小质量的不规则星系是否吸积气体. 一致性现象倾向于认为它们也是大尺度气体吸积的受益者, 然而它们的从外而内的形成模式 (相比较大质量的星系从内而外的模式) 暗示它们更像是在慢慢耗尽气体. 由于不存在大质量热气体晕, 它们没有大质量星系中吸积的冷气体被热气体晕同化的问题. 然而由于引力势阱浅, 不规则星系 HI 盘上面密度和速度场图像很容易在内部或者外面作用下表现出不规则特征, 使得找寻气体吸积的特征十分困难.

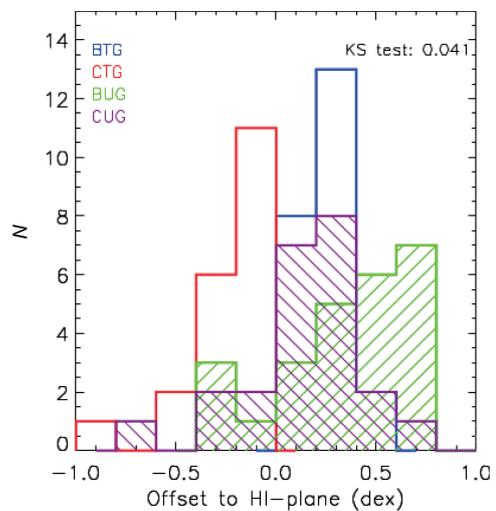


图 3 (网络版彩图) 中心和卫星星系的 HI 富余量. BTG 和 CTG 分别为 HI 有富余的星系及其控制样本星系. BUG 和 CUG 分别是 BTG 和 CTG 的卫星星系. 可以看到有 HI 富余的中心星系, 其卫星星系也更可能 HI 富余<sup>[55]</sup>

Figure 3 (Color online) HI excess in central and satellite galaxies. BTG and CTG are HI-excess and control galaxies. BUG and CUG are satellites for BTG and CTG, respectively. We can see that HI-excess central galaxies tend to have HI-excess satellites<sup>[55]</sup>.

## 5 HI 与恒星形成的关系

恒星形成率 (SFR) 和 HI 质量的比称作 HI 恒星形成效率, 这里我们简称为恒星形成效率. 它的倒数称作气体耗尽时标. 恒星形成效率的研究分为对星系整体, 和对小于 kpc 尺度的分析. 大质量星系 ( $M_* > 10^{10} M_\odot$ ) 整体的 HI 耗尽时标在 3 Gyr 左右, 不随星系质量, 颜色, 质量面密度以及光学聚集度变化<sup>[88]</sup>. 在较小恒星质量上, 因为缺乏一个光学完备的 HI 观测样本, 我们暂不清楚其 HI 耗尽时标和星系其他性质之间的相关关系. 但可以确定的是, HI 丰度较高的星系样本平均气体耗尽时标较长<sup>[24]</sup>. 极小质量 HI 丰度高的矮不规则星系, 整体 HI 耗尽时标可以达 18 Gyr<sup>[89]</sup>. 而星系团里气体被剥离的矮星系, HI 耗尽时标却可以短于 1 Gyr<sup>[24]</sup>.

近年在小于 kpc 尺度上对漩涡星系恒星形成效率的研究的代表工作是 THINGS 巡天<sup>[54,90,91]</sup>. 他们发现矮星系和漩涡星系的外区的恒星形成效率差不多, 大概因为二者环境差不多: 低气体面密度, HI 是冷气体的主要成分, 低金属丰度. 在星系的内区 (R25 以内) SFR 面密度和 HI 面密度几乎没有相关性<sup>[54]</sup>. 在 HI 主导 (冷气体成分) 的星系盘外区 (从 R25 到几倍 R25, HI 的面密度一般小于  $2M_\odot \text{pc}^{-2}$ ), 远紫外辐射表征的恒星形成区和 HI 表现出非常强的空间相关性, 暗示 HI 至少追踪着恒星形成的材料来源. 在这个区域, 大部分星系里 HI 随半径的下降的标长比远紫外辐射要长一倍 (缓慢一倍), 表示恒星形成效率随 HI 面密度逐渐降低. 从他们样本的中值上看, 这个区域的 HI 气体耗尽时间达 100 Gyr (几倍宇宙时间), 比自由下落时标或者轨道时标都长得多<sup>[91]</sup>. 比如星系 M83 的 HI 耗尽时间在 1.7R25 处已上升到 100 Gyr<sup>[90]</sup>. 这表示当前效率的恒星形成几乎不可能消耗掉星系延展的 HI 外盘<sup>[91]</sup>. 在观测数据限度内并没有发现恒星形成完全停止的阈值气体面密度<sup>[54]</sup>.

在 kpc 尺度上对不规则矮星系恒星形成效率的研究在近年的代表是基于 FIGGS 巡天数据的一系列工作<sup>[89,92-95]</sup>. 同 THINGS 对漩涡星系的发现一样, 他们并没有发现恒星形成可以完全停止的 HI 阈值面密度<sup>[92]</sup>. 他们发现恒星形成和 HI 面密度之间的对应关系有随机性. 在  $\geq 10M_\odot \text{pc}^{-2}$  的面密度上, 几乎

所有的 HI 区都有一定恒星形成. 但是随着 HI 面密度下降, 有恒星形成的气体的比例降低. 在约  $3M_\odot \text{pc}^{-2}$  的面密度上, 这个比例降到 50%<sup>[94]</sup>.  $\text{H}\alpha$  流量与远紫外流量的比值随 HI 面密度增大而增大, Roychowdhury 等人<sup>[94]</sup> 认为这暗示着大质量恒星更容易形成在高面密度气体里. 大部分单个星系里 SFR 面密度对 HI 面密度有着幂律依赖关系. 幂律指数随星系不同而不同, 但大部分比 Kennicutt 关系的指数 1.4 陡. 几乎所有星系的 SFR 对 HI 面密度关系都比 Kennicutt 关系低, 离 Kennicutt 关系的距离随 HI 面密度增大而减小<sup>[92]</sup>. 部分 (约占样本的 1/5) 星系内 SFR 跟 HI 没有幂律相关性, 这些星系内 HI 跟恒星形成区有明显的错位<sup>[92]</sup>. 在小质量星系里, 恒星形成具有可传播的随机性 (即恒星形成随机发生, 反馈推开局域气体同时激发附近的恒星形成<sup>[96]</sup>), 所以这种错位并不难理解, 也并不少见. 因此, 在小质量不规则星系里, 虽然恒星形成发生在 HI 面密度相对较高的区域, 跟 HI 面密度峰值区却错开<sup>[97]</sup>, 与更可能塌缩形成恒星的冷 HI (线宽小于 6 km/s, 相对于大部分 HI 的线宽在 10–20 km/s) 也错开<sup>[98,99]</sup>; 在极小质量 (HI 质量约  $10^6 M_\odot$ ) 的蓝致密星系里  $\alpha$  发射线和 FUV 辐射的峰值区在空间上明显错开<sup>[93]</sup>.

根据现有结果, 一般认为大质量星系外区跟矮星系在气体和小于 kpc 尺度的恒星形成性质上很相似, 它们都是 HI 主导的低气体面密度区域, SFR 和 HI 面密度之间有一样的线性关系, 暗示同样的恒星形成效率. 这是有点让人惊讶的, 因为二者的金属丰度有很大差别 (在 Roychowdhury 等人<sup>[89]</sup> 的工作里这个差别是 5 倍), 金属 (尘埃) 为气体提供相对短波辐射的遮蔽, 是气体云塌缩的必要条件, 于是不同金属丰度的环境下恒星效率应该不同<sup>[100]</sup>. 如果排除掉低 SFR 星系以及恒星形成和 HI 分布错开的星系, 不规则矮星系和大质量星系外区, SFR 和 HI 面密度之间表现出的线性关系所暗示的气体耗尽时标在平均值上大约为 10 Gyr<sup>[89]</sup>, 在中值上大约为 100 Gyr<sup>[91]</sup>, 两个数值都比星系内区总气体耗尽时标 (约 2 Gyr) 长, 但是中值跟平均值的差别也暗示着低气体面密度区的恒星形成有很大的可变范围, 其中部分特殊星系具有超出其他星系的恒星形成效率.

气体富星系间潮汐相互作用常常产生非常延展

的 HI 潮汐尾. 深场光学图像显示这些 HI 潮汐尾常常和低面密度的恒星形成空间相关 [101, 102]. 这些低面密度的恒星形成区里有时出现质量较密集的恒星团, 是潮汐矮星系探索者们寻找和研究的目标 (如 Lee-Waddell 等人 [103]).

恒星形成对 HI 气体的分布有反馈作用. 一个观测证据是, 在一些盘星系里, 高速 HI 云在空间分布上与恒星形成相关, 并且有时跟 HI 盘洞也相关 [43]. 理论上高恒星形成率的小质量星系应该是研究该反馈作用的最佳星系, 因为它们的引力势比较浅, 然而观测发现这些星系里 HI 气体外流的迹象并不明显 [93, 104].

## 6 环境密度对星系 HI 含量的影响

由于 HI 盘面密度低, 而且在气体富星系里通常比恒星盘大很多, HI 气体敏感于环境效应. 除了下面将讲到的大尺度空洞环境, 现有 HI 研究大多关注中小尺度, 尤其是星系团、组内部环境. 这些研究从两方面量化环境, 局部密度 (局部星系数密度或者到星系团、组中心的距离) 和星系团、组的大小 (暗物质晕质量).

### 6.1 星系团和星系组中的星系 HI 含量

很早天文学家就发现了高密度环境对星系 HI 含

量的影响. 在同样的光学形态和尺度下, 富星系团中的漩涡星系比场漩涡星系的 HI 少很多, 星系 HI 贫的程度随着到星系团中心距离的增大而降低, 热气体的剥离被认为是星系团中最主要的环境作用 [105]. 星系团的环境作用可以延续到 3–4 倍维里半径处 [106], 表明星系在很低的密度环境中就开始变得气体贫了, 这被称作星系团的预作用. 星系团环境对极大质量 ( $M_* > 10^{11} M_\odot$ ) 星系的作用并不明显 [107]. 基于光学性质预测的 HI 质量比, Zhang 等人 [28] 发现环境密度对 HI 丰度的影响力相比恒星质量更依赖于恒星面密度 (图 4).

较低密度的星系组环境对星系中 HI 气体的影响比较复杂, 因为星系间的相互速度较小, 潮汐剥离作用和热气体剥离作用的效果可能相当. 本地星系组中, 银河系 270 kpc 以内的卫星矮星系几乎探测不到 HI 存在, 279 kpc 以外的卫星矮星系开始存在 HI 气体, 热气体剥离被认为是导致这一现象的主要原因 [108]. 然而, 在本地星系组以外, 虽然有明显热气体晕的星系组中平均每个星系的 HI 质量较低, 但是一些星系组没有明显热气体晕却也包含 HI 贫的漩涡星系, 暗示着热气体剥离不会是剥离星系组中星系 HI 的唯一方式 [38]. 星系组中 HI 贫星系的 HI 图像分析也证实了热气体和潮汐的共同作用 [109]. 例如星系组 HCG44 中, 潮汐作用可能在 1 Gyr 内已剥离掉星系 NGC 3187 HI 气体总量的 1/3 [170]. 可能因为

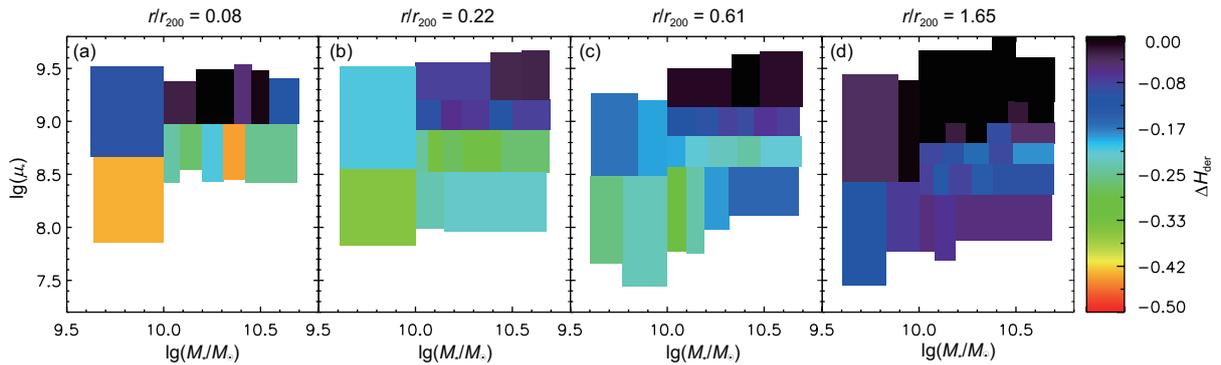


图 4 (网络版彩图) 星系 HI 贫乏度受到的环境影响对恒星质量及面密度的依赖性. 4 幅图 (从 (a)–(d)) 星系位置离星系团中心距离逐渐增大. 图中红色端表示气体贫乏度低. 可以看到, 只有低面密度的星系明显感受到了环境的作用 [28]

Figure 4 (Color online) The influence of environment on galaxy HI deficiency and its dependence on stellar masses and stellar mass surface densities. The four panels from (a) to (d) show galaxies with increasing distances from the cluster centers. The reddish colors indicate low deficiency. We can see that only low mass surface density galaxies are significantly affected by the environment [28].

存在活跃的气体剥离活动, 星系组中存在大量 (占星系中 HI 质量的  $\sim 10\%$ ) 延展的低面密度 HI 气体 [110]. 此外 HI 贫的星系并不总分布在星系组的中心附近, 暗示着星系组也存在预作用 [38].

在同样的局部环境下较大的星系团 (组) 相对小星系组对星系 HI 含量的环境效应更加明显, 并且这个效应只对卫星星系成立 [111].

HI 富星系的局部成团性跟蓝星系没有什么区别 [112], 星系中 HI 含量随环境的变化也跟星系颜色随环境变化差不多. 但是在较高密度环境下, 星系中 HI 含量比同样颜色和质量的其他星系低 [111]; HI 气体含量随局部星系密度的变化比恒星形成率的变化, 尤其是星系中心恒星形成率的变化快 [19]. 这表现了环境作用于气体再作用于恒星形成的时间序列过程是可以从观测上分辨的.

## 6.2 星系团中的星系 HI 图像

HI 图像为研究环境作用提供了更多细节. Virgo 作为离银河系最近的一个冷流 (热气体晕的冷却时标远小于宇宙年龄) 富星系团, 常被用来当作研究环境对星系气体作用的标本. 1980 年代的研究就已发现 Virgo 星系团中心附近星系的 HI 盘相对于星系团边缘的同类星系小很多, 并且星系的 HI 贫程度和 HI 盘尺度的缩小程度有一一对应的关系 [30, 113, 114]. 这些支持星系在热气体中运动时被热气体剥离了 HI 气体的理论.

VIVA 巡天是近年来研究 Virgo 星系团星系中 HI 分布比较有代表性的一个工作, 样本相比之前的研究延伸到光度小得多 (暗 2-3 个星等) 的星系而且 HI 图像分辨率非常高 (约 15 角秒), 但仍然主要观测盘星系 [115]. 他们发现, 在 Virgo 星系团中心附近 (离中心星系 M87 0.5 Mpc, 约 1/3 维里半径以内) 的星系除了 HI 盘比较小以外, 大部分有脱离了星系盘的 HI 气体 (要么正在被剥离, 要么被剥离后在重新下落). 离 M87 距离中等 (约 2/3 维里半径) 的星系有相当一部分 HI 盘具有指向远离 M87 一端的长尾, 在靠近 M87 的一端则常常截断在恒星盘内, 这些星系可能是最近才落入 Virgo 星系团中心附近的. 在星系团的外围, 则有很多像场星系一样 HI 盘远大于恒星盘的晚型星系, 这些星系中很多在 HI 或者光学上表现出

特殊形态, 比如尾、环, 以及内外盘运动学相独立的 HI 盘. 此外, 再次证实了星系团的预作用: 星系团外围也存在 HI 盘比恒星盘小的星系.

## 6.3 大尺度环境

大尺度空洞环境星系在 HI 的代表性研究是空洞星系巡天 (VGS) [116]. 他们发现, 大尺度环境空洞里的星系虽然普遍质量小, 气体丰富, 颜色蓝, 但是跟大尺度环境更高密度下同样质量的星系相比它们的气体丰度和恒星星族没有明显的区别. 从这个角度讲大尺度环境 (至少是 void 环境) 对星系的 HI 气体没有特殊作用. 如 Kreckel 等人 [117] 所述, 空洞是最可能辨认星系并合以外气体吸积模式的环境, 但是目前并没有找到这方面的直接证据 (见第 4 节).

## 7 小结

本文总结了近年来基于单孔径和合成孔径射电望远镜对近邻到低红移宇宙河外星系 HI 的观测研究情况, 一些主要的结论总结如下:

(1) 关于 HI 质量: HI 质量比例跟星系颜色有最强的相关性; 星系 HI 质量函数在小质量端的斜率目前仍有争议.

(2) 关于 HI 在星系内的分布: 不同星系 HI 的径向分布有惊人的类似性; HI 在三维上的分布特征如弯曲, 厚盘, 隐藏着关于星系质量积累的丰富信息, 我们随着数据的积累正在逐渐理解这些现象.

(3) 关于 HI 的吸积: 在低红移我们很难找到气体吸积的直接证据, 暗示了低红移气体吸积非常缓和. 另一方面, 我们可以通过叠加, 得到一个较大体积里跟气体吸积相一致的间接证据.

(4) 关于 HI 和恒星形成的关系: 二者面密度在 HI 主导的低面密度气体区有相关性, 且不依赖于星系的类型 (矮星系、漩涡星系或早型星系), 似乎也不依赖于星系的环境.

(5) 关于 HI 和环境的关系: 星系组或团环境对星系内 HI 存在剥离作用. 具体剥离的方式跟星系结构和环境密度都有关系. 气体剥离速度和星系形成演化的关系目前并没有工作统计量化. 星系团 (组) 对星系中 HI 气体存在预作用.

## 参考文献

- 1 Disney M J, Romano J D, Garcia-Appadoo D A, et al. Galaxies appear simpler than expected. *Nature*, 2008, 455: 1082–1084
- 2 Giovanelli R, Haynes M P. Extragalactic HI surveys. *Astron Astrophys*, 2016, 24: 1
- 3 Putman M E, Peek J E G, Joung M R. Gaseous galaxy halos. *Ann Rev Astron Astrophys*, 2012, 50: 491–529
- 4 Sánchez A J, Elmegreen B G, Muñoz-Tuñón C, et al. Star formation sustained by gas accretion. *Astron Astrophys*, 2014, 22: 71
- 5 Fraternali F. How can star formation be sustained? In: *Proceedings of the Setting the scene for Gaia and LAMOST, International Astronomical Union, IAU Symposium*. Lijiang, 2014. 298: 228–239
- 6 Wang J, Koribalski B S, Serra P, et al. New lessons from the HI Size-mass relation of galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 460: 2143–2151
- 7 Begum A, Chengalur J N, Karachentsev I D, et al. FIGGS: Faint irregular galaxies GMRT Survey-overview, observations and first results. *Mon Not R Astron Soc*, 2008, 386: 1667–1682
- 8 Roberts M S, Haynes M P. Physical parameters along the hubble sequence. *Ann Rev Astron Astrophys*, 1994, 32: 115–152
- 9 Giovanelli R, Haynes M P, Kent B R, et al. The arecibo legacy fast ALFA survey. I. Science goals, survey design, and strategy. *Astron J*, 2005, 130: 2598–2612
- 10 Meyer M J, Zwaan M A, Webster R L, et al. The HIPASS catalogue - I. Data presentation. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 350: 1195–1209
- 11 Oosterloo T A, Morganti R, Sadler E M, et al. Extended, regular HI structures around early-type galaxies. *Astron Astrophys*, 2007, 465: 787–798
- 12 Oosterloo T A, Morganti R, Sadler E M, et al. Extended HI disks in dust lane elliptical galaxies. *Astron J*, 2002, 123: 729–744
- 13 Serra P, Oosterloo T, Morganti R, et al. The ATLAS<sup>3D</sup> project - XIII. Mass and morphology of H I in early-type galaxies as a function of environment. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 422: 1835–1862
- 14 Oosterloo T, Morganti R, Crocker A, et al. Early-type galaxies in different environments: An HI view. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 409: 500–514
- 15 Serra P, Oser L, Krajnović D, et al. The ATLAS<sup>3D</sup> project - XXVI. H I discs in real and simulated fast and slow rotators. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 444: 3388–3407
- 16 Lemonias J J, Schiminovich D, Catinella B, et al. Resolved HI imaging of a population of massive HI-rich galaxies with suppressed star formation. *Astrophys J*, 2014, 790: 27
- 17 Fabello S, Catinella B, Giovanelli R, et al. ALFALFA HI data stacking - I. Does the bulge quench ongoing star formation in early-type galaxies? *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 411: 993–1012
- 18 Fabello S, Kauffmann G, Catinella B, et al. Arecibo Legacy Fast ALFA HI data stacking-II. HI content of the host galaxies of active galactic nuclei. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 416: 1739–1744
- 19 Fabello S, Kauffmann G, Catinella B, et al. ALFALFA HI data stacking - III. Comparison of environmental trends in HI gas mass fraction and specific star formation rate. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 427: 2841–2851
- 20 Brown T, Catinella B, Cortese L, et al. The effect of structure and star formation on the gas content of nearby galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 452: 2479–2489
- 21 Catinella B, Schiminovich D, Kauffmann G, et al. The GALEX arecibo SDSS survey-I. Gas fraction scaling relations of massive galaxies and first data release. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 403: 683–708
- 22 Cortese L, Hughes T M. Evolutionary paths to and from the red sequence: Star formation and HI properties of transition galaxies at  $z \sim 0$ . *Mon Not R Astron Soc*, 2009, 400: 1225–1240
- 23 Zhang W, Li C, Kauffmann G, et al. Estimating the HI gas fractions of galaxies in the local Universe. *Mon Not R Astron Soc*, 2009, 397: 1243–1253
- 24 Huang S, Haynes M P, Giovanelli R, et al. The arecibo legacy fast ALFA survey: The galaxy population detected by ALFALFA. *Astrophys J*, 2012, 756: 113
- 25 Li C, Kauffmann G, Fu J, et al. The clustering of galaxies as a function of their photometrically estimated atomic gas content. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 424: 1471–1482
- 26 Wang J, Kauffmann G, Józsa G I G, et al. The Bluedisks project, a study of unusually H I-rich galaxies - I. H I sizes and morphology. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 433: 270–294
- 27 Kauffmann G, Li C, Heckman T M. The accretion of gas on to galaxies as traced by their satellites. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 409: 491–499
- 28 Zhang W, Li C, Kauffmann G, et al. Gas depletion in cluster galaxies depends strongly on their internal structure. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 429: 2191–2198
- 29 Cortese L, Catinella B, Boissier S, et al. The effect of the environment on the HI scaling relations. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 415: 1797–1806

- 30 Haynes M P, Giovanelli R, Chincarini G L. The influence of environment on the HI content of galaxies. *Ann Rev Astron Astrophys*, 1984, 22: 445–470
- 31 Martin A M, Papastergis E, Giovanelli R, et al. The arecibo legacy fast ALFA survey. X. The HI mass function and  $\Omega_{\text{HI}}$  from the 40% ALFALFA survey. *Astrophys J*, 2010, 723: 1359–1374
- 32 Springob C M, Haynes M P, Giovanelli R. Morphology, environment, and the HI mass function. *Astrophys J*, 2005, 621: 215–226
- 33 Zwaan M A, Meyer M J, Staveley-Smith L, et al. The HIPASS catalogue:  $\Omega_{\text{HI}}$  and environmental effects on the HI mass function of galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2005, 359: L30–L34
- 34 Li C, White S D M. The distribution of stellar mass in the low-redshift universe. *Mon Not R Astron Soc*, 2009, 398: 2177–2187
- 35 Zwaan M A, Meyer M J, Staveley-Smith L. The velocity function of gas-rich galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 403: 1969–1977
- 36 Papastergis E, Giovanelli R, Haynes M P, et al. Is there a “too big to fail” problem in the field? *Astron Astrophys*, 2015, 574: A113
- 37 Peng Y j, Lilly S J, Kovač K, et al. Mass and environment as drivers of galaxy evolution in SDSS and zCOSMOS and the origin of the schechter function. *Astrophys J*, 2010, 721: 193–221
- 38 Kilborn V A, Forbes D A, Barnes D G, et al. Southern GEMS groups - II. HI distribution, mass functions and HI deficient galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2009, 400: 1962–1985,
- 39 Jones M G, Papastergis E, Haynes M P, et al. Environmental dependence of the HI mass function in the ALFALFA 70% catalogue. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 457: 4393–4405
- 40 Moorman C M, Vogeley M S, Hoyle F, et al. The HI mass function and velocity width function of void galaxies in the arecibo legacy fast ALFA survey. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 444: 3559–3570
- 41 Swaters R A, van Albada T S, van der Hulst J M, et al. The westerbork HI survey of spiral and irregular galaxies. I. HI imaging of late-type dwarf galaxies. *Astron Astrophys*, 2002, 390: 829–861
- 42 Wang W, White S D M. Satellite abundances around bright isolated galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 424: 2574–2598
- 43 Boomsma R, Oosterloo T A, Fraternali F, et al. HI holes and high-velocity clouds in the spiral galaxy NGC 6946. *Astron Astrophys*, 2008, 490: 555–570
- 44 Kamphuis J, Sancisi R, van der Hulst T. An HI superbubble in the spiral galaxy M 101. *Astron Astrophys*, 1991, 244: L29–L32
- 45 Roychowdhury S, Chengalur J N, Begum A, et al. Thick gas discs in faint dwarf galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 404: L60–L63
- 46 Heald G, Józsa G, Serra P, et al. The westerbork hydrogen accretion in local galaxies (HALOGAS) survey. I. Survey description and pilot observations. *Astron Astrophys*, 2011, 526: A118
- 47 Oosterloo T, Fraternali F, Sancisi R. The cold gaseous halo of NGC 891. *Astron J*, 2007, 134: 1019
- 48 Fraternali F, van Moorsel G, Sancisi R, et al. Deep HI survey of the spiral galaxy NGC 2403. *Astron J*, 2002, 123: 3124–3140
- 49 Fraternali F, Binney J J. A dynamical model for the extraplanar gas in spiral galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 366: 449–466
- 50 Fraternali F, Oosterloo T, Sancisi R. Kinematics of the ionised gas in the spiral galaxy NGC 2403. *Astron Astrophys*, 2004, 424: 485–495
- 51 García-Ruiz I, Sancisi R, Kuijken K. Neutral hydrogen and optical observations of edge-on galaxies: Hunting for warps. *Astron Astrophys*, 2002, 394: 769–789
- 52 van der Kruit P C. Truncations of stellar disks and warps of HI-layers in edge-on spiral galaxies. *Astron Astrophys*, 2007, 466: 883–893
- 53 Broeils A H, Rhee M H. Short 21-cm WSRT observations of spiral and irregular galaxies. HI properties. *Astron Astrophys*, 1997, 324: 877–887
- 54 Bigiel F, Leroy A, Walter F, et al. The star formation law in nearby galaxies on Sub-Kpc scales. *Astron J*, 2008, 136: 2846–2871
- 55 Wang E, Wang J, Kauffmann G, et al. HI scaling relations of galaxies in the environment of HI-rich and control galaxies observed by the Bluedisk project. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 449: 2010–2023
- 56 van den Bergh S. The frequency of stars with different metal abundances. *Astron J*, 1962, 67: 486–490
- 57 Kennicutt Jr R C. The rate of star formation in normal disk galaxies. *Astrophys J*, 1983, 272: 54–67
- 58 Bressan A, Chiosi C, Fagotto F. Spectrophotometric evolution of elliptical galaxies. 1: Ultraviolet excess and color-magnitude-redshift relations. *Astrophys J Suppl*, 1994, 94: 63–115
- 59 Huang M L, Kauffmann G, Chen Y M, et al. Spatially resolved star formation histories of nearby galaxies: evidence for episodic star formation in discs. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 431: 2622–2633
- 60 Moran S M, Heckman T M, Kauffmann G, et al. The GALEX arecibo SDSS survey. V. The relation between the HI content of galaxies and metal enrichment at their outskirts. *Astrophys J*, 2012, 745: 66
- 61 Wang J, Kauffmann G, Overzier R, et al. The GALEX Arecibo SDSS survey - III. Evidence for the inside-out formation of Galactic discs. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 412: 1081–1097
- 62 Yates R M, Kauffmann G, Guo Q. The relation between metallicity, stellar mass and star formation in galaxies: An analysis of observational and model data. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 422: 215–231

- 63 Putman M E, Rosenberg J L, Stocke J T, et al. The relationship between baryons and dark matter in extended galaxy halos. *Astron J*, 2006, 131: 771–781
- 64 Richter P. Cold gas accretion by high-velocity clouds and their connection to QSO absorption-line systems. *Astrophys J*, 2012, 750: 165
- 65 Fraternali F, Tomassetti M. Estimating gas accretion in disc galaxies using the Kennicutt-Schmidt law. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 426: 2166–2177
- 66 den Heijer M, Józsa G I G, Kerp J, et al. A study of the kinematics of unusually HI-rich galaxies. *Astron Nach*, 2015, 336: 284–311
- 67 van Driel W, van Woerden H. Distribution and motions of atomic hydrogen in lenticular galaxies. XI—a summary of HI observations and evolutionary scenarios. *Astron Astrophys*, 1991, 243: 71–92
- 68 Bregman J N, Hogg D E, Roberts M S. Interstellar matter in early-type galaxies. II—the relationship between gaseous components and galaxy types. *Astrophys J*, 1992, 387: 484–502
- 69 Kauffmann G. The outer stellar populations and environments of unusually HI-rich galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 450: 618–629
- 70 Serra P, Koribalski B, Duc P A, et al. Discovery of a giant HI tail in the galaxy group HCG 44. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 428: 370–380
- 71 Rees M J, Ostriker J P. Cooling, dynamics and fragmentation of massive gas clouds—Clues to the masses and radii of galaxies and clusters. *Mon Not R Astron Soc*, 1977, 179: 541–559
- 72 Dekel A, Birnboim Y. Galaxy bimodality due to cold flows and shock heating. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 368: 2–20
- 73 Kereš D, Hernquist L. Seeding the formation of cold gaseous clouds in Milky Way-size halos. *Astrophys J Lett*, 2009, 700: L1–L5
- 74 Anderson M E, Bregman J N. Detection of a hot gaseous halo around the giant spiral galaxy NGC 1961. *Astrophys J*, 2011, 737: 22
- 75 Dai X, Anderson M E, Bregman J N, et al. XMM-Newton detects a hot gaseous halo in the fastest rotating spiral galaxy UGC 12591. *Astrophys J*, 2012, 755: 107
- 76 Anderson M E, Bregman J N, Dai X. Extended hot halos around isolated galaxies observed in the ROSAT all-sky survey. *Astrophys J*, 2013, 762: 106
- 77 Marinacci F, Fraternali F, Nipoti C, et al. Galactic fountains and the rotation of disc-galaxy coronae. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 415: 1534–1542
- 78 Elmegreen B G, Struck C, Hunter D A. Shrinking galaxy disks with fountain-driven accretion from the halo. *Astrophys J*, 2014, 796: 110
- 79 Shostak G S, Skillman E D. Neutral hydrogen observations of the irregular galaxy IC 10. *Astron Astrophys*, 1989, 214: 33–42
- 80 de Blok W J G, Keating K M, Pisano D J, et al. A low HI column density filament in NGC 2403: Signature of interaction or accretion. *Astron Astrophys*, 2014, 569: A68
- 81 Sancisi R, Fraternali F, Oosterloo T, et al. Cold gas accretion in galaxies. *Astron Astrophys*, 2008, 15: 189–223
- 82 Beygu B, Kreckel K, van de Weygaert R, et al. An interacting galaxy system along a filament in a void. *Astron J*, 2013, 145: 120
- 83 Spavone M, Iodice E. VGS31b: A highly inclined ring along a filament in a void. Implication for the cold accretion. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 434: 3310–3321
- 84 Stanonik K, Platen E, Aragón-Calvo M A, et al. Polar disk galaxy found in wall between voids. *Astrophys J Lett*, 2009, 696: L6–L9
- 85 Agertz O, Teyssier R, Moore B. Disc formation and the origin of clumpy galaxies at high redshift. *Mon Not R Astron Soc*, 2009, 397: L64–L68
- 86 Weinmann S M, van den Bosch F C, Yang X, et al. Properties of galaxy groups in the Sloan Digital Sky Survey - I. The dependence of colour, star formation and morphology on halo mass. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 366: 2–28
- 87 Wang J, Serra P, Józsa G I G, et al. An HI view of galaxy conformity: HI-rich environment around HI-excess galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 453: 2399–2411
- 88 Schiminovich D, Catinella B, Kauffmann G, et al. The GALEX Arecibo SDSS Survey - II. The star formation efficiency of massive galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 408: 919–934
- 89 Roychowdhury S, Chengalur J N, Kaisin S S, et al. The relation between atomic gas and star formation rate densities in faint dwarf irregular galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 445: 1392–1402
- 90 Bigiel F, Leroy A, Seibert M, et al. Tightly correlated HI and FUV emission in the outskirts of M83. *Astrophys J Lett*, 2010, 720: L31–L35
- 91 Bigiel F, Leroy A, Walter F, et al. Extremely inefficient star formation in the outer disks of nearby galaxies. *Astron J*, 2010, 140: 1194–1213
- 92 Roychowdhury S, Chengalur J N, Begum A, et al. Star formation in extremely faint dwarf galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2009, 397: 1435–1453
- 93 Roychowdhury S, Chengalur J N, Chiboucas K, et al. Atomic hydrogen, star formation and feedback in the lowest mass blue compact dwarf galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 426: 665–672
- 94 Roychowdhury S, Chengalur J N, Kaisin S S, et al. Small bites: Star formation recipes in extreme dwarfs. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 414: L55–L59
- 95 Roychowdhury S, Huang M L, Kauffmann G, et al. The spatially resolved Kennicutt-Schmidt relation in the HI-dominated regions of spiral

- and dwarf irregular galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 449: 3700–3709
- 96 Gerola H, Seiden P E, Schulman L S. Theory of dwarf galaxies. *Astrophys J*, 1980, 242: 517–527
- 97 Begum A, Chengalur J N, Karachentsev I D, et al. Gas distribution, kinematics and star formation in faint dwarf galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 365: 1220–1234
- 98 Patra N N, Chengalur J N, Karachentsev I D, et al. Cold HI in faint dwarf galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 456: 2467–2485
- 99 Warren S R, Skillman E D, Stilp A M, et al. Tracing cold HI gas in nearby, low-mass galaxies. *Astrophys J*, 2012, 757: 84
- 100 Krumholz M R, McKee C F, Tumlinson J. The atomic-to-molecular transition in galaxies. II: HI and H<sub>2</sub> column densities. *Astrophys J*, 2009, 693: 216–235
- 101 Koribalski B S, López-Sánchez Á R. Gas dynamics and star formation in the galaxy pair NGC1512/1510. *Mon Not R Astron Soc*, 2009, 400: 1749–1767
- 102 Okamoto S, Arimoto N, Ferguson A M N, et al. A hyper supprime-cam view of the interacting galaxies of the M81 group. *Astrophys J Lett*, 2015, 809: L1
- 103 Lee-Waddell K, Spekkens K, Haynes M P, et al. Pre-existing dwarfs, tidal knots and a tidal dwarf galaxy: An unbiased HI study of the gas-rich interacting galaxy group NGC 3166/9. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 427: 2314–2327
- 104 Lelli F, Verheijen M, Fraternali F. Dynamics of starbursting dwarf galaxies. III. A HI study of 18 nearby objects. *Astron Astrophys*, 2014, 566: A71
- 105 Giovanelli R, Haynes M P. Gas deficiency in cluster galaxies—A comparison of nine clusters. *Astrophys J*, 1985, 292: 404–425
- 106 Solanes J M, Manrique A, García-Gómez C, et al. The HI content of spirals. II. Gas deficiency in cluster galaxies. *Astrophys J*, 2001, 548: 97–113
- 107 Catinella B, Schiminovich D, Cortese L, et al. The GALEX arecibo SDSS Survey-VIII. Final data release. The effect of group environment on the gas content of massive galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 436: 34–70
- 108 Grevech J, Putman M E. HI in local group dwarf galaxies and stripping by the galactic halo. *Astrophys J*, 2009, 696: 385–395
- 109 Dénes H, Kilborn V A, Koribalski B S. New HI scaling relations to probe the HI content of galaxies via global HI-deficiency maps. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 444: 667–681
- 110 Serra P, Koribalski B, Kilborn V, et al. ASKAP HI imaging of the galaxy group IC 1459. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 452: 2680–2691
- 111 Odekon M C, Koopmann R A, Haynes M P, et al. The HI content of galaxies in groups and clusters as measured by ALFALFA. *Astrophys J*, 2016, 824: 110
- 112 Papastergis E, Giovanelli R, Haynes M P, et al. The clustering of ALFALFA galaxies: Dependence on HI mass, relationship with optical samples, and clues of host halo properties. *Astrophys J*, 2013, 776: 43
- 113 Cayatte V, van Gorkom J H, Balkowski C, et al. VLA observations of neutral hydrogen in Virgo Cluster galaxies. I - The Atlas. *Astron J*, 1990, 100: 604–634
- 114 Warmels R H. The HI properties of spiral galaxies in the Virgo Cluster. I - Westerbork observations of 15 Virgo Cluster galaxies. II - One-dimensional Westerbork observations of 21 galaxies. *Astron Astrophys*, 1988, 72: 19–87
- 115 Chung A, van Gorkom J H, Kenney J D P, et al. VLA imaging of virgo spirals in atomic gas (VIVA). I. The Atlas and the HI properties. *Astron J*, 2009, 138: 1741–1816
- 116 Kreckel K, Platen E, Aragón-Calvo M A, et al. The void galaxy survey: Optical properties and HI morphology and kinematics. *Astron J*, 2012, 144: 16
- 117 Kreckel K, Platen E, Aragón-Calvo M A, et al. Only the lonely: HI Imaging of void galaxies. *Astron J*, 2011, 141: 4

# Neutral atomic hydrogen observation of low redshift galaxies

WANG Jing\*

*Australia Telescope National Facility, CSIRO Astronomy and Space Science, Epping NSW 1710, Australia*

We review recent studies on the atomic hydrogen gas (HI) in galaxies at low redshift. The topics include how HI is accreted onto galaxies, how it is distributed in galaxies and related to the other galaxy properties, how it is used to form stars, and how it is affected by environmental effects. There is no direct evidence for on-going gas accretion at low redshift, implying that gas accretion has become gentle and hard to trace compared to at the high redshift. There is strong evidence that both the cluster/group environments and local galaxy number densities affect the HI content and further affect the star formation in galaxies, but how and when these happen still remain unclear to us. The distributions of HI in different galaxies have many common features, like the HI size-mass relation and the prevalence of HI warps. However we do not fully understand the physical drivers for these common features. At low gas column densities in galaxies, where the molecular gas is hardly detectable, HI seems to be a major regulator on star forming efficiency. Both the star forming region covering fraction and the star formation rate surface density correlate with the HI surface density. However it remains unclear how HI is turned to stars and regulated by other physical properties. We believe that the coming large HI surveys will shed light on these questions.

**atomic hydrogen, galaxies formation, galaxy evolution, galaxy morphology**

**PACS:** 11.25.Tq, 04.70.-s, 04.50.Kd

**doi:** 10.1360/SSPMA2016-00340