

文章编号: 1000-8349(2004)04-0318-16

高速云研究进展

王向华, 林伟鹏

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 1963 年通过氢 21 cm 谱线观测发现了高速云 (HVCs), 40 多年来其起源一直是天文界争论的焦点之一。近几年通过高分辨率观测、理论模型和数值模拟, 对其中几类高速云及全天性的研究有了很大突破。主要介绍一些研究进展, 包括对新发现的两类致密高速云和高度电离高速云的总体性及个别性的观测研究; 对南天区最大的 MS 和北天区最大的 Complex C 的高分辨率观测; 唯一确定了 Complex A 的距离在 4~10 kpc 之间; 利用 H α 发射线对高速云的距离作了粗略的限制; 而在高速云内寻找恒星的努力都以失败告终。另外还简单介绍了一些试图解释高速云起源的理论模型和数值模拟。

关键词: 天体物理学; 高速云 (HVCs); 综述; 起源; 观测; 理论

中图分类号: P155 **文献标识码:** A

1 引 言

自 1963 年 Muller 等人^[1] 通过中性氢 21 cm 谱线发现高速云 (High-velocity clouds, HVCs) 以来, HVCs 的本质一直是个不解之谜。

所谓 HVCs 是一类特殊的中性氢云, 其视向速度不能用简单的银河系较差自转模型来描述, 通常以相对本地静止标准 (Local Standard of Rest, LSR) 的视向速度满足 $|v_{\text{LSR}}| \geq 90 \text{ km/s}$ 来界定^[2] (原则上, 用 v_{GSR} 来界定更科学, $v_{\text{GSR}} = v_{\text{LSR}} + 200 \sin l \cos b$, 其中 GSR 的全称为 Galactic Standard of Rest, l 和 b 分别为银经和银纬, 但这会增加额外的不确定性, 所以还是采用 v_{LSR})。HVCs 覆盖了全天约 30%~40% 的区域^[3], 其分布如图 1。40 多年来已观测到约 300 多个 HVCs, 其命名由于历史原因没有统一的规则。图 1 中, Complex A、Complex B 和 Complex C 是第一次巡天时发现的 3 个主要区域^[4]; Complex M (Mathewson 和 Meng)、Complex WA-WD (Wannier) 等是以其发现者命名的; Complex H (Hulsbosch) 是以对其做过详细研究的研究者名字命名的; 麦哲伦云流 (Magellanic Stream, MS) 明显与大麦哲伦云 (LMC)

收稿日期: 2004-03-23; 修回日期: 2004-05-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10203004、10173017); 上海市自然科学基金资助项目 (02ZA14093); 国家 973 资助项目 (G1999075402)

和小麦哲伦云 (SMC) 有关; 还有一些依据其在天空中的位置命名的, 如 Complex ACHN 与 ACVHV 在反银心方向、Complex GCN 与 GCP 在近银心方向。人们对 HVCs 研究的兴趣主要来自于它反常的观测特性^[5]: 径向速度有正、有负, 最大 $v_{\text{LSR}} = -464 \text{ km/s}$; Complex C 与 MS 覆盖了上千平方度的天空, 而其他的 HVCs 则覆盖几度或更小的区域; 内部速度弥散很小; 金属含量大多低于太阳金属丰度。

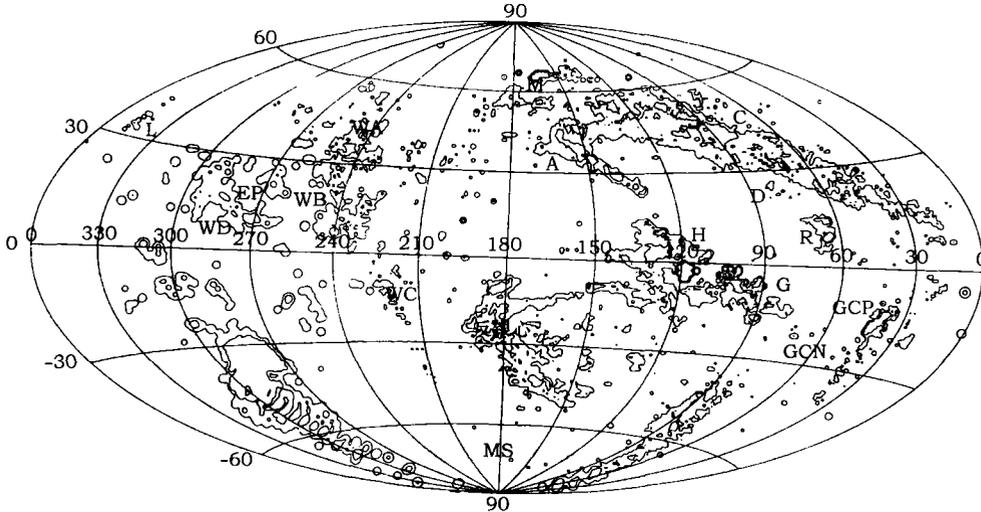


图 1 HVCs 的全天分布^[5]

对于单个 HVC 给出了根据氢柱密度画出的等高线。

近几年, 随着哈勃空间望远镜 (HST)、紫外空间探测器 (FUSE)^[6] 的观测以及 LDS (Leiden/Dwingeloo Survey)^[7]、HIPASS (HI Parkes All-Sky Survey)^[8]、2MASS (Two Micron All-Sky Survey)^[9]、SDSS (Sloan Digital Sky Survey)^[10] 巡天项目和其他地面射电、光学等望远镜观测的进行, 有关 HVCs 的研究进入了一个崭新的阶段。早期的综述请参阅 Wakker 和 van Woerden^[11] 一文 (包括最近没有太大进展的内容, 例如, HVCs 的小尺度结构、内部速度结构、时间尺度、尘埃含量、磁场、X 射线观测、CO 观测等)。这里重点介绍目前的一些研究进展, 包括: 孤立致密 HVCs (Compact HVCs 或 CHVCs) 性质的探讨及河外探测; Complex C 的金属丰度 (约 $0.1 Z_{\odot}$); 高度电离 HVCs 的研究; 对 Complex A 第一次比较精确的距离测定 ($4\sim 10 \text{ kpc}$); $\text{H}\alpha$ 发射线观测对距离的限制; 巡天及在 HVCs 内寻找恒星; 观测与数值模拟的比较等等。第二节介绍几类 HVCs 的研究进展, 第三节讨论 HVCs 的起源, 第四、五节着重介绍距离测定和 HVCs 中恒星的搜寻, 讨论、总结和展望见第六节。

2 几类 HVCs 的研究进展

2.1 CHVCs

由于这类 HVCs 具有独特的性质, 把它们单列出来研究很有必要。Braun 和 Burton^[12] 从 LDS 巡天中选出了 65 个 CHVCs 进行分析, 揭开了 HVCs 研究的新序幕, 这类研究已经

成为 HVCs 研究的新亮点。Braun 和 Burton 总结并给出了 CHVCs 的物理和观测性质: 孤立的、角直径小于 2° ; 在本星系群参考系下以 100 km/s 的速度向本星系群中心下落; 典型距离约 1 Mpc , 大小为 15 kpc , 中性氢质量 (约 $10^7 M_\odot$) 与 (亚) 矮星系相当; 位置及运动学特征在许多方面与本星系群的其他星系类似; 在天空中均匀分布。然而上述研究受到观测空间分辨率、样本和模型的限制, 后续的全天、高分辨率研究进一步更新了 CHVCs 的观测性质及物理参数。

2.1.1 全天性研究

de Heij 等人^[13]综合了北天区 LDS 巡天^[14]与南天区 HIPASS 巡天^[15]的观测数据, 全天性地分析 \cup HVCs 各方面性质后得出结论: CHVCs 在位置和速度上是一类有别于其他 Complexs 和 MS 的 HVCs, 其柱密度低于 $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$; 典型角直径小于 1° 。另外 de Heij 等人还讨论了观测的选择效应, 认为含有暗物质的“mini-halo”模型能够很好地与观测符合; 而与观测符合最佳的模型为 CHVCs 最多约含中性氢 (HI) $10^7 M_\odot$, 其内部质量遵从斜率为 $-1.7 \sim -1.8$ 的幂指数分布, 数量在以银河系为中心 150 kpc 和以 M31 为中心 200 kpc 范围内呈高斯分布。

Westmeier 等人^[16]利用 Effelsberg 100 m 射电望远镜对 de Heij 等人与 Braun 和 Burton 提出的 11 个 CHVCs 进行了观测, 发现大多数 CHVCs 都不是球对称的, 其中 10 个具有复杂的形状, 说明 CHVCs 与外界包围的介质存在碰撞作用, 并由此认为 CHVCs 存在于银河系附近而不是分布于整个本星系群内, 其质量应该是 $10^5 M_\odot$ 量级, 大小约 1 kpc 。

2.1.2 高角分辨率观测研究

通过高角分辨率观测, 可以减少前景和背景污染, 研究 CHVCs 的内部结构。Braun 和 Burton^[17~19]从 65 个 CHVCs 中选出具有代表性的 6 个 CHVCs (分布范围广、 $-127 \text{ km/s} < v_{\text{LSR}} < +165 \text{ km/s}$ 、线宽 $6 \sim 95 \text{ km/s}$), 利用 WSRT (Westerbork Synthesis Radio Telescope) 射电望远镜进行了高角分辨率 (角秒量级) 观测研究。结果发现, 它们有许多共同之处: 具有一个或几个被温热晕包裹着的椭球状致密核球; 距离在 $0.5 \sim 1 \text{ Mpc}$ 之间; 可以用扁平盘自转模型描述, 自转曲线可以很好地与 NFW 模型^[20] (认为暗晕的物质密度分布 $\rho(r) \propto \frac{1}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2}$, 其中 r_s 为暗晕的特征半径) 给出的旋转曲线相符合; 暗物质质量为可见物质的 $10 \sim 50$ 倍; 典型质量约 $10^7 M_\odot$, 包括暗晕在内可达 $10^9 M_\odot$ 量级。其中一个 CHVC (CHVC 125+41-207) 的金属丰度为 $0.04 \sim 0.07 Z_\odot$ 。所有这些性质与本星系群中的一些小质量星系有着惊人的相似之处, 本星系群内估计含有 200 个这样的 CHVCs。de Heij 等人^[21]2002 年利用 WSRT 射电望远镜又对他们全天性研究中的另外 5 个 CHVCs 进行了高分辨率研究, 结果得到的结论基本与上述相同。

2.1.3 mini-halo 模型与暗物质探测

为了解释观测现象, 许多研究者都采用了 mini-halo 模型^[22]。该模型认为, HVCs 是一些独立的小暗晕而非是大星系的组成部分。Lewis 等人^[23]提出, 可利用相对较远、较亮天体的微引力透镜现象来证明暗物质的存在, 并指出, 如果 HVCs 太弥散就不能观测到微引力透镜现象, 但像 CHVCs 这样含有紧密内核的天体是有可能通过口径 4 m 以上的光学望远镜观测到该现象的。

也有不少研究者反对 Mini-halo 模型。Sternberg 等人^[24]采用球对称电离气体云模型 (即

气体云是压力约束、暗物质主导的,且处于流体动力学平衡状态),在 Λ CDM 宇宙学模型下对密度分布符合 NFW 模型和 Burkert 模型 (认为暗晕的物质密度分布 $\rho(r) \propto \frac{1}{(r+r_s)(r^2+r_s^2)^2}$, 其中 r_s 为暗晕的特征半径) 的两种情形分别做了数值模拟。经过分析得出: 如果 CHVCs 是河内的, 那么它的特征距离应为 150 kpc; 相反, 如果它是河外的, 其典型距离应 ≥ 750 kpc, 此时它的暗晕将非常稀薄, 典型的暗物质数密度 $\leq 0.08 \text{ cm}^{-3}$, 这比观测到的矮星系的相应值小很多。因此 Sternberg 等人支持 CHVCs 是河内天体的观点。

Maloney 和 Putman^[25] 对含有和不含有暗物质的电离球对称模型进行了数值模拟, 并与 HIPASS 巡天^[26] 结果进行比较。结果发现: 如果暗物质与气体的比例约为 10:1, 则 CHVCs 的典型距离约为 330 kpc。如果不含有暗物质, 则典型距离约为 1.5 Mpc; 假设星系暗晕密度分布符合 NFW 或 Burkert 模型^[27], 则 CHVCs 的距离约为 200 kpc, 这对 CHVCs 是河外天体的假说提出了挑战; 密度分布符合 NFW 分布的模型更可取; 包括暗物质在内, CHVCs 的质量约在 $5 \times 10^8 \sim 2 \times 10^9 M_\odot$ 之间; 模拟中只发现 16 个 CHVCs 而不是所期待的 250 个。由此可知 CHVCs 是否是河外天体还有待进一步研究。另外, 在 mini-halo 模型中 CHVCs 外面都有暗物质晕, 如果考虑气体是高度电离的 (气体总质量为中性氢的 20~30 倍) 以及暗物质与气体具有合理比例, 那么其总动力学质量将约为 $4 \times 10^{11} M_\odot$ 。这些质量会对本星系群的动力学过程起明显作用, 而且它们吸收线的总线宽会大大超过观测值。我们认为, HVCs 的总质量是否有这么大还不能肯定, 因为存在一些不确定性, 例如电离度的估计、HVCs 数目的估计、暗物质与气体的比例和 HVCs 质量分布函数的形式等, 所以下结论为时过早。

虽然 mini-halo 模型遭到一些反对, 但是它还是很有吸引力的。Mini-halo 是目前流行的逐级成团结构形成理论以及数值模拟中必然存在的天体, 它们含有气体, 理论上讲可以形成 HVCs。当然, mini-halo 模型若要发扬光大, 还需建立更合理的模式并通过更多的观测来证实。

2.2 Complex C

Complex C 是仅次于 MS 的第二大 HVC, 其距离和质量还不很确定, Wakker^[28] 认为它的距离约 5~20 kpc, 质量约 $(3\sim 50) \times 10^6 M_\odot$ 。Complex C 覆盖了 1600 多平方度的北天区^[29], 并以平均约 -130 km/s 的速度向银河系下落。其分布结构如图 2 所示, 主要由 5 部分组成: CIA、CIB、CIC 和 CIHA、CIIB、CIIC 两部分, 由 Giovanelli 等人^[30] 命名; CeI~CeV, 随后被命名, 核心位于 $l = 68^\circ, b = 38^\circ$ 的 CeI, 曾被 Giovanelli 等人命名为“C-extension”; Complex D, 由 Wakker 和 van Woerden^[31] 命名, 它附近的核心“CD”在 $l = 90^\circ, b = 34^\circ$ 处, $v_{\text{LSR}} < -150 \text{ km/s}$; 核心 CK, 在 $l = 75^\circ, b = 37^\circ$ 处, $v_{\text{LSR}} \approx -90 \text{ km/s}$ 。

近几年对 Complex C 的研究主要集中在对其金属丰度的观测及其形成的数值模拟上。

2.2.1 金属丰度

由于缺少与星系相互作用的证据和距离的限定, 许多学者利用视线方向 AGNs 的吸收线来研究 HVCs。研究 HVCs 中气体的金属丰度有助于了解其起源: 如果它的金属丰度比较低, 为 $0.1\sim 0.3 Z_\odot$ (考虑尘埃结晶^[33], 即 dust depletion), 则有可能是晕中的气体或者河外的小暗晕中气体; 如果金属含量高, 与太阳丰度相当, 那么就可能是“星系喷泉”中的气体或与星系盘相关的气体。Wakker 等人^[29] 首次以此方法, 利用赛弗特 1 型星系 Mrk 290 光谱中的对应吸收线, 得出 HVCs 的金属丰度为 $0.1 Z_\odot$ 。之后许多人发现 HVCs 的金属丰度在

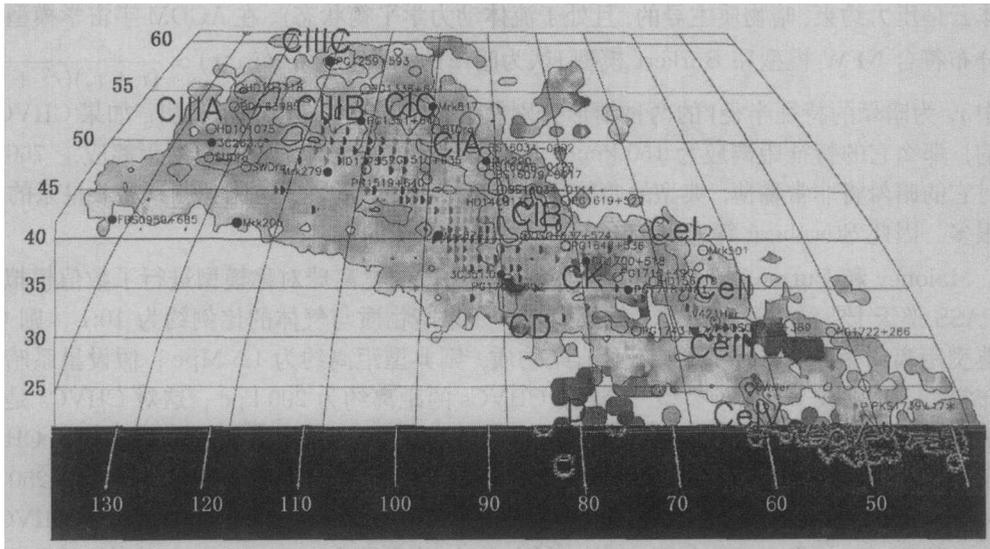


图 2 Complex C 分布结构图 [32]

横坐标为银经, 纵坐标为银纬。等高线分别对应亮温度 0.05、0.4、1.0 K。图中给出了不同核心的位置、背景的 AGNs 及恒星的位置。

各个视线方向上是不同的。Gibson 等人 [34] 从 5 个视线方向对其做了研究, 发现在 Mrk 290 方向 $[S/H] = -1.05 \pm 0.12$, 这支持了 Wakker 的结论; 然而随着视线方向的不同, $[SII/HI]$ 在 $-1.10 \sim 0.48$ 之间, 这可能是盘气体的污染造成的。Murphy 等人 [35] 利用 FUSE 对赛弗特 1 型星系 Mrk 876 视线方向的观测, 发现 HVCs 的 FeII 丰度是太阳的 0.5 倍。Richter 等人 [36,37] 通过对类星体 PG 1259+593 视线方向的研究得出: 高速云 Complex C 的金属丰度约为 $0.1 Z_{\odot}$ ($[O/H] = -1.03^{+0.37}_{-0.31}$), 估计它是正在往银河系中心下落的低金属丰度气体云。同样 Collins 等人 [38] 综合 FUSE 和 HST 数据, 从 8 个视线方向进行研究, 结果发现: Complex C 不能用单一的金属丰度来描述, 它在不同视线方向上的金属丰度差别很大; 由 $[OI/HI]$ 得到的金属丰度为 $0.1 \sim 0.25 Z_{\odot}$ 之间, 而用 $[SII/HI]$ 得到的金属丰度在 $0.1 \sim 0.6 Z_{\odot}$ 之间; 某些部分的金属丰度比以往所认为的值高, 说明它可能是“星系喷泉”与低丰度气体云的混合体; $[S/O]$ 和 $[Si/O]$ 与太阳的值相当, 说明尘埃很少或没有; α 元素的增丰说明它可能与 II 型超新星爆发星风有关。Tripp 等人 [39] 通过分析 HST 上的成像摄谱仪 (STIS) 在类星体 3C351 方向的观测, 发现 Complex C 是一块低金属丰度气体云, 它正在向银盘下落并开始与银河系周围气体发生相互作用。随后 Fox 等人 [40] 又通过 HST 和 FUSE 的观测在 5 个视线方向进行了研究, 指出 Complex C 被高度电离的气体包围着, 并且认为这些高度电离气体是 Complex C 与外面温度 $T \geq 10^7$ 的热介质相互作用的结果。

2.2.2 数值模拟

1972 年 Davies [41] 在对银河系外旋臂结构进行观测研究时提出, Complex C 可能是 LMC 与外旋臂作用形成的。为检验这一观点, Kawata 等人 [42] 进行了一系列高分辨率 N 体数值模拟, 他们采用银河系 (含有核球、盘、暗晕) 与矮星系相互作用的模型, 发现一个跨度由南向北穿过银河系、质量与 LMC 相仿 (约 $3 \times 10^{10} M_{\odot}$) 的矮星系在距银河系中心约 15 kpc 处, 可

以产生空间分布、运动学性质、柱密度都与 Complex C 相似的天体。但 Gardiner 和 Noguchi^[43] 认为, LMC 不可能在距银心 15 kpc 内穿过银盘 (其轨道的近银心距为 45 kpc)。到目前为止还没有任何观测证明有这样的矮星系存在。Kawata 等人认为, 除非有两种可能: 一是由于银河系核球将其挡住而不能被观测到; 二是它不含有可被探测到的重子物质, 否则 Complex C 必是矮星系与外旋臂作用后的产物。另外 Bekki 和 Freeman^[44] 的数值模拟表明, 旋转的三轴暗晕可以导致盘气体向高纬度延展。Kawata 等人认为这一模型能够解释 Complex C 是银河系外旋臂的一部分。

2.3 高度电离 HVCs

高度电离 HVCs 的研究可以用来弄清气体的电离机制 (光致电离或碰撞电离) 及其所处的环境。Sembach 等人^[45,46] 在利用 HST 研究银河系暗晕中的气体时, 发现了 4 个具有高度电离性质的 HVCs。他们在 Mrk 509 和光学激变星系 PKS 2511-304 方向上分别发现了两个 HVCs 具有很强的 CIV 吸收线, 但其 CII 与 SiII 吸收线和氢 21 cm 发射线都很弱。同时 Sembach 等人还发现星系际紫外光电离模型比碰撞电离模型能够更好地与观测结果相符。FUSE 卫星上天使得 HVCs 观测有了新的进展。由于 FUSE 的观测波长范围在 912~1187 Å 之间, 而 OVI 的两条谱线 (1031.926 Å 和 1031.617 Å) 恰好落在上述观测范围内, 因此随后的研究主要集中在 OVI 的吸收线上。2003 年 FUSE 完成了对河外 100 个 UV 波段较亮天体的 OVI 吸收线的观测^[47~49], 并发现在 138 个方向上的观测有 83 个方向存在吸收线, 共有 117 个天体含有 OVI 成分。

最近, 在 PKS 2155-304 和 Mrk 290 方向上, Collins 和 Shull^[50] 综合了 HST/STIS 与 FUSE 的观测数据, 对 Sembach 等人发现的 4 个高度电离 HVCs 作了 OVI 吸收线以及硅 (SiII/III/IV) 和碳 (CII/III/IV) 柱密度的研究。结果得出了许多与 Sembach 等人不同的结论: 确认了 3 个高电离 HVCs, 而另一个 CII、SiII 较低。高度电离的原因与星系和暗晕相互作用有关, 说明高、低电离 HVCs 的起源可能不同; 如果认为高度电离 HVCs 位于暗晕中 ($d < 50$ kpc), 则 UV 光子光致电离模型则对 OVI 的估计过低; 即使采用星系际紫外光背景 (由 QSOs 和 AGN 贡献) 模型也不能与观测相符; 而采用 OVI 离子由碰撞电离产生、其他离子由星系际光子场电离产生的模型, 则与观测较为相符; 观测到的柱密度与 Complex C 比较 (见表 1) 得出 $N(\text{OVI})/N(\text{CIV})$ 差别很小。而 Fox 等人^[40] 认为 Complex C 的 OVI 是由于内核与外界包围

表 1 活动星系核 PKS 2155-340 和 Mrk 509 方向上的 4 个高度电离 HVCs 与 Collin 等人在类星体 PG 1259+593 方向上得出的 Complex C 不同成分的柱密度对数比^[50]

	PKS 2155-304		Mrk 509		Complex C
	-140 km · s ⁻¹	-270 km · s ⁻¹	-240 km · s ⁻¹	-300 km · s ⁻¹	
$N(\text{HI})/N(\text{OVI})$	$2.57^{+0.22}_{-0.14}$	$1.67^{+0.38}_{-0.23}$	< 3.80	< 3.76	$6.38^{+0.05}_{-0.05}$
$N(\text{OI})/N(\text{OVI})$	< -0.40	< -0.05	< -0.42	< -0.31	$2.21^{+0.19}_{-0.25}$
$N(\text{SiII})/N(\text{SiIV})$	$0.07^{+0.14}_{-0.13}$	< 0.51		< -0.44	$2.03^{+0.22}_{-0.20}$
$N(\text{CII})/N(\text{CIV})$	$0.36^{+0.11}_{-0.08}$	< -0.56	< -0.38	$-0.44^{+0.11}_{-0.09}$	
$N(\text{CIV})/N(\text{SiIV})$	$0.74^{+0.08}_{-0.09}$	$1.30^{+0.12}_{-0.16}$	> 1.04	$0.62^{+0.21}_{-0.15}$	$0.59^{+0.12}_{-0.15}$
$N(\text{CIV})/N(\text{NV})$	> 0.40	> 0.47	> 0.45	> 0.91	> 0.07
$N(\text{OVI})/N(\text{CIV})$	$0.32^{+0.05}_{-0.05}$	$0.00^{+0.06}_{-0.07}$	$0.36^{+0.06}_{-0.07}$	$-0.22^{+0.11}_{-0.09}$	$0.31^{+0.08}_{-0.09}$

注: 表中的速度为 4 个 HVCs 的下落速度。

着的热介质相互作用形成的, 所以这 4 个高度电离 HVCs 的 CIV 与 OVI 的产生机制可能与 Complex C 相同。

2.4 麦哲伦云流 (MS)

MS 是所发现的最大的 HVC, 它含有约 $2 \times 10^8 M_{\odot}$ 的中性氢, 覆盖了大约 $100^{\circ} \times 10^{\circ}$ 南方天区 [51]。1974 年 Mathewson 等人 [52] 首先发现了它的大尺度结构, 并将其命名为 MS。他们将 MS 分成 6 部分: MSI~MSVI, 其在银道坐标系中的分布如图 3 所示。MS 是迄今为止唯一知道其起源与 LMC、SMC 有关的 HVC, 近几年对它的研究进展主要是结构的观测研究与数值模拟。

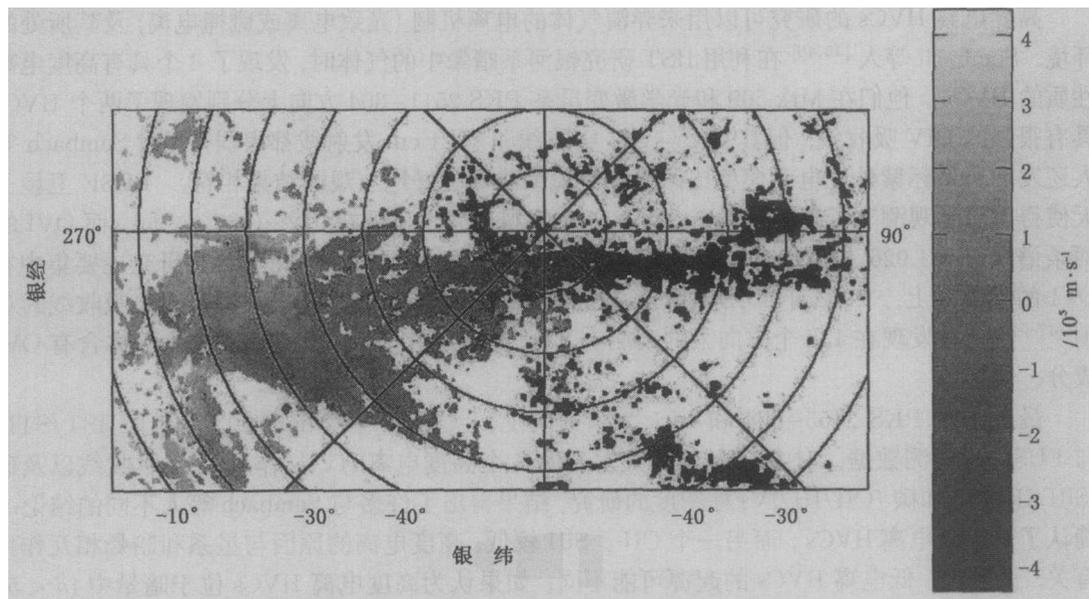


图 3 MS 速度分布图 [53]

灰度变化表示以图右灰度标尺为标准的速度, 从 $v_{\text{LSR}} = -380 \text{ km/s}$ (黑) 到 $v_{\text{LSR}} = +450 \text{ km/s}$ (灰)。

2.4.1 观测

Wakker 等人 [54] 在赛弗特 1 型星系 NGC 3783 方向对 WW 187 (HVC 287+23+240) 进行了观测。他们依据模型推断 WW 187 是 MS 导臂的一部分, 这支持了 MS 形成假说的潮汐模型 (见第 3 节)。Stanimirovic 等人 [55] 利用 Aricibo 射电望远镜对 MS 的 MSV 和 MSVI 两个子结构作了氢 21 cm 发射线研究, 发现 MS 的束缚机制不可能是引力束缚或自由膨胀, 最可能来自银晕热气体的压力。最近 Putman 等人 [53] 通过 HIPASS 对 MS 及其周围环境完整的观测数据研究, 揭示了 MS 的一些显著特征: 沿主 MS 方向分成两支; 头尾结构; 头部复杂的网状结构。另外, 对 MS 金属丰度的研究表明, 它与 LMC、SMC 密切相关。Lu 等人 [56] 在 NGC 3783 方向得出 (SII/HI) 是太阳金属丰度的 0.25 ± 0.07 倍; Gibson 等人 [57] 在 Faira 119 方向得到 (SII/HI) 是太阳金属丰度的 0.33 ± 0.05 倍, 这些结果与当今 LMC、SMC 的观测值基本一致。

2.4.2 数值模拟

Maddison 等人 [58] 根据 Kawata [59] 提出的 TreeSPH 算法, 采用银河系与 LMC、SMC

合并的模型进行了数值模拟，发现潮汐力将 SMC 外围一部分气体拉出，形成一个与观测相似的纯气体 MS。这一结果支持了 MS 形成的潮汐模型。Mastropietro 等人^[60]采用银河系与 LMC 相互作用的模型进行 N-Body/SPH 数值模拟，发现暗晕中电离气体的碰撞压力足以将 $1.4 \times 10^8 M_{\odot}$ 的气体从 LMC 的星系盘上移走而形成与 MS 相似的气体云。最近 Connors 等人^[61]运用高分辨率 N 体数值模拟，发现 1.5×10^9 yr 前银河系与麦哲伦云相互作用形成 MS， 0.2×10^8 yr 前 LMC 与 SMC 相互作用形成 MS 现在的内部结构。

2.5 其他 HVCs

2.5.1 Complex A

Complex A 是首次被发现的 HVCs 之一，也是迄今为止唯一一距离相对确定的 HVC。如图 4，它包含 7 部分：AI~AVI 和 B。它的许多特性被认为是所有 HVCs 的共同特征：高纬度、容易与星系气体区分的高速度、线性结构、具有容易确定的内核。

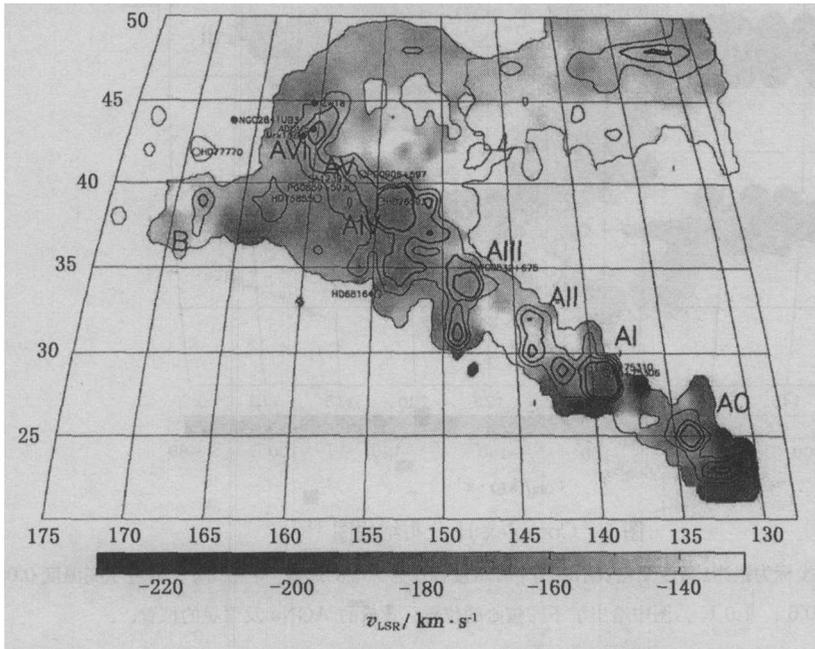


图 4 Complex A 分布结构图^[32]

横坐标为银经，纵坐标为银纬，灰度变化为以图下边灰度标尺为标准的速度变化，等高线分别对应亮温度 0.05、0.3、0.6、1.0 K。图中还给出了不同核心的位置、背景的 AGNs 及恒星的位置。

Wakker 等人^[62]根据在塞弗特 1 型星系 Mrk 106 方向有强的 MgII 吸收线而在恒星 PG 0859+593 和 PG 0906+597 方向没有，以及这两个方向 HI 发射线强度基本一致这两个观测事实，得出 Complex A 的距离下限为 (4 ± 1) kpc (银盘高度 $z > (2.5 \pm 0.6)$ kpc)。van Woerden 等人^[63]又利用大熊星座天琴 RR 型变星 AD Uma ($d = (10.1 \pm 0.9)$ kpc) 方向上的 CaII 吸收线，得出 Complex A 的距离上限为 (10 ± 1) kpc，并由此推出其质量在 $(1.5 \sim 10) \times 10^5 M_{\odot}$ 之间。由于缺少 UV 背景恒星，Complex A 的金属丰度还不很确定。Wakker^[64]认为它的 OI 丰度为太阳金属丰度的 0.05~0.1 倍，当然这也存在着很大的不确定性。

2.5.2 Complex H

Complex H 位于银盘上, 所以可以通过较亮的 O、B 型恒星对其进行探测。Complex H 的结构如图 5 所示, 中间最亮的核心距离 $d > 5$ kpc, 由此推出其质量 $> 10^6 M_{\odot}$ [64,65]。Lockman [66] 在对 Complex H 的氢 21 cm 发射谱线观测研究后认为, Complex H 是轨道逆行的银河系卫星天体。观测发现其小尺度结构与 MS 有许多相似之处, 而且推断它正与银河系暗晕或银盘的一部分发生相互作用。Lockman 建立了一个逆行圆轨道、轨道平面与银盘成约 45° 且银心距 $R = (33 \pm 9)$ kpc 的模型, 并发现由这个模型得到的 Complex H 结构与观测到的 Complex H 结构能够很好地符合。

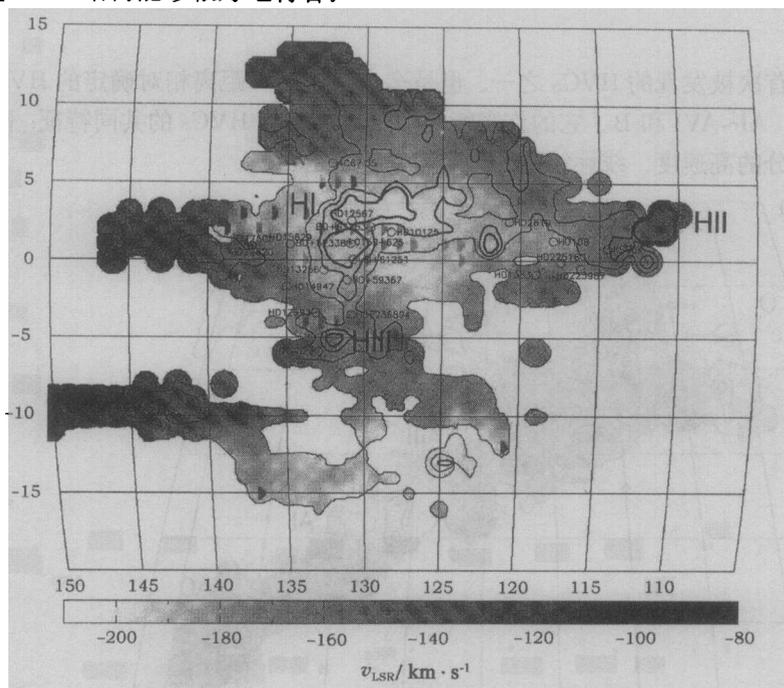


图 5 Complex H 分布结构图 [32]

横坐标为银经, 纵坐标为银纬。灰度变化表示以图下方灰度标尺为标准的速度, 等高线分别对应于亮温度 0.05、0.3、0.6、1.0 K。图中给出了不同核心的位置、背景的 AGNs 及恒星的位置。

近来对 HVCs 的研究主要集中在以上几类。可以看出, 虽然 HVCs 的研究取得了显著成果, 但还有诸多问题有待解决, 所以未来几年仍是天文学研究的焦点之一。

3 起源之争

HVCs 的发现尽管已经有 40 多年, 但由于观测手段的限制, 人们对它的许多物理性质还知之甚少, 而对其起源更是众说纷纭。Wakker 和 van Woerden [11] 分析了大量 HVCs 形成假说, 总结出最主要的几种: 星系喷泉、银河系外旋臂的延展部分、星系吸积物质、麦哲伦云相互作用。此外, 还有一些研究者提出 HVCs 是小暗物质晕 (mini-halo) 中气体的观点, 例如前面提到的 CHVCs。

3.1 星系喷泉

1976 年 Shapiro 和 Field^[67] 首次提出“星系喷泉”概念, 1981 年 Kahn^[68] 给出了第一个解析模型, 之后许多研究者对其作了进一步完善^[69,70]。星系喷泉的基本原理是: 星系盘上的超新星爆发将盘上的气体吹到一定高度后冷却回落到盘上。与星风不同, 这个过程没有质量损失。尽管许多二维模拟在不同程度上证实了一些理论模型, 但仍存在严重不足^[71~73], 直到 de Avillez^[74~77] 对星系喷泉的演化作了一系列三维数值模拟, 这一状况才有所改观。三维模拟结果表明: 喷泉开始于星系盘高度 $Z = 1\sim 1.5$ kpc 的地方, 而不是星系盘中心平面处 ($Z = 0$ kpc); 根据模型可以得出, 这些气体最高可到达 $Z = 10$ kpc 处; 气体冷却下落形成的气体云大小从几 pc 到几百 pc; 下落气体在 Z 方向的最大速度大部分在 $20\sim 90$ km/s 之间, 少部分小于 20 km/s, 大于 90 km/s 的则更少 (约 5%), 下落速度最大可达 -300 km/s; 不同速度的云内部速度弥散约为 20 km/s; 大部分云形成于 $Z = 1\sim 2$ kpc 处; 在更高 Z 的地方, 由于冷却时标变长而只有很少的 HI 云形成; 由于数值模型只能延伸到 $Z = \pm 4$ kpc 处, 所以很难对 Z 较大处的 HVCs 数目作出估算。上述结果很好地解释了一些 HVCs 的起源。

然而, 依据星系喷泉模型的推断, HVCs 的金属丰度应该大致与太阳丰度相当, 这就不能解释那些观测到的比太阳金属丰度低的 HVCs (考虑尘埃结晶的影响), 因此这个模型并不能揭示所有 HVCs 的起源。

3.2 星系形成的材料

经过分析前人模型的不足、总结大量观测并结合当今宇宙学理论, Blitz 等人^[5] 提出 HVCs 是本星系群形成的残余物质的观点, 并且给出了其基本性质: 典型直径为 25 kpc、距离星系中心约 40 kpc; 正在向本星系群下落; 含有 $3 \times 10^7 M_{\odot}$ 中性气体和 $3 \times 10^8 M_{\odot}$ 的暗物质; 本星系群所有 HVCs 约含有 $10^{10} M_{\odot}$ 的中性气体。此外, 较远的 HVCs 是向本星系群下落的气体而且被暗物质晕包围着, 星系喷泉不能解释 HVCs 的起源。Blitz 等人还给出了一些可以被观测证实的理论预言: 金属丰度比太阳低的 HVCs; $H\alpha$ 发射线强度比 MS 低的 HVCs; 能够通过吸收线和发射线来观测其他星系群中的 HVCs。

当然, 这个模型也面临观测的挑战。Zwann 和 Briggs^[78] 指出, 在 Arecibo 射电望远镜对 14 个星系群中 300 多个星系的巡天中, 并没有找到类似 HVCs 的天体。他们认为 HVCs 离星系中心的典型距离应 ≤ 200 kpc, 暗物质含量应达 98% 或更高 (就是说气体很少)。

3.3 麦哲伦云流 (MS)

关于 MS 的起源有两种假说: 一种是潮汐尾模型^[79~81], 认为 LMC 与 SMC 是相互绕转的双星系系统。在 $1.5\sim 2$ Gyr 前它们有过近接触 (相距 7 kpc), LMC 对 SMC 的潮汐力使得 SMC 的一部分被拉出形成 MS; 0.2 Gyr 前的第二次近距离接触形成了 MS 现在的内部结构。另一种是压力碰撞模型, 它有两种观点^[82]: 一种认为是弥散的星际热气体对麦哲伦云外部作用使麦哲伦云内部速度分布改变; 而另一种观点认为是麦哲伦云内部气体与晕中冷气体的碰撞使麦哲伦云内部气体减速。两种起源假说的主要区别在于^[83]: 潮汐尾模型预言 MS 具有“导臂与尾”的结构和可能存在恒星, 而压力碰撞模型预言没有这些特征。麦哲伦云流中导臂的发现支持了潮汐模型^[84], 但 HIPASS 项目^[85] 的高分辨率观测仍不能证明哪一个模型更正确。

对于 HVCs 的起源, 除了共同认为 MS 的形成与麦哲伦云有关外, 其他的形成机制仍在争论之中。

4 H α 发射线与距离的测定

从近几年对 HVCs 的研究可以看出, 距离的不确定性是起源探讨中存在的一个主要问题。大多数物理量都与距离 d 有关(可观测是角直径), 例如大小 ($\propto d$)、质量 ($\propto d^2$)、压力 ($\propto d^{-1}$), 只有温度与它无关。可见, 要想研究 HVCs 的起源、物理特性、结构特征等一系列性质, 距离的确定是最基本也是最重要的。距离的限定方法有多种, 例如前面已经提到的吸收线方法。该方法通过分析类星体视线中的吸收线成分以及已知距离的恒星有无吸收来限定距离(给出上、下限)。利用光学发射线(主要是 H α 发射线)对距离的限制也是粗略确定 HVCs 距离的主要方法之一。其原理是: 如果 HVCs 在银晕里, 则银盘发出的光子先将其表面电离, 再复合发射, 进而产生可以被探测到的 H α 线; 如果 HVCs 在河外, 由宇宙背景光子电离产生的 H α 线很弱而不能被探测到; 因此, 通过建立与观测较为符合的模型即可粗略判断 HVCs 的距离。迄今已有约 20 个 HVCs 被探测到有 H α 发射线, 其中包括 Weiner 和 Williams^[86] 探测到的 MS; Tuftte 等人^[87] 观测到的 Complex A、Complex C、Complex M; Bland-Hawthorn 等人^[88] 观测到的 Complex GP; Tuftte 等人^[89] 观测到的 4 个 CHVCs; Weiner^[90] 观测到的 Complex L、Complex AC、Complex GCN 等。Weiner 等人^[91] 认为, HVCs 的 H α 发射线形成于银河系年轻恒星的紫外光子对氢的电离复合, 他们得出这类 HVCs 距银河系中心 5~30 kpc。图 6 是当今不同观测者得到的 HVCs 流量, 其单位为 mR (R 为 Rayleigh, 1 mR = $2.41 \times 10^{-7} \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$)。图 7 为 Weiner 等人依据模型得到的距离 - 流量关系, 其直线的斜率为 -2.2。

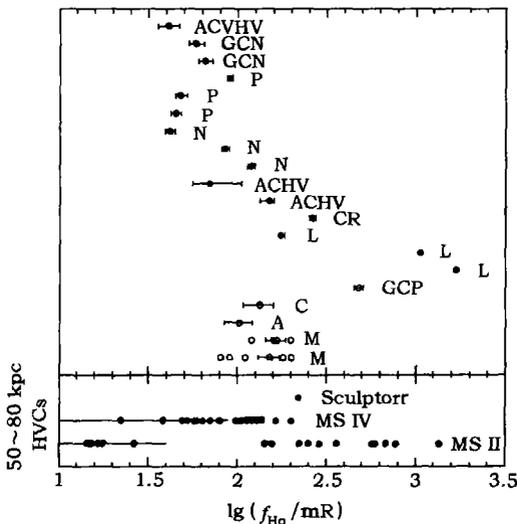


图 6 不同观测者得到的 HVCs 流量^[91]

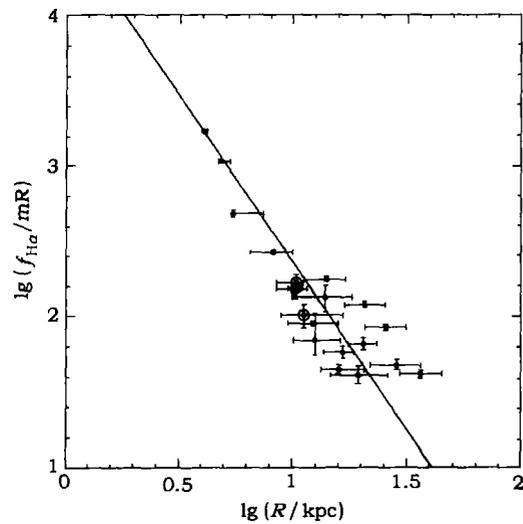


图 7 HVCs 流量与距离的线性关系^[91]

MS 在 LMC 与 SMC 附近(约 50 kpc)有很强的 H α 发射线, 这显然与只考虑银河系光子光致电离而产生 H α 发射线的模型矛盾。Weiner 认为需要考虑其他机制, 例如暗晕中气体与 MS 碰撞使其电离的机制。

Putman 等人^[92]利用 AAT (Anglo-Australian Telescope) 和 WHT (William Herschel Telescope) 的观测, 对一些 HVCs 作了 $H\alpha$ 光谱研究。他们发现 Complex L、Complex M、Complex H、Complex GCP、Complex A、Complex C、MS 和两个 CHVCs 都有 $H\alpha$ 发射线, 其流量在 30 mR 至约 640 mR 之间。图 8 为这些 HVCs 在银道坐标系中的分布。

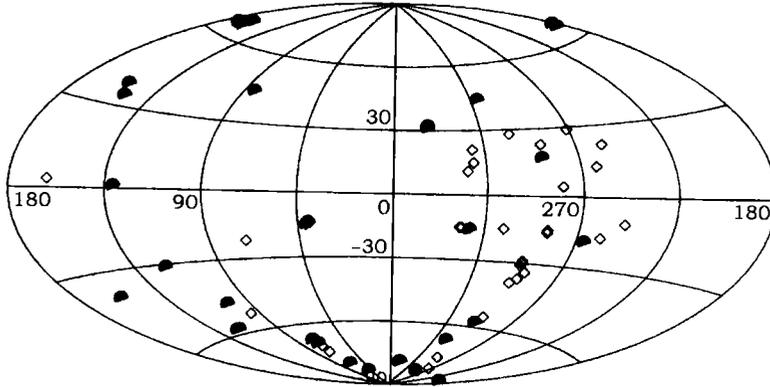


图 8 一些 HVCs 在银道坐标系中的分布^[92]

实心为观测到有 $H\alpha$ 发射线的 HVCs, 空心为未观测到有 $H\alpha$ 发射线的 HVCs。

Putman 等人还发现, 观测到的 $H\alpha$ 发射线流量与 Bland-Hawthorn 和 Maloney^[93,94] 建立的“盘 - 暗晕”模型能够符合较好。这个模型考虑 5 个基本组成: 由旋臂上 OB 星族组成的星系盘; 星系棒; 热的暗晕; LMC、SMC; 宇宙背景。依据这个模型, Putman 等人认为具有 $H\alpha$ 发射线的 HVCs 的银心距应小于 40 kpc。但这并不是说没有探测到 $H\alpha$ 发射线的 HVCs 的银心距就要大于 40 kpc, 如果银河系内的 HVCs 的观测角度很低, 或没有位于旋臂上方, 或没处在 HII 区, 则都有可能观测不到 $H\alpha$ 发射线。他们还猜测, MS 具有强 $H\alpha$ 发射线的原因, 除光致电离外, 还可能是与暗晕气体相互作用以及 MS 有恒星伴随有关。

可见, $H\alpha$ 发射线对距离的限制虽然有很多不确定性, 但在几乎所有 HVCs 的距离都不确定的今天, 它仍是我们初步了解 HVCs 性质的有效工具之一。

5 寻找恒星成分

如果能在 HVCs 中探测到有恒星存在, 那么无论是距离还是其他性质都可以通过研究其恒星而得到直接或间接的答案, 这对于揭示它们的起源也大有裨益, 所以人们在这方面做了不少观测。当今在星系形成与演化研究中普遍采用逐级成团的结构形成模型, 而数值模拟得到的本星系群的子结构数目比观测到的矮星系要多很多^[95,96], 猜测一些 HVCs 是某些子结构中的气体是解决这个问题的众多方法之一。假如这一猜测属实, 那么这类 HVCs 中可能有恒星存在、恒星正在形成, 或有恒星演化后期产物存在。

Simon 和 Blitz^[97]利用 POSS (Palomar Observatory Sky Survey) 巡天, 在北天区 264 个 HVCs 周围 1 平方度的范围内寻找矮星系。他们首先依次去掉前景的恒星污染, 然后用二维多项式拟合方法消除成像底片边缘的模糊现象, 最后在矮星系大小尺度上进行滤波 (filter),

以增强低表面亮度天体 (Low Surface Brightness, LSB) 的对比度。在这 264 个 HVCs 周围共发现有 60 个 LSB 天体存在, 但在后续的观测中没有发现一个矮星系。Willman 等人^[98]利用 SDSS 巡天数据对 325 平方度天空中的 13 个 HVCs (包括一个 CHVC) 进行探测, 结果在探测极限内也没有发现 HVCs 伴随有任何恒星成分。

最近 Hopp 等人^[99,100]利用 8.2 m VLT 光学望远镜和 2MASS 巡天数据, 对 5 个由 Effelsberg 射电望远镜探测到的 CHVCs 进行了搜寻恒星的研究。他们先用 VLT 在 V (视星等极限为 25~26) 和 I 波段 (视星等极限为 23~24) 对 5 个 CHVCs 中心区域进行观测, 结果没有找到恒星; 然后又根据 2MASS 数据在 3 个近红外波段 (视星等极限 $J = 15.8$, $H = 15.1$, $K_s = 14.3$) 在其中 4 个 CHVCs 周围半径 1° 的范围内寻找, 仍没有发现有任何星族成员星存在。红巨星 (RGB) 在 V、I 波段易被探测到, 演化处于渐进巨星支阶段的恒星 (AGB) 在近红外波段也容易被探测到。VLT 可以探测到 2 Mpc 远处的 RGB, 2MASS 则可以探测到 300 kpc 远处的 AGB。然而, 无论在 HVCs 的中心还是周边区域都没有探测到恒星, 因此 Hopp 等人推断这 5 个 CHVCs 中含有恒星的几率微乎其微。

鉴于寻找恒星的努力都以失败告终, HVCs 中是否存在恒星仍然是个不解之谜, 需要更多观测的进一步证实。

6 讨论与展望

HVCs 的起源研究给人们提出了很多问题: 如果证明某类 HVCs 是宇宙学尺度上的物体, 那么它们所对应的天体应该是什么? 在有些河外星系中可能已经探测到 HVCs (见 Wakker 和 van Woerden 的综述^[11]及其引文), 那么存在 HVCs 是否是河外星系的普遍现象? HVCs 的外面是否有暗物质? 它们的总质量对动力学有无重要的影响? 如果河外星系周围也存在类似 HVCs 的天体, 那么它们对类星体吸收线应该有贡献, 贡献有多大? 它们对类星体吸收线系统的运动学分析影响又有多大? 也许在类星体的光谱中存在 HVCs 引起的吸收线, 只是还没有确认。最近 Charlton 等人^[101]的模型计算表明, HVCs 不足以解释观测到的 MgII 和 Lyman Limit 吸收线系统, 它们可能不是星系群中下落的物体, 当然这里还有很多不确定性。如果高红移星系中或其周围也存在类似 HVCs 的物体, 而且这些物体往星系中心下落, 那么它们对星系形成与演化过程就存在重要影响。反之, 如果 HVCs 被证明是银河系暗晕内的物体, 那么它们中至少有一些是正在往银心下落的冷气体云, 它们外面包着一层热气体。这些云中是否有恒星形成? 如果没有, 为什么? 这些 HVCs 是否是以前一些模型 (包括中央星系盘、含有气体云的暗晕、卫星星系)^[102,103]所预言的云? 近来提出的压力约束云模型^[104]是否能够很好地与观测符合? 以上这些问题都非常有趣, 值得深入研究。

总之, 随着巡天与地面探测手段的发展, 无论是整体还是个别, 对 HVCs 的研究取得了丰硕的成果, 当然也存在诸多问题。例如, HVCs 属于河内还是河外天体还没有定论, 但无论它们是河内还是河外天体, 对于研究星系形成演化过程都很重要。同时试图用一种机制来解释所有的 HVCs 起源势必以偏概全。目前该领域进展最快的是对 CHVCs、MS、Complex C 和高度电离 HVCs 的研究, 无论观测还是理论模型上对这几类 HVCs 的距离、金属丰度、结构等性质都有了基本的了解。在所有 HVCs 中只有 Complex A 的距离被相对准确地确定在

4~10 kpc 之间, 而其他 HVCs 的距离都还没有定论。利用光学发射线 (主要是 H α 发射线) 对 HVCs 距离作出限制是了解其性质的重要方法之一。如果 HVCs 内含有恒星, 那么就可以通过对这些恒星的研究来得到许多有价值的信息, 但目前在 HVCs 中还没发现有恒星存在。

HVCs 的观测研究不仅对研究本星系群的形成与演化乃至整个宇宙的演化有着重要的作用, 而且还可以对星系形成与演化模型提出限制。例如, 在目前流行的等级成团结构形成理论中, 数值模拟得出本星系群的子结构数目远多于观测到的矮星系, HVCs 或一部分 HVCs 是这些迷失的子结构的观点似可解释这一现象, 当然还须有进一步的观测和理论支持。

在未来的几年中, HVCs 距离的确定仍是一个主要问题, 同时金属丰度也是一个主要研究领域, 这些都是确定 HVCs 起源的基本依据。随着观测仪器的建造与改进、巡天探测技术的发展和观测水平的提高, 人们一定能揭开 HVCs 的起源之谜。

参考文献:

- [1] Muller C A, Oort J H, Raimond E C R. *Acad. Sci. Paris*, 1963, 257: 1661
- [2] Wakker B P. *A&A*, 1991, 250: 499
- [3] Lockman F J, Murphy E M, Petty-Powell S *et al.* *ApJS*, 2002, 140: 331
- [4] Hulsbosch A N M. *Astron. Inst. Neth.*, 1968, 20: 33
- [5] Blitz L, Spergel D N, Teuben P J *et al.* *ApJ*, 1999, 514: 818
- [6] Sembach K R. *ASP Conf. Ser.*, 1999, 166: 243
- [7] Hartmann D, Burton W B. *Atlas of Galactic Neutral Hydrogen*, London: CUP, 1997
- [8] Barnes D G, Staveley-Smith L, de Blok W J G *et al.* *MNRAS*, 2001, 322: 468
- [9] Jarrett T H, Chester T, Cutri R *et al.* *AJ*, 2000, 119: 2498
- [10] York D G, Adelman J, Anderson J E *et al.* *AJ*, 2000, 120: 1579
- [11] Wakker B P, van Woerden H. *ARA&A*, 1997, 35: 217
- [12] Braun R, Burton W R. *A&A*, 1999, 341: 437
- [13] de Heij V, Braun R, Burton W B. *A&A*, 2002, 392: 417
- [14] de Heij V, Braun R, Burton W B. *A&A*, 2002, 391: 159
- [15] Putman M E, de Heij V, Staveley-Smith L *et al.* *AJ*, 2002, 123: 873
- [16] Westmeier T, Bruns C, Kerp J. 2003, preprint (astro-ph/0310247)
- [17] Braun R, Burton W R. *A&A*, 2000, 354: 853
- [18] Burton W B, Braun R. In: Matteucci F, Giovannelli F eds. *The Evolution of the Milkyway*, Dordrecht: Kluwer, 2000: 347
- [19] Braun R, Burton W B. *ASP Conf. Ser.*, 2000, 209: 136
- [20] Navarro J F, Frenk C S, White S D M. *ApJ*, 1997, 490: 493
- [21] de Heij V, Braun R, Burton W B. *A&A*, 2002, 391: 67
- [22] López-Corredoira M, Beckman J E, Casuso E. *A&A*, 1999, 351: 920
- [23] Lewis G F, Bland-Hawthorn J, Gibson B K *et al.* *PASP*, 2000, 112: 1300
- [24] Sternberg A, McKee C F, Wolfire M G. *ApJS*, 2002, 143: 419
- [25] Maloney P R, Putman M E. *ApJ*, 2003, 589: 270
- [26] Putman M E, de Heij V, Staveley-Smith L *et al.* *ApJ*, 2002, 123: 873
- [27] Burkert A. *ApJ*, 1995, 447: L25
- [28] Wakker B P. 2001, preprint (astro-ph/0109210)
- [29] Wakker B P, Howk J C, Savage B D *et al.* *Nature*, 1999, 402: 388
- [30] Giovanelli V, Verschuur G L, Cram T R. *A&AS*, 1973, 12: 209
- [31] Wakker B P, van Woerden H. *A&A*, 1991, 250: 509
- [32] Hulsbosch A N M, Makker B P. *A&AS*, 1988, 75: 191

- [33] Savage B D, Sembach K R. *ARA&A*, 1996, 34: 279
- [34] Gibson B K, Giroux M L, Penton S V *et al.* *AJ*, 2001, 122: 3280
- [35] Murphy E M, Sembach K R, Gibson B K *et al.* *ApJ*, 2000, 538: L35
- [36] Richter P, Sembach K R, Wakker B P *et al.* *ApJ*, 2001, 559: 318
- [37] Richter P, Sembach K R, Wakker B P *et al.* *ApJ*, 2001, 562: L181
- [38] Collins J A, Shull J M, Giroux M L. *ApJ*, 2003, 585: 336
- [39] Tripp T M, Wakker B P, Jenkins E B *et al.* *AJ*, 2003, 125: 3122
- [40] Fox A J, Savage B D, Wakker B P *et al.* *ApJ*, 2004, 602: 738
- [41] Davies R D. *MNRAS*, 1972, 160: 381
- [42] Kawata D, Thom C, Gibson B K. *PASA*, 2003, 20: 263
- [43] Gardiner L, Noguchi M. *MNRAS*, 1996, 287: 191
- [44] Bekki K, Freeman K C. *ApJ*, 2002, 574: L21
- [45] Sembach K R, Savage B D, Lu L *et al.* *ApJ*, 1999, 515: 108
- [46] Sembach K R, Savage B D, Lu L *et al.* *ASP Conf. Ser.*, 1999, 166: 180
- [47] Wakker B P, Savage B D, Sembach K R *et al.* *ApJS*, 2003, 146: 1
- [48] Savage B D, Sembach K R, Wakker B P *et al.* *ApJS*, 2003, 146: 125
- [49] Sembach K R, Wakker B P, Savage B D *et al.* *ApJS*, 2003, 146: 165
- [50] Collins J A, Shull M, Giroux L M. 2003, preprint (astro-ph/0312105)
- [51] Putman M E, Staveley-Smith L, Giboson B K *et al.* *Nature*, 1998, 384: 752
- [52] Mathewson D S, Cleary M N, Murray J D. *ApJ*, 1974, 190: 291
- [53] Putman M E, Smith L S, Freeman K C *et al.* *ApJ*, 2003, 586: 170
- [54] Wakker B P, Oosterloo T A, Putman M E. *ApJ*, 2002, 123: 1953
- [55] Stanimirovic S, Dickey J M, Krco M *et al.* *ApJ*, 2002, 576: 773
- [56] Lu L, Sembach K R, Savage B D *et al.* *AJ*, 1998, 115: 162
- [57] Gibson B K, Giroux M L, Penton S V *et al.* *AJ*, 2000, 120: 1830
- [58] Maddison S T, Kawata D, Gibson B K. *Ap&SS*, 2002, 281: 421
- [59] Kawata D. *ApJ*, 2001, 558: 598
- [60] Mastropietro C, Moore B, Mayer L *et al.* 2003, preprint (astro-ph/0309244)
- [61] Connors T W, Kawata D, Maddison S T *et al.* 2004, preprint (astro-ph/0402187)
- [62] Wakker B P, Howk C, Schwarz U *et al.* *ApJ*, 1996, 473: 834
- [63] van Woerden H, Schwarz U J, Peletier R F *et al.* *Nature*, 1999, 400: 138
- [64] Wakker B P. *ApJS*, 2001, 136: 463
- [65] Wakker B P, van Woerden H, de Boer K *et al.* *ApJ*, 1998, 493: 762
- [66] Lockman F J. *ApJ*, 2003, 591: L33
- [67] Shapiro P R, Field G B. *ApJ*, 1976, 205: 762
- [68] Kahn F D. *MNRAS*, 1981, 196: 641
- [69] Breitschwerdt D, Komossa S. *Ap&SS*, 2000, 272: 3
- [70] Rosen A, Brgman J N. *ApJ*, 1995, 440: 634
- [71] Tomisaka K, Ikeuchi S. *PASJ*, 1986, 38: 697
- [72] Mac L, Mordecai M, McMcray R *et al.* *ApJ*, 1989, 337: 141
- [73] Tenorio-Tagle G, Rozyczka M, Bodenheimer *et al.* *A&A*, 1990, 237: 207
- [74] de Avillez M A. *ASP Conf. Ser.*, 1999, 166: 103
- [75] de Avillez M A. *Ap&SS*, 2000, 272: 23
- [76] de Avillez M A. *MNRAS*, 2000, 315: 479
- [77] de Avillez M A, Berry D L. *MNRAS*, 2001, 328: 708
- [78] Zwann M A, Briggs F H. *ApJ*, 2000, 530: L61
- [79] Gardiner L T, Sawa T, Fujimoto M. *MNRAS*, 1994, 266: 567
- [80] Gardiner L T, Noguchi M. *MNRAS*, 1996, 278: 191

- [81] Lin D N C, Jones B F. *ApJ*, 1995, 439: 652
- [82] Heller P, Rohlfs K. *A&A*, 1994, 291: 743
- [83] Sofue Y, Wakamatsu K. *PASJ*, 1991, 43: L57
- [84] Limin L, Blair D, Savage K R *et al.* *AJ*, 1998, 115: 162
- [85] Putman M E, Staveley-Smith L, Freeman K C *et al.* *ApJ*, 2003, 586: 170
- [86] Weiner B J, Williams T B. *AJ*, 1996, 111: 1156
- [87] Tufte S L, Reynolds R J, Haffer L M. *ApJ*, 1998, 504: 773
- [88] Bland-Hawthorn J, Veilleux S, Cecil G N *et al.* *MNRAS*, 1998, 299: 611
- [89] Tufte S L, Wilson J D, Madsen G J *et al.* *ApJ*, 2002, 572: L153
- [90] Weiner B J. *ASP Conf. Ser.*, 2003, 281: 163
- [91] Weiner B J, Vogel S N, Williams T B. *ASP Conf. Ser.*, 2001, 254: 256
- [92] Putman M E, Bland-Hawthorn J, Veilleux S *et al.* *ApJ*, 2003, 597: 948
- [93] Bland-Hawthorn J, Maloney P R. *ASP Conf. Ser.*, 2002, 254: 267
- [94] Bland-Hawthorn J, Maloney P R. *ApJ*, 1999, 510: L33
- [95] Klypin A K, Kravtsov A V, Valenzuela O *et al.* *ApJ*, 1999, 522: 82
- [96] Moore B, Ghigna S, Governato F L *et al.* *ApJ*, 1999, 524: L19
- [97] Simon J D, Blitz L. *ApJ*, 2002, 574: 726
- [98] Willman B, Dalcanton J, Ivedic Z *et al.* *AJ*, 2002, 124: 2600
- [99] Hopp U, Schulte-Ladbeck R E, Kerp J. *Ap&SS*, 2003, 284: 647
- [100] Hopp U, Schulte-Ladbeck R E, Kerp J. *MNRAS*, 2003, 339: 33
- [101] Charlton J C, Churchill C W, Rigby J R. *ApJ*, 2000, 544: 702
- [102] Mo H J, Miralda-Escude J. *ApJ*, 1996, 469: 589
- [103] Lin W P, Boerner G, Mo H J. *MNRAS*, 2000, 319: 517
- [104] Espesate E, Cantó J, Franco J. *ApJ*, 2002, 575: 194

High-Velocity Clouds

WANG Xiang-hua, LIN Wei-peng

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

Abstract: High-velocity clouds (HVCs) were first detected by HI 21 cm emission in 1963, since then the nature of HVCs remains controversial although more than forty years has been pasted. In the last decade, with the observations of high resolutions, the developments of theoretical models and numerical simulations, there has been great progress in many aspects of the studies of high-velocity clouds, particularly for some special kinds and the all-sky surveys. In this paper, main progress is reviewed including the observational studies of the two kinds of newly-found CHVCs and highly-ionized HVCs as a whole or individually, the high-resolution observations of Magellanic Stream and Complex C which are the largest HVCs in Southern and Northern sky respectively, as well as the one and only convincing constraint on the distance of Complex A which is in the range of 4–10 kpc from the Galactic center. Some theoretical models and simulations trying to explain the origins of HVCs are introduced briefly. This paper will also give brief descriptions on how to constrain the galactic distances of HVCs using H α emission lines and the so far failed efforts to find stars in HVCs.

Key words: astrophysics; high-velocity clouds (HVCs); review; origin; observation; theory