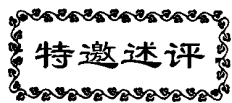


文章编号: 1000-8349(2010)03-195-18



阻尼莱曼 α 吸收线系统研究进展 (I)

—— 巡天观测和统计性质

侯金良, 史习珩, 傅承启

(中国科学院 上海天文台, 星系宇宙学重点实验室, 上海 200030)

摘要: 阻尼莱曼 α 吸收线系统 (DLAs) 是中性氢柱密度超过 $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ 的类星体吸收线系统。按照现有的观点, DLAs 是高红移环境中星系及恒星形成的中性气体库, 它们很可能是现今星系的前身。近 20 年来随着 DLAs 巡天观测的迅猛发展, 尤其是 SDSS 巡天观测数据的释放, DLAs 统计样本达到千计的量级, 大大推动了 DLAs 的观测和研究。由于受到观测的某些限制, 样本还有偏, 尤其是缺少低红移 DLAs, 但是, 通过大样本 DLAs 系统的研究, 已经获得了有关宇宙中性气体演化的许多信息, 如 DLAs 的数密度在高红移处 ($z > 1.5$) 是有演化的, 但在低红移处基本不演化, 从而确认了今天的星系形成于较高红移处。研究也发现 DLAs 对宇宙质量密度的贡献随红移的演化减弱, DLAs 的中性氢气体柱密度分布函数与本地星系的中性氢柱密度分布函数十分相似等一些有趣的结论。着重介绍 DLAs 的基本知识以及 20 年来巡天的有关进展, 包括 DLAs 的观测证认、统计特性等, 并指出目前 DLAs 样本不完备的主要原因。

关键词: 类星体; 吸收线系统; 星系际介质; 星系演化

中图分类号: P158

文献标识码: A

1 引 言

阻尼莱曼 α 吸收线系统 (Damped Ly α Absorption Systems, 简称 DLAs) 是中性氢柱密度超过 $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ 的类星体吸收线系统^[1]。最早关于 DLAs 的报道见于 1971 年, Lowrance 等人^[2] 对类星体 PHL957 ($z=2.72$) 进行光谱观测, 发现在 Ly α 发射线 ($4\,520 \text{ \AA}$) 的蓝端有众多的吸收线, 并在 $4\,025 \text{ \AA}$ 与 $3\,395 \text{ \AA}$ 处各发现一条很宽的吸收线, 经初步识别认定它们分别是红移后的 Ly α 线 ($1\,215.67 \text{ \AA}$) 及 Ly β 线 ($1\,025.18 \text{ \AA}$), 按照 $\lambda_{\text{obs}}/\lambda_0 = 1 + z$, 对应红移 $z=2.309$ 。

收稿日期: 2010-07-01; **修回日期:** 2010-07-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (10833005); 973 项目 (2007CB815402); 基金委创新群体 (10821302)

随后 Beaver 等人^[3]也观测到该类星体的 Ly α 吸收线, 并将这条强吸收线的形成解释为很高的中性氢柱密度对 Ly α 光子的阻尼吸收, 根据谱线轮廓他们证实这个吸收体的中性氢柱密度为 $N(\text{H I})=2\times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ 。

与类星体典型光谱中发现的 Ly α 吸收线(即 Ly α 森林)不同, DLAs 的 Ly α 吸收线要强得多, 也宽得多。由于具有很大的中性氢柱密度, 阻尼吸收很强, 即使是线翼, DLAs 也表现为光学厚的, 此时 Ly α 吸收线的宽度与气体的速度弥散度无关, 即使在速度弥散度很小的情况下, DLAs 的 Ly α 线也有很大的宽度, 因此得名阻尼莱曼 α 系统。这与低柱密度气体产生的 Ly α 线不同, 后者主要依靠多普勒加宽。

DLAs 表现出复杂的性质, 目前观测到的这些吸收体的红移范围大约从 0.1 到 5, 其回溯时间正好对应银河系老年恒星当年形成的时期。由于 DLAs 吸收线的金属丰度普遍低于太阳, 可以预期这些吸收气体与处于形成早期的星系中的气体有关, 亦即它们可能是现星系的前身。因此, 这些吸收线是如何形成的? 它们是什么天体? 它们如何演化等问题一度成为研究热点。DLAs 有很高的中性氢柱密度, 它们包含了红移从 0 到 5 之间的大部分宇宙中性气体, 特别是在红移 3 到 4 之间, 这类系统所含的中性气体质量占了星系内可见质量的主要部分。所以, 研究 DLAs 成为研究宇宙中性气体分布及演化、宇宙元素丰度和恒星形成历史的一种新的途径^[4], 也是研究高红移星系、星系际介质和宇宙学的一个重要手段。

本文将主要讨论 DLAs 的基本性质、分类、证认, 以及巡天观测结果和统计研究的进展。

2 DLAs 及其分类

按吸收线的红移, 类星体吸收线系统可分为两大类: 一类红移接近并略小于发射线红移, 另一类则有比发射线小很多的红移。前一类谱线的宽度有宽有窄, 宽的线宽在 2 000 km/s 以上, 甚至高达 0.1 c , 而窄的线宽通常只有 1 \AA 。这一类吸收线由于有接近发射线的红移, 因此, 普遍认为它们产生于类星体本身内部或与之成协的气体云^[5]。而后一类吸收线大部分都很窄, 宽度小于 1 \AA , 对应吸收线宽度通常小于 100 km/s。由于红移不同且远小于发射线的红移, 因此普遍认为这类吸收线是类星体视线方向上插入天体的吸收所致, 形成图像示于图 1。由于视线上的星系际气体和插入星系内中性氢的吸收, 给类星体光谱增添了众多的吸收线。

按插入天体所含的中性氢气体柱密度, 类星体吸收线系统又可分为 3 类^[4,6,7]:

(1) 莱曼 α 森林 (Lyman α forest, $N(\text{H I}) < 10^{17} \text{ cm}^{-2}$);

(2) 莱曼限系统 (Lyman Limit Systems, LLS) ($10^{17} < N(\text{H I}) < 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$); 其中把中性氢柱密度大于 10^{19} cm^{-2} 的又称为亚阻尼莱曼 α 吸收线系统 (sub-DLAs);

(3) 阻尼莱曼 α 系统 (DLAs) ($N(\text{H I}) > 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$)。

这种划分并不是任意的, 柱密度 $N(\text{H I})=10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 对应于莱曼限处的光深约为 1^[4], 因此, 莱曼 α 森林对莱曼限光子的光学深度都小于 1。另外, $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ 这个阈值是根据附近旋涡星系的中性氢柱密度特征确定的, 虽然这是历史形成的产物, 但是, Viegas^[8] 及 Prochaska 和 Wolfe^[9] 利用 Haardt 和 Madau^[10] 计算的背景辐射得到 sub-DLAs 中的气体在电子温度 $T > 10^4 \text{ K}$ 时大部分是电离的。所以 Wolfe 指出^[4], 在高红移处, $N(\text{H I})=2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ 是区分中性氢与电离氢的柱密度临界值, 这使阻尼 Ly α 系统与其他吸收体系统有了本质差别: DLAs 主要以中性氢为主, 而其他类星体吸收体主要是电离氢。

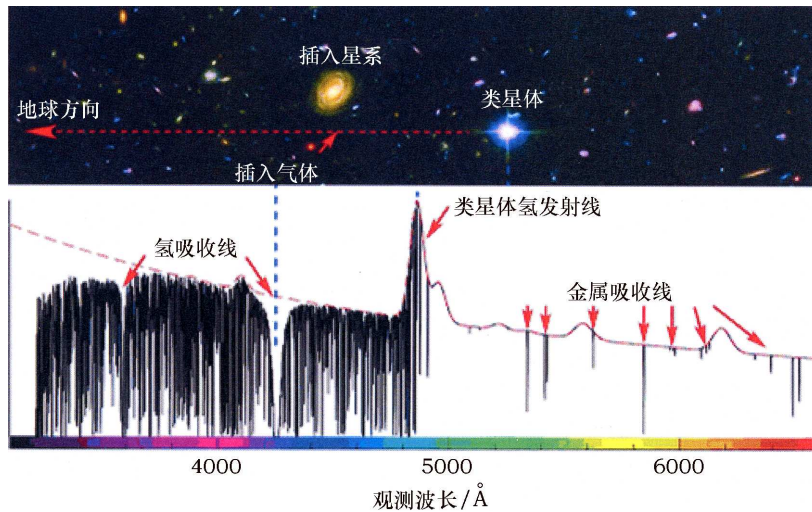


图 1 位于类星体光谱紫外与光学波段的吸收线 (下), 以及插入天体如何形成类星体吸收线的示意图 (上)
(图片来自 <http://www.physics.louisville.edu/meiring/images/>)

近年来, 人们进一步将 DLAs 分为两类^[11]:

- (1) 类星体阻尼 Ly α 系统 (QSO-DLAs), 背景源为类星体;
- (2) 伽玛射线暴阻尼 Ly α 系统 (GRB-DLAs), 背景源为长伽玛射线暴余辉。

这两类 DLAs 和 sub-DLAs 可能与不同类型、质量和形态的原星系成协^[12,13]。sub-DLAs 表现为较低的中性氢柱密度, $N(\text{H I})$ 约为 $10^{19} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-2}$, 且大部分呈电离态, 它们富含金属, 含量接近太阳丰度并可能与大质量 ($\leq 10^{11} M_{\odot}$) 的原旋涡星系或原椭圆星系成协^[14]。QSO-DLAs 即是早期在类星体光谱中发现的 DLAs, 它们也被认为与大质量的原旋涡星系或原椭圆星系成协。而 GRB-DLAs 是一类在长伽玛暴余辉方向上观测到的有 Ly α 吸收线的 DLAs, 这类吸收体目前观测样本有限, 一般具有较高的中性氢柱密度, 可能与大质量 ($\leq 10^9 M_{\odot}$) 的原旋涡星系, 或者矮星系成协。

3 DLAs 的巡天简史

利用插入天体探测宇宙中性氢气体分布的思想最早来自 Wagoner^[15]。Wagoner 在 1967 年指出, 如果将本地宇宙的知识推广到高红移处, 那么在类星体前面有一个正常尺度星系的概率为百分之几。这类插入星系大部分是旋涡星系, 它们拥有恒星和气体组成的星系盘。当类星体发射的辐射通过星系时与盘气体相互作用, 并在类星体辐射谱上留下星系盘作用的痕迹。为了检测出这种痕迹, Wagoner 建议用 21 cm 吸收线、法拉第旋转和共振吸收线等一些手段来检测。

不过, 21 cm 吸收线巡天探测高红移处的 H I 气体有很大的缺点: 一是巡天的红移范围受天线频率覆盖的限制, 如阿雷西博天线, 巡天红移范围 $\Delta z \simeq 0.02$; 二是对于高红移天体 ($z > 1.8$), 红移后的 21 cm 线落在 500 MHz 频率以内, 那里的电波受到地球的严重干扰; 三是典型的低频背景射电源直径都很大, 很难在这种背景上探测到致密冷中性氢气

体。而且 21 cm 线的振子强度 $f_{21} = 2.5 \times 10^{-8}$ 很小, 对于较暖的 H I 气体很难探测到。自从 20 世纪 70 年代初 Lowrance 等人^[2] 及 Beaver 等人^[3] 首先发现类星体 PHL957 有 Ly α 吸收线以后, 在其他几个类星体的光谱中也发现了这条吸收线。这种 Ly α 吸收线被认为是插入天体吸收类星体辐射所生成, 因此插入天体形成的 Ly α 吸收线成为研究高红移处星系际高密度中性氢气体的新手段, 与 20 世纪 60 年代末发现的莱曼 α 森林等一起成为研究星系际气体和星系早期形成的新热点、新领域。

显然, DLAs 的发现率取决于类星体视线方向上是否有穿过中性氢密度足够大的插入天体, 并有足够的技术分辨和证认出 Ly α 吸收线。最初 DLAs 的观测进展很慢, 只是一种偶然的发现。到 20 世纪 80 年代初, 还只有 20 世纪 70 年代偶然发现的 4 个 DLAs^[4]。1986 年 Wolfe 等人^[1] 遵循 Wagoner 的思想, 开始 DLAs 的 Ly α 吸收线巡天观测, 即拍摄类星体光谱, 寻找有高柱密度的 Ly α 吸收线。DLAs 巡天拍摄的是类星体光谱, 类星体十分致密, 因此, 利用 DLAs 巡天更容易探测到致密 H I 气体, 而且 Ly α 跃迁的振子强度 $f = 0.418$, 远大于 21 cm 氢线的振子强度, 所以暖 H I 气体对 Ly α 是光学厚的, 不像对 21 cm 吸收线是光学薄的。因此 DLAs 巡天较容易探测到较暖的 H I 气体。

不过, 由于振子强度很大, 氢丰度又很高, 所以 DLAs 巡天也常常探测到更经常出现的低柱密度云(那里的氢主要处于电离状态), 如莱曼 α 森林, 它们成为识别阻尼莱曼 α 线的主要污染源。由于单位红移间隔的谱线密度随红移增大而增加, 高红移 ($z > 4$) 巡天受到的污染更加严重, 到 $z > 5.5$ 时, 由于莱曼 α 森林的污染, 人们将无法辨认阻尼 Ly α 线。不过, $z < 5.5$ 时, 辨别两者还是不难的。对于 $N(\text{H I}) > 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ 的中性氢柱密度系统, 静止参考系中的 Ly α 线等效宽度为 $W_r \approx 10 \times [N(\text{H I})/2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}]^{1/2}$ 。因此, DLAs 中阻尼 Ly α 线的观测等效宽度为 $W_{\text{obs}} = (1+z)W_r \approx 10(1+z) \text{ \AA}$, 这很容易与典型莱曼 α 森林线的观测等效宽度 3 \AA 区分, 在低分辨率和中等信噪比的情况下也能证认出。这也是 Wolfe 等人第一次巡天时把寻找的阈值设为 $N(\text{H I}) > 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ 以及等效宽度 10 \AA 的原因^[1,4]。

1986 年, Wolfe 等人发表了第一个 DLAs 巡天工作结果^[1]。巡天在红移 $z \simeq 2$ 处进行, 光谱分辨率为 10 \AA 。在 68 个类星体中发现 47 个 Ly α 吸收线线宽度大于谱分辨率, 红移路径 $\Delta z = 55^*$ 。后来 Turnshek 等人以及 Wolfe 等人证实其中至少有 15 个为 DLAs^[17,18]。他们从观测得出, 在平均红移 $\langle z \rangle = 2.5$ 处的 DLAs 发现率为 $dn/dz = 0.29 \pm 0.07$ 。

很快, DLAs 被发现是研究星系形成和演化最重要的工具之一。从 20 世纪 90 年代初开始, 一系列红移巡天连续开展, 可见参考文献 [16,19-22]。在这些巡天工作中, 发现了一系列 DLAs 的统计特征, 如 1991 年 Lanzetta 等人^[16] 第一次得出红移数密度为 $n(z) = n_0(1+z)^\gamma$, DLAs 柱密度分布为式 $f(N) = BN^{-\beta}$; Lanzetta 等人^[19] 发现了“宇宙 G 矮星问题”; Wolfe 等人^[20] 通过巡天发现宇宙中性气体质量密度 Ω_g 随红移的减小而减小。从 20 世纪 90 年代后期起, DLAs 的巡天观测向高红移 4~5 延伸, Storrie-Lombardi^[21] 将范围扩大到 $z > 4$, 并发现了 $f(N)$ 偏离幂律分布。进入 21 世纪, 更多的巡天工作出现^[14,23-26], 特别是 Sloan 巡

* 巡天覆盖的红移路径 Δz 定义为 $\Delta z = \int_0^\infty g(z)dz$, $g(z)$ 为代表巡天的红移灵敏度函数, $g(z)dz$ 表示满足一定条件——静止等效宽度大于指定值且处在红移 ($z, z + dz$) 间隔——的巡天采样的视线数目, 可以用下式计算 $\Delta z = \sum_{i=1}^m (z_i^{\text{max}} - z_i^{\text{min}})$, 引自文献 [16]。

天数据的释放, 更大的 DLAs 样本得以产生。Prochaska 和 Herbert-Fort^[27] 利用 DR1, Prochaska 利用 DR3^[28], Prochaska 等人利用 DR5^[29], Noterdaeme 等人利用 DR7^[30], 所有这些立足 SDSS 数据搜索 DLAs 的工作都取得很大进展。例如, Noterdaeme 等人利用 DR7 在红移 $2.15 < z < 5.2$ 范围找到 $\lg N(\text{H I}) \geq 20$ 的吸收体 1 426 个, 其中 DLAs 937 个, 并发现最大的柱密度达到 $\lg N(\text{H I}) = 22.0 \pm 0.1$ 。

基于 SDSS 的 DR5 数据, Prochaska 等人^[29] 对离背景类星体的速度差 $dV < 3\,000$ km/s 的邻近阻尼莱曼 α 系统 (简称 PDLAs) 作了巡天分析, 这些吸收体大多都与它们的背景类星体有物理联系。他们利用这些 PDLAs 研究 $z \simeq 5$ 的类星体的环境。这种研究受到“邻近效应”的影响, 即背景类星体大量的电离辐射使附近星系中的中性气体电离。他们对 108 个 PDLAs 进行统计得出 $2.2 \leq z \leq 5$ 的 H I 频数分布 $f(N_{\text{H I}}, X)$ 、PDLAs 的发现率和质量密度, 发现 $z \simeq 3$ 处的发现率和质量密度近似为插入 DLAs 的 2 倍, 对于 $z < 2.5$ 和 $z > 3.5$, $f(N_{\text{H I}}, X)$ 有所增加但统计结果符合插入 DLAs。他们用类星体-星系成团来解释类星体周围所观测到的 PDLAs 增加现象。他们发现, 类星体周围的 PDLAs 数量是期望数量的 $1/10 \sim 1/5$, 这是类星体的电离辐射使附近 DLAs 星系中的 H I 中性气体光致电离的证据, 因此减小了 DLAs 的吸收截面。这是“邻近效应”的第一次探测。

问题较多的是低红移 DLAs 巡天工作。其中一个原因是 $z < 1.65$ 时 $\text{Ly}\alpha$ 线落在光谱的紫外区域, 直到 IUE 卫星和哈勃望远镜 HST 上天后才提供了这个波段可靠的数据。基于 260 个 IUE 类星体和 AGN 光谱^[31], Lanzetta 等人^[32] 估计了 DLAs 在紫外的发现率。可惜这些光谱并不可靠, 后来用 HST 观测只证实了 1 个 DLAs^[33], 表明常规方法寻找低红移 DLAs 的工作并不成功。因此, 依据低电离金属吸收线作为高柱密度 H I 云跟踪器的思想, 从 QSOs 光谱 Mg II 吸收系统样本搜寻 DLAs 的巡天工作应运而生^[25,34]。最近, Sloan 数据的释放在低红移 DLAs 巡天提供了较大的候选样本。Rao 等人^[26] 从 SDSS-EDR 中选出了 197 个红移 $z < 1.65$ 、 $W_0^{\lambda 2796} \geq 0.3 \text{ \AA}$ 的类星体吸收线样本, 准备进行 DLAs 的紫外巡天^[26]。另外, 2006 年 Wild 等人通过对 SDSS 类星体吸收线光谱中 Ca II 吸收线进行研究发现, Ca II 吸收线是一个寻找高柱密度中性氢吸收线系统的一个有效手段, 尤其是从 SDSS 类星体光谱中寻找低红移 ($z < 1.3$) DLAs 样本^[72]。

巡天工作的进展为统计研究 DLAs 的特征提供了越来越大的样本, 使天文学家对 DLAs 本身的特性, 以及它们与星系的形成和演化、早期恒星形成、宇宙的中性气体演化等有了更深入的认识。

4 DLAs 的证认问题

DLAs 巡天后第一步要做的工作是通过阻尼 $\text{Ly}\alpha$ 线的证认寻找 DLAs 吸收体。一般说来, 证认阻尼 $\text{Ly}\alpha$ 系统要比证认其他类星体吸收体更困难, 主要困难来自莱曼 α 森林的污染。

莱曼 α 森林也位于 $\text{Ly}\alpha$ 发射线的蓝端 (见图 1)。如前所述, 在红移 $z < 5.5$ 时, 低柱密度云的 $\text{Ly}\alpha$ 线很窄, 典型的莱曼 α 森林线宽是 1 \AA , 因此从莱曼 α 森林产生的污染噪声中识别阻尼 $\text{Ly}\alpha$ 线并不困难。当然, 在中低分辨率观测情况下, 阻尼 $\text{Ly}\alpha$ 线的阻尼翼会受到莱曼 α 森林中许多窄线的污染, 这时阻尼翼真正的轮廓会被破坏。更糟的是, 类星体视线有时会遇到具有较大速度弥散度的低柱密度气体云, 它们也产生单一的 $\text{Ly}\alpha$ 线, 要将这种 $\text{Ly}\alpha$ 线与

DLAs 的 Ly α 线区分开来, 是证认 DLAs 的主要困难之一。这可以根据金属吸收线加以识别。在类星体 Ly α 发射线的红端有若干金属吸收线, 主要有 C IV 吸收双线 ($2P^2P^0 \rightarrow 2S^2S$, 波长 1 549 Å, 1 551 Å) 和 Mg II 吸收双线 ($3P^2P^0 \rightarrow 3S^2S$, 波长 2 796 Å, 2 803 Å), 尤其是后者, 每个 DLAs 都有^[4], 根据它们的双线特征容易识别出 DLAs。

最广泛用于证认阻尼莱曼 α 系统的方法是 Ly α 线判据法, 在 H I 巡天光谱中搜索阻尼 Ly α 系。这种方法首先由 Wolfe 在 1986 年引进, 后经 Lanzette 在 1991 年、Wolfe 在 1995 年进一步细化^[4]。该方法建立在高红移星系盘与近邻星系盘有相似特性的假设上, 认为产生 Ly α 线的星系盘柱密度高、温度低、速度弥散度小、电离度低, 因此 Ly α 星系盘的 Ly α 线应当具有等值宽度大于 10 Å、速度弥散度不超过 50 km/s 的特征, 这成为候选 DLAs 的判据, 而且用低分辨率光谱仪观测即可达到探查 DLAs 的目的。利用这种方法寻找 $z > 1.6$ 上的 DLAs 十分成功。由于这种 Ly α 线判据法实际上是一种海选的方法, 它在低红移处寻找 DLAs 时并不成功, 部分原因是宇宙膨胀使低红移处单位红移间隔的插入吸收体数量大大减少, 还有部分原因是 $z < 1.6$ 时, Ly α 线出现在紫外波段, 地面无法观测, 而空间 UV 波段在 $z < 1.6$ 只观测到很少的类星体, 例如 HST 的类星体吸收线巡天计划 (QALS) 只在 $z = 1.37$ 找到 1 个 DLAs^[35]。在 1999 年以前, 低红移 DLAs 的统计特性仅仅是依据 4 个 DLAs 系统得到的, 因此是极不可靠的。到 2005 年 $z < 1.7$ 的 DLAs 也大约只有 50 个^[36]。寻找低红移 DLAs 的方法有两个: 一是依据现有的莱曼限系统寻找 DLAs, 二是依据 Mg II 系统寻找 DLAs。但是第一种方法的缺点与 Ly α 线判据法没有实质差别, 而且数量也很少, 考虑到此, 1995 年 Rao 等人^[34] 根据前人已证实的两个低红移 DLAs^[19] 提出了第二种方法。

Mg II 双线选方法实际上是首先建立一个 Mg II 样本, 在这个样本里再用上述 Ly α 线判据法寻找 Ly α 线, 一旦得到的 $N(\text{H I})$ 符合 DLAs 标准且它的红移符合 Mg II 线红移时, 就宣告找到一个 DLAs 系统。这种方法的基础是: 所有证认出来的 DLAs 都发现有低电离金属线, 包括电离镁 (Mg II) 在第一激发态与基态的跃迁对应一对紫外双线 $\lambda\lambda$ 2 796.3 Å, 2 803.5 Å。这对双线在红移 $0.1 < z < 2.2$ 之间都能观测到, 因此成为寻找 DLAs 的可靠探针。Rao 和 Turnshek^[25] 根据前人观测, 经过剔除及补充观测, 建立了 87 个静止等值宽度不小于 0.3 Å 的 Mg II 系统样本, 最后从中找到了 12 个 DLAs 系统。2006 年, Rao 等人^[26] 将 Mg II 双线选法进一步发展成 Mg II 双线-Fe II 系统选法。他们发现, Mg II 静止等值宽度 $W_0^{\lambda 2796} < 0.6$ Å 的 Mg II 系统被证认为 DLAs 的概率几乎为 0, 而当 $W_0^{\lambda 2796} > 0.6$ Å 时, DLAs 的数目大致不变, DLAs 的比例随 $W_0^{\lambda 2796}$ 的增加而提高; 对于 $W_0^{\lambda 2796} \geq 0.5$ Å 且 Fe II (λ 2 600 Å) 静止等值宽度 $W_0^{\lambda 2600} \geq 0.5$ Å 的 Mg II 系统, DLAs 的出现率达到 $36\% \pm 6\%$, 即约 1/3 强的 Mg II 系统是 DLAs 系统, 他们称之为 Mg II-Fe II 判据。另外, 他们发现 $W_0^{\lambda 2796} / W_0^{\lambda 2600} > 2$ 的 Mg II 系统几乎全不是 DLAs。DLAs 主要集中在 $1 \leq W_0^{\lambda 2796} / W_0^{\lambda 2600} \leq 2$ 的区域, 因此, 他们认为 $W_0^{\lambda 2796} / W_0^{\lambda 2600}$ 是 DLAs 存在的更有效的一种指示器。DLAs 的中性氢柱密度有随 $W_0^{\lambda 2796}$ 增大而减小的趋向。Mg II 判据的缺点是方法严重依赖于金属吸收线的存在, 一旦遇到无金属的高柱密度气体云, 这种方法就无能为力, 它选出的样本就有偏。

早期 DLAs 的搜索都是先在低中分辨率的类星体光谱中找到 DLAs 候选系统, 然后再用高分辨率光谱仪观测, 精确测定它们的柱密度, 确认是否为 DLAs 系统。SDSS 数据释放后, 这两个步骤合二为一, 直接用 Ly α 线判据法在 SDSS 的类星体光谱中寻找 DLAs 系统, 因为 SDSS 光谱的分辨率保证了既可以证认 DLAs 候选目标, 也能测量 $N(\text{H I})$, 而且实现了搜索的全自动化^[27,28,30]。

SDSS 巡天的分辨率、光谱波长覆盖和信噪比适合搜索 $z > 2.2$ 的 DLAs。这一巡天获得了很大的成功, 大大扩大了 DLAs 的样本, Prochaska 和 Herbert-Fort 利用 DR1 找到 50 个 $z > 2.1$ 以上新的 DLAs [27], Noterdaeme 等人 [30] 更是利用 DR7 在红移 $2.15 < z < 5.2$ 范围内找到 1 426 个 $\lg N(\text{H I}) \geq 20$ 的吸收体, 其中 937 个满足 $N(\text{H I}) \geq 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ 条件, DLAs 样本扩大到近千个。不过, 这个数目似乎还远少于莱曼间断星系 (LBGs), 这可能是从光学选 QSOs 光谱中搜索 DLAs 的问题。

光学选 QSOs 可能因尘埃消光引起样本的偏置, 因此, 根据射电选 QSOs 样本进行 DLAs 巡天是证认 DLAs 的一条新的途径 [24,37-39]。Ellison 等人的 CORALS 巡天就是这一类的第一个工作 [24], PKS 射电星表样本共有 878 个 QSOs, 他们从中选出 66 个发射线红移在 2.2 以上的 QSOs, 结果发现了 22 个 DLAs, 其中插入 DLAs 有 19 个, 17 个是新发现的。

5 DLAs 的统计特性

对 DLAs 天体的本质的了解, 很大程度上依赖于对它的统计特性的研究。从 1980 年起, 研究者就不断地进行 DLAs 的统计特性研究, 发现了许多有趣的特征, 只是苦于样本太小, 红移范围也太窄, 许多结果并不能全面反映 DLAs 的本质。另外一个重要的问题是样本的完备性, 许多因素会使观测样本有偏, 如在光学波段选的样本将受到尘埃消光的影响, 不同的红移范围巡天会受到不同大小的引力透镜效应影响。第 6 章将进行详细的讨论。

Wolfe 等人 1986 年的 DLAs 巡天只在 $z \simeq 2$ 附近找到 15 个 DLAs [1], Lanzetta 等人的统计分析也只是建立在 38 个 DLAs 的样本上 [16], Wolfe 等人 1995 年将样本扩大到 80 个 DLAs, 发现 Ω_g 随红移的减小而减小 [20]。Lanzetta 等人 (以下称 LWT) 对 $z < 1.65$ 紫外巡天和统计, 仅仅依赖所发现的 12 个被认为属于 DLAs 组成的样本 [19]。从 20 世纪 90 年代后期, DLAs 的巡天研究向高红移 4~5 延伸, 但是在 2000 年以前, 样本的 DLAs 数目没有超过 100 个。2000 年 Storrie-Lombardi 和 Wolfe [22] 利用巡天及前人结果, 综合成 85 个 DLAs 组成的样本。2004 年 Prochaska 和 Herbert-Fort [27] 利用 Sloan 释放的数据 DR1 在 $z > 2.1$ 上至少发现了 50 个新的 DLAs, 连同以前的结果建立了一个 163 个 DLAs 的样本。2005 年他们再次利用 DR3 建立了 600 个 DLAs 的统计样本。而 Noterdaeme 等人 [30] 在 2009 年将这个样本扩大到近千个 DLAs。除了扩大样本以外, 研究者也开始研究样本是否有偏的问题, 特别是尘埃对样本偏置的研究。所有这些研究为 DLAs 统计特性的研究奠定了基础。

5.1 DLAs 的红移数密度 n_{DLA}

DLAs 的红移数密度 n_{DLA} , 也写作 dn/dz , 是指红移 z 处单位红移间隔内类星体视线上插入的 DLAs 数目。如果在 DLAs 巡天搜索的总红移路径 Δz 内发现了 N 个 DLAs, 那么 DLAs 的红移数密度 $n_{\text{DLA}} = N/\Delta z$ 。如 1989 年 Turnshek 等人 [17] 在以前低分辨率观测发现的 47 个强莱曼吸收线特征的吸收体中发现有 16 个是阻尼吸收体, 因为总红移路径 $\Delta z = 56$, 于是得出 $n_{\text{DLA}} = 0.29$ 。Lanzetta 等人指出红移数密度随红移的演化为 [16]:

$$n(z) = n_0(1+z)^\gamma \quad (1)$$

他得到 $\gamma = 0.13 \pm 1.4$, $n_0 = 0.16 \pm 0.03$ 。因此, 他得出结论, 在红移 $4.1 > z > 1.6$ 范围内, DLAs 的红移数密度是不随红移演化的。Rao 等人 [40] 指出, DLAs 的红移数密度可由 Mg II

的红移数密度 $n_{\text{Mg II}}$ 确定:

$$n_{\text{DLA}}(z) = \eta(z)n_{\text{Mg II}}(z) \quad (2)$$

其中, $\eta(z)$ 是 Mg II 样本中 DLAs 所占的比例。根据用 SDSS 数据进行的 Mg II 巡天研究发现, Mg II 的红移数密度 $n_{\text{Mg II}}(z)$ 为 [26]:

$$n_{\text{MgII}} = N^*(1+z)^\alpha e^{-\frac{W_0}{W^*}(1+z)^{-\beta}} \quad (3)$$

其中 N^* , W^* , α , β 均为常数, W_0 指 Mg II 2 796 Å 的等值宽度 [41]。

借助 Mg II 方法对 $z < 1.65$ 的 DLAs 的研究, 以及 Prochaska 和 Herbert-Fort 用 DR1 数据的巡天研究 [27], 2006 年 Rao 等人 [26] 发现, 高红移上 DLAs 的红移数密度是有演化的, 从 $z \simeq 4$ 时的大约 0.4 快速下降到 $z \simeq 2$ 附近的 0.2(见图 2), 而后保持常数。因此, Rao 等人 [26] 得出, DLAs 数密度从 $z = 4$ 到 $z = 2$ 是有演化的, 而在低红移处 DLAs 数密度演化不明显, 这个结论与尘埃偏置基本无关, 因为他们认为后者偏置影响很小。这在图 2 中可明显看出, 其

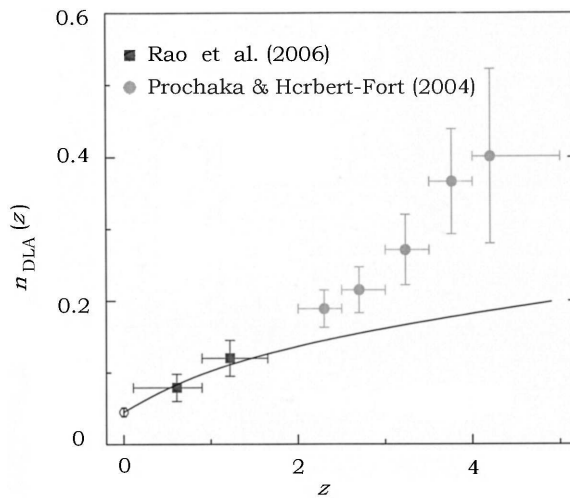


图 2 DLAs 的数密度随红移演化关系 [26]

中实线是依据 $(h, \Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0.7, 0.3, 0.7)$ 标准 LCDM 模型得到的 DLAs 红移数密度无演化曲线(归一化到 $z = 0$)。他们将此行为解释为 Ly α 吸收体的共同吸收截面先随红移减小相应降低一半, 然后保持常数的结果, 并认为与其他星系演化研究的结论一致, 即今天的星系出现在 $z \simeq 1$ 以前, 它们是此前快速合并或快速坍缩事件的结果。Rao 利用这些结果拟合式 (3), 得到 $\gamma = 1.27 \pm 0.11$ 。不过, 正如 Noterdaeme 等人 [30] 根据 SDSS-DR7 的巡天所指出的, Rao 的样本受方法所限而可能是有偏的, 他们用的是 Mg II 选 DLAs 方法, 因此样本偏向低中红移的 DLAs。另一方面, Zwaan 等人 [36] 对本地星系的 H I 21 cm 线射电巡天, 同样得出 $z = 2$ 的数密度是 $z = 4$ 的一半, 而在 $z \approx 1.5$ 以下是无演化的。他们得到 $n_0 = 0.045 \pm 0.006$ 。

5.2 中性氢柱密度分布 $f(N)$ 或 $f(N, X)$

中性氢柱密度分布 $f(N, X)$ 的定义为: 吸收距离在 $(X, X + dX)$ 上中性氢柱密度落在 $(N, N + dN)$ 范围内的吸收体数目为 $f(N, X)dNdX$ 。

这里 X 为“吸收距离”, 其定义为^[4]:

$$dX \equiv \frac{H_0}{c}(1+z)^3 \left| \frac{cdt}{dz} \right| dz \quad (4)$$

或者:

$$X(z) = \int_0^z (1+z')^2 \frac{H_0}{H(z')} dz' \quad (5)$$

其中, $H(z) = H_0[(1+z)^3 \Omega_m - (1+z)^2(\Omega_m + \Omega_\Lambda - 1) + \Omega_\Lambda]^{1/2}$ ^[42]。吸收距离是研究类星体吸收线系统的一种自然坐标。共动空间密度和本征尺度都为常数的系统在视线方向上每单位吸收距离上的密度也为常数, 因此在这种坐标中, 单位吸收距离上吸收体的密度与 X 及 z 都无关^[43], 中性氢柱密度分布 $f(N, X)$ 可以直接写成 $f(N)$ 。

于是, 吸收距离在 $(X, X+dX)$ 上中性氢柱密度落在 $(N, N+dN)$ 范围内的吸收体数目为^[4]:

$$dN(N, X) = f(N, X)dNdX = (c/H_0)n(N, X)A(N, X)dNdX$$

其中, 中性氢柱密度分布 $f(N) \equiv (c/H_0)n(N, X)A(N, X)$, 此时, 红移数密度 n_{DLA} 为

$$n_{\text{DLA}} = \int_{N_{\min}}^{N_{\max}} f(N, X)dN \quad (6)$$

这里 N_{\min}, N_{\max} 为最小和最大柱密度。

假设对 n 个类星体样本在柱密度范围 $(N - 0.5\Delta N, N + 0.5\Delta N)$ 内检测到 m 个的吸收体, 总吸收距离为 $\sum_i \Delta X_i$, 那么, 中性氢柱密度分布为 $f(N, X) = \frac{m}{\Delta N \sum_i \Delta X_i}$ 。1987 年

Tytler 发现中性氢柱密度的分布符合幂律函数分布^[45]:

$$f(N) = BN^{-\beta} \quad (7)$$

对于 $\lg N(\text{H I}) > 17.3$ 的吸收体, 他得到 $\beta = 1.39$ 。

1991 年 Lanzetta 等人^[16]对 DLAs 柱密度分布进行研究得到 $\beta \approx 1.67$, 很快他又得到另一个数值 $\beta \approx 1.25$ ^[46], 不过, 那是在将低中性氢柱密度系统也包括在内得到的。根据最新样本的研究得出, DLAs 中性氢柱密度分布不能用单一的幂律函数表示。2005 年 Prochaska 等人^[28]利用 SDSS-DR3 数据得到 600 多个 DLAs, 他们用三种不同的分布拟合观测结果: 单幂律分布 ($f(N) = k_1 N^{-\alpha_1}$), Schechter 函数分布 ($f(N) = k_2 (N/N_\gamma)^{-\alpha_2} \exp(-N/N_\gamma)$) 和双幂律分布 (低密度为 $f(N) = k_3 (N/N_\gamma)^{-\alpha_3}$, 高密度为 $f(N) = k_3 (N/N_\gamma)^{-\alpha_4}$), 发现后两种分布能更好地符合观测数据。基于 Ryan-Weber 等人^[47]利用 H IPASS 的观测数据, 2005 年 Rao^[40]也得到了双幂律分布, 其中低密度分布指数为 $\alpha_3 = 1.4 \pm 0.2$, 高密度分布指数为 $\alpha_4 = 1.8 \pm 0.1$ 。2009 年 Noterdaeme 等人^[30]根据近千个 DLAs 的统计结果示于图 3, 很清楚 Γ 函数和双幂律分布能更好地符合观测数据 ($\chi^2 = 0.7$ 或 1.1)。他们获得的分布指数在 $\lg N(\text{H I}) < 21.4$ 时约为 1.6, 这与 Petitjean 等人^[48]用流体静力学平衡下的光致电离模型所预期的数值相符, 比 Prochaska 等人^[28]对整个样本得到的 2.0 要平。在更大的 $N(\text{H I})$ 上, $\alpha \approx 3.5$, 这个结果比文献^[44]的结果 (约 6) 要平得多, 可能是因为 Noterdaeme 等人明确发现一个 $\lg N(\text{H I}) = 22.0$ 的 DLAs 所致。在高柱密度 ($\lg N(\text{H I}) > 21.5$) 上斜率很陡, 这意味大柱密度 DLAs 是非常稀少的, 这保证了

宇宙学质量密度 Ω_g^{DLA} 的收敛。他们还指出弥漫云中中性氢与分子氢之间不存在如 Schaye [49] 所建议的突然变化, 某些 CO 发射线观测也表明分子氢分布函数是高柱密度中性氢分布函数的平稳延伸 [50]。

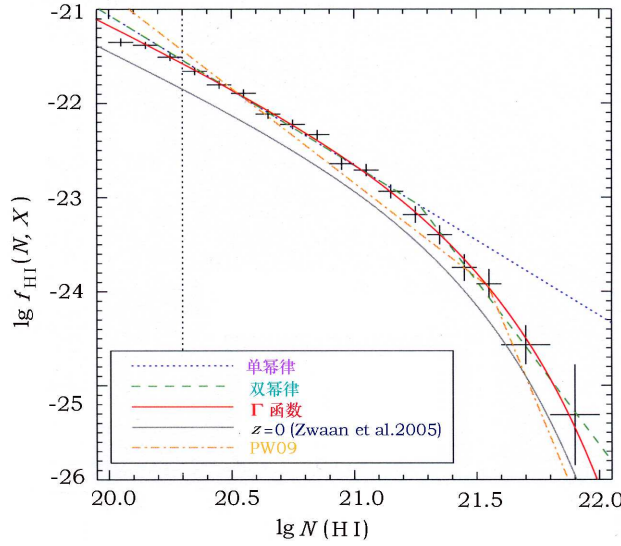


图 3 累计柱密度分布函数 [30]

比较 Ryan-Weber 等人于 2003 年 [47] 对本地得到的结果是十分有趣的。对 $z = 0$ 他们得到的中性氢柱密度分布为: $\lg N(\text{H I}) < 20.9$ 时, $\beta = 1.4 \pm 0.2$; $\lg N(\text{H I}) \geq 20.9$ 时, $\beta = 2.1 \pm 0.9$ 。2005 年 Zwaan 等人对本地中性氢柱密度分布的分析获得同样的结果 [36]。因此, 现有的观测都表明, 低红移和高红移上的柱密度分布 $f(N)$ 基本一致, 差别微小, 说明中性氢柱密度分布不存在演化效应。这种一致性可以得出几个重要结论 [44]: 一是 DLAs 中的恒星形成似乎不按 Schmidt 定律 (单位面积的恒星形成率正比于当地的气体质量面密度的 1.4 次方 $\Sigma_{\text{SFR}} \propto \Sigma_g^{1.4}$) 进行的; 二是宇宙的中性氢质量密度在最近 100 亿年以来没有演化, 保持不变; 三是现存 H I 星系对气体吸积必定为形成恒星消耗以及某些使星系中气体消除的反馈过程所平衡。

5.3 宇宙学质量密度 Ω_g^{DLA}

DLAs 被视为宇宙的中性气体库, 因为宇宙大部分中性气体都处于 DLAs 中。因此, 由 DLAs 导出的中性气体质量密度 Ω_g^{DLA} 是 DLAs 的一个重要统计特性, 它对宇宙重子物质、暗物质的研究极其重要。

宇宙学质量密度 Ω_g^{DLA} [30] 可表示为:

$$\Omega_g^{\text{DLA}}(X) = \frac{\mu m_{\text{H}} H_0}{c \rho_c} \int_{N_{\text{min}}}^{N_{\text{max}}} N(\text{H I}) f(N, X) dN \quad (8)$$

其中, $\mu = 1.3$ 是考虑到气体非纯氢组成 (75% H, 25% He) 的质量修正, ρ_c 是宇宙临界质量密度。对 DLAs 来说, $N_{\text{min}} = 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$, $N_{\text{max}} \rightarrow \infty$ 。上式用分立式表示为:

$$\Omega_g^{\text{DLA}}(X) = \frac{\mu m_{\text{H}} H_0}{c \rho_c} \frac{\sum_{i=1}^n N_i(\text{H I})}{\Delta X} \quad (9)$$

其中, n 是吸收距离为 $(X, X + dX)$ 内的 DLAs 数目, ΔX 为总吸收距离。

1991 年 Lanzetta 等人 [16] 首先导出 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 的数值, 认为该值符合旋涡星系内所含亮物质的质量密度。但是早期测量的 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 误差很大, 很不准确。2005 年 Prochaska 等人根据 SDSS-DR3 建立的 DLAs 样本以及 2009 年 Noterdaeme 等人 [30] 利用 SDSS-DR7 建立的 DLAs 样本, 对 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 的研究获得了一系列重要结果。这些结果大致关于三个方面: 一是关于 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 的红移演化, 二是关于 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 的收敛问题, 三是 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 对宇宙中性气体密度的贡献。

$\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 的红移演化问题涉及星系形成问题, 包括恒星形成中消耗或抛射气体的问题。Rao 等人 [40] 曾得出结论: 中性气体的宇宙学质量密度在 $0.5 < z < 5$ 之间大约保持为常数。不过, 他们的样本太小。从 SDSS-DR3 和 DR5 的大样本统计来看, 演化效应应当得到肯定。

由图 4 可见, 在 $z > 3.5$ 以上, $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 基本不变, 但是不同作者的观测结果差别很大, DR7 的结果为 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}(z = 3.49) = 1.29 \pm 0.15$ 。Noterdaeme 等人认为, SDSS 以前的样本存在高红移 DLAs 不足的问题, 当然, SDSS 观测也可能存在估计过高的问题, 主要是它的低分辨率可能会混入莱曼 α 森林。从 $z = 3.5$ 起到 $z = 2.3$, $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 从 1×10^{-3} 减小到 0.5×10^{-3} 。这一区间内不同的观测结果大致相同。DR3 与 DR7 之间的差别在误差范围内, 其差别主要在高红移上, 这是因为 DR7 有更多的样本。Storrie-Lombardi 和 Wolfe [22] 与 Peroux 等人 [14] 曾经得出在 z 从 3 减小到 2 时 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 反而增加的结论, 这主要是因为在这些工作中高红移 DLAs 样本太少。相反, Prochaska 等人 [28] 发现 z 从 4 减小到 2 时 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 反而减小的结论, 他们解释为恒星形成消耗气体以及抛射到星际介质的结果。Noterdaeme 等人 [30] 的统计表明, $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 的测定误差与样本大小 (公式 (9) 中的总吸收路径 ΔX) 有很大的关系, 上述矛盾至少在 $z = 3.2$ 以内都在测量的误差范围内是一致的。至于从 $z < 2.3$ 起, $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 似乎没有演化, 不过须注意, 在 $0 < z < 2.3$ 区间, 样本很小, 测量误差很大, 统计可能有偏 (如 Mg II 双线选)。因此, 需要对这个区间的 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 做更大规模的光学和射电巡天 [51]。

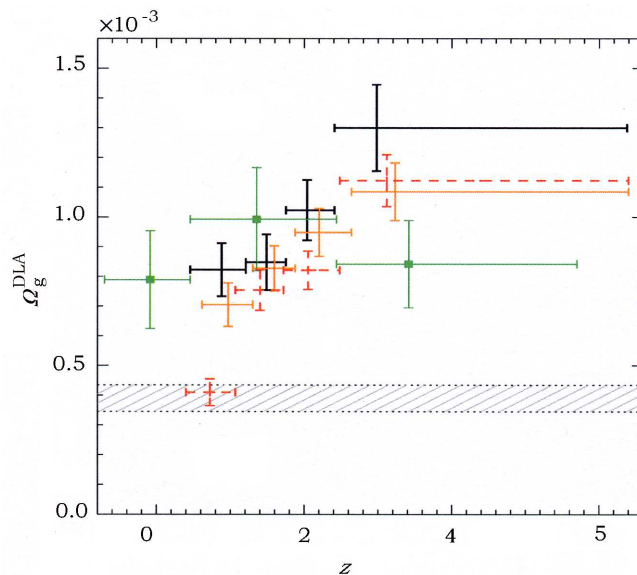


图 4 DLAs 中中性气体质量密度与红移的关系 [30]

黑色误差棒为 DR7 的结果, 灰色正方形为文献 [14] 结果, 灰色圆点为文献 [44] 的结果, 其中虚线为未作边缘效应改正的结果, 阴影区为文献 [36] 的结果。

从图 4 可以看出, 在 $z \simeq 3$ 处 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}} \simeq 10^{-3}$, 根据 WMAP 最新的结果 [52], 这意味高红移处的重子物质中, 中性气体只占约 2%, 因此, 高红移上绝大部分气体呈电离状态。

根据 DR3 与 DR7 巡天的统计, DLAs 所包含的中性气体质量密度 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 作为柱密度的函数绘于图 5。很清楚, $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 大约从 $\lg N(\text{H I})=22$ 起开始收敛, 这是式 (8) 中 DLAs 柱密度分布函数 $f(X)$ 在大柱密度上的斜率变陡的必然结果。

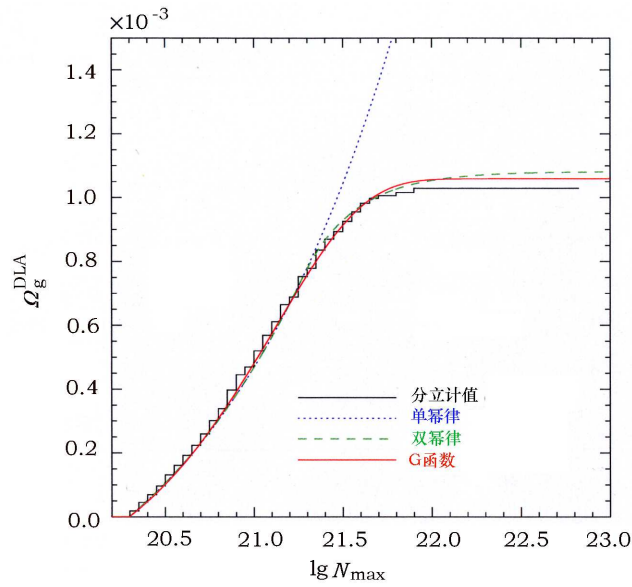


图 5 累计 DLAs 中性气体质量密度与中性气体最大柱密度的关系 [30]

从 $\lg N(\text{H I})=22$ 起, 累计中性气体质量密度收敛。

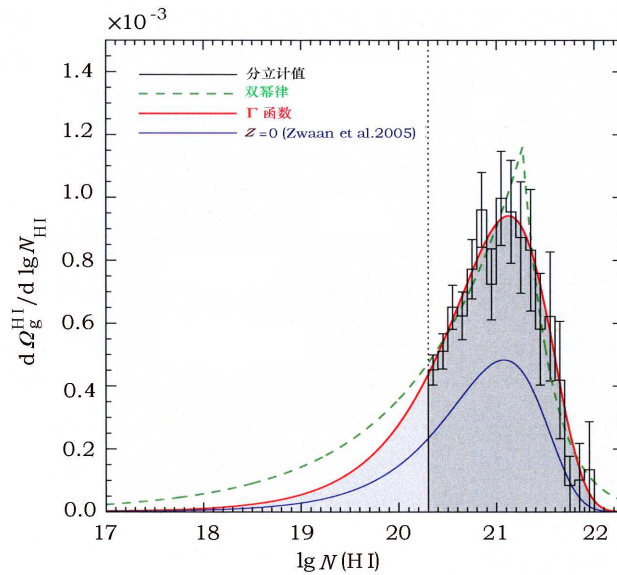


图 6 DLAs 中性气体质量密度与中性气体柱密度的关系 [30]

阴影面积反映的是 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$, 垂直棒的误差为 1σ ; 不同的曲线是不同函数的拟合。

DLAs 系统包含多少宇宙中性气体, 即 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 对宇宙中性气体密度的贡献, 是人们研究 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 所关心的问题。Wolfe 等人 [4] 在 2005 年曾得出结论: 如果忽略尘埃的消光影响, 宇宙中 $0 < z < 5$ 内的绝大部分中性气体都包含在 DLAs 中。图 6 清楚地反映了 DLAs 对宇宙中性气体质量密度的贡献情况 [30], 该曲线每个棒下面所围的面积表示该间隔内的吸收体对总 H I 质量密度 $\Omega_{\text{g}}^{\text{HI}}$ 的贡献, 显然, 在柱密度很大和很小时 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 都很小, 即对宇宙总 H I 质量密度 $\Omega_{\text{g}}^{\text{HI}}$ 的贡献很小, 极大值或最重要的贡献来自 $\lg N(\text{H I})=21.2$ 的 DLAs。图 6 中 $\lg N(\text{H I})=20.3$ 处的垂线左面的曲线为右面曲线的外推。由此可以作出结论, 柱密度为 $19 \leq \lg N(\text{H I}) < 20.3$ 的亚阻尼 Ly α 系统 (sub-DLAs) 对 $z > 2.2$ 处的总 H I 质量密度 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 大约在 20%(函数外推)~30%(双指数函数外推) 之间。比较有趣的结果是, 不同柱密度吸收体对 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 的贡献与本地宇宙 ($z=0$) 观测到的情形 [36] 非常相似, 说明高红移处中性气体面密度分布与本地观测到的情形没有重大区别。

6 DLAs 样本的完备性

利用 DLAs 统计研究宇宙中性气体的演化需要一个尽可能完备的样本。但是 DLAs 样本是否完备受到不同因素的影响, 主要来自以下几个方面: 尘埃消光 (遮蔽效应) 致偏、引力透镜致偏和光学选致偏。此外, Notedaeme 等人 [30] 指出, 当 DLAs 产生的 Ly α 吸收线落在 QSOs 光谱蓝端边缘时, 会影响最小红移吸收距离的确定, 产生边缘效应, 结果使样本致偏。他们认为, 这种效应会影响所有的 DLAs 巡天。

6.1 尘埃消光致偏

DLAs 统计研究中一个长期困扰的问题, 就是 DLAs 样本是否受到尘埃致偏 (dust bias)。如果前景 DLAs 系统有较多的尘埃 (这些系统称为多尘埃 DLAs), 它们对背景类星体有更大的消光, 使 QSOs 样本的观测极限星等受到限制。因此 DLAs 巡天样本中将缺少多尘埃 DLAs, 造成样本有偏。

首先的问题是 DLAs 是否含有尘埃。1984 年 Ostriker 和 Heisler [53] 曾指出, 光学选 QSOs 样本是有偏的, 因为观测到的大多是几乎没有前景尘埃消光的类星体。1991 年 Pei 等人 [54] 比较了视线上有 DLAs 的类星体与没有 DLAs 的类星体的色指数, 发现前者偏红, 证明 DLAs 内含有尘埃。他们还得到 DLAs 的尘气比 (dust-to-gas ratio) 约是银河系的 5%~20%。Fall 和 Pei [55] 预计, 约有 10%~70% 的类星体在光学选样本中丢失, 这种情况可使 DLAs 统计得到的参数 (如 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 、数密度等) 出现量级上的误差。但是后来对类星体的高分辨率观测表明实际的尘气比似乎没有文献 [55] 估计的那么高。1996 年 Pettini 等人 [56] 得到的尘气比为银河系的 1/30。这样, 基于小麦哲伦云的红化曲线, 可以估计 DLAs 中尘埃造成的背景类星体在 1 500 Å 波长上的消光约 0.1 mag。考虑到核合成的影响 ($[\text{Si}/\text{Fe}]=0.3$), 尘气比还要降低, 约为 1/200。2004 年 Murphy 和 Liske [57] 基于 SDSS-DR2 的类星体样本中 81 个有 DLAs 的类星体得到的红化小于 0.01 mag, 与文献 [54] 的结果不一致。

探测 DLAs 是否存在尘埃的方法有三种: 一是统计比较有 DLAs 系统的类星体光谱样本与无 DLAs 系统的类星体光谱样本, 比较他们的谱指数, 检查前者是否出现红化现象 [53]; 二是观测化学丰度的方法估计尘埃致偏效应; 三是在背景类星体光谱上寻找石墨尘埃的 2 175 Å 鼓包特征或探测弥漫星际带 (简称 DIB)。

统计比较光谱的方法不适用于单个 DLAs，对于单个 DLAs 可以采用观测化学元素丰度的方法。所谓化学丰度方法是指研究某些元素离子的柱密度，特别是 Cr II/Zn II 之比，来确定是否存在尘埃的方法。Cr 很容易在尘埃中结晶 (depletion)，而 Zn 很难结晶，两者之比恰好成为金属元素结晶到尘埃的比例的指示^[58]。因此根据 Cr II/Zn II 或其他粒子谱线强度比可以确定尘埃与金属比。不过，用 Zn 作为金属丰度的指示也有问题。理论上 Zn 的起源很不确定，观测上 Zn 丰度的测定依靠 Zn II 在 2 000 Å 处两条很弱的谱线，即使在高分辨率和高信噪比条件下也只能对 $[Zn/Fe] > -1.3$ 的 DLAs 进行丰度测定，而且当红移 $z > 3$ 后，谱线移至 8 000 Å 处，观测的灵敏度更差^[68]。一旦 Zn 不是金属丰度的好指示，Cr II/Zn II 作为尘埃的指示也是有问题的。因此 Junkkarinen^[59] 建议采用石墨尘埃 2 175 Å 鼓包的方法和探测 DIB 的方法。

2 175 Å 鼓包是银河系石墨尘埃颗粒产生的特征，它是尘埃存在的更直接的证据，在高红移处，碳可能是 2 175 Å 吸收体的主要载体^[60]。最初在吸收体中没有探测到 2 175 Å 鼓包^[54]，于是猜想 DLAs 中的尘埃可能不是银河系类型的，而是小麦哲伦云类型 (没有 2 175 Å 特征) 或大麦哲伦云类型 (很弱的 2 175 Å 特征) 的。后来 Motts 等人在引力透镜 SBS0909+0532 的透镜星系上发现了 2 175 Å 特征^[61]。Junkkarinen 等人在耀变体 AO 0235+164 光谱上对应 $z = 0.524$ 处 (对应 3 300 Å) 也发现了一个强而宽的 2 175 Å 特征^[59]，用银河系尘埃模型能完美地拟合观测光谱，并获得空气比为银河系的 0.19。他认为，这是个具有尘埃的 DLAs 的典型例子，说明这类 DLAs 在类星体巡天中大约有 91% 的几率可能因选择效应被丢失了。

6.2 引力透镜效应致偏

2005 年 Prochaska 等人^[28] 发现引力透镜现象会引起样本的偏置。他们从 SDSS-DR3 的阻尼 Ly α 样本中分别选出 33% 最亮的背景类星体和 33% 最弱的背景类星体组成两个子样本，然后将整个阻尼 Ly α 样本与这两个子样本进行比较。他们发现，阻尼 Ly α 系统的出现率 n_{DLA} 与类星体的星等没有什么关联，但质量密度 Ω_g^{DLA} 却与之有关，亮子样本比暗子样本有更高的质量密度 Ω_g^{DLA} 。这种效应首先由 Murphy 和 Liske 探测到，他们^[57] 发现含有 DLAs 的类星体光度函数比不含有 DLAs 的类星体光度函数更亮。 Ω_g^{DLA} 与类星体星等的关系用引力透镜效应更容易得到解释。与 DLAs 有关的大质量晕或盘的引力放大使类星体变亮，其中柱密度大的 DLAs 引力透镜效应自然也更大^[62,63]。Prochaska 等人认为 Ω_g^{DLA} 与类星体星等的关系不是尘埃引起的，因为尘埃消光产生的效应与此正好相反，即亮类星体导出的质量密度 Ω_g^{DLA} 比暗类星体导出的更低^[28]。

尽管引力透镜致使类星体变亮，使导出的质量密度 Ω_g^{DLA} 大 10%~20%，但是，Prochaska 等人指出 Ω_g^{DLA} 随红移的演化图像仍然是正确的，不过，对 $z < 2$ 的 DLAs 样本，这种效应就可能变得十分重要。

6.3 光学选样本致偏

如前所述，光学选 QSOs 样本可能存在两个问题：一是尘埃消光可能引起样本致偏，二是缺少紫外 QSOs 数据致使 $z < 1.65$ 的 DLAs 太少。对于后者，必须增加紫外的观测和巡天；至于前者，可利用不受类星体星等限制的射电选 QSOs 样本进行 DLAs 巡天加以弥补，这是避免尘埃消光引起选择效应的一种方法。

含有 DLAs 的 QSOs 比不含 DLAs 的 QSOs 更红，最自然的解释便是 DLAs 内含有大量的尘埃^[52,63]。因此，尘埃的消光可能使光学选 QSOs 样本致偏。一些作者认为这可能遗漏掉约 1/3 甚至更多的 DLAs。例如 Vladilo 和 Peroux^[64] 提出，尘埃消光使极限星等 $r = 20.5$ mag 的 QSOs 巡天遗漏 30%~50% 的 DLAs。Pei 和 Fall^[65] 也有类似的结论。

要回避尘埃消光引起的选择效应, 最好的办法是采用射电选样本进行光学光谱巡天来寻找 DLAs。这方面第一个工作是 Ellison 等人做的 CORALS 巡天^[24](完备的光学和射电吸收线系统巡天), 他们首先编制一个均匀的射电选 QSOs 样本, 然后对其中每个 QSO 进行中等分辨率的观测。他们的结论是, 以前光学选巡天会导致尘埃致偏, 但从中导出的参数如 n_{DLA} 、 $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ 等最多低估 1/2。因此他们认为光学巡天中 DLAs 被遗漏的概率很小, 光学选 QSOs 样本的有偏主要可能是其他因素影响而造成的^[66]。不过, CORALS 的样本太小, 结论有待检验。

7 总 结

近几年来, 基于 SDSS 巡天, DLAs 统计样本已经达到上千量级。但由于观测手段的限制, DLAs 样本仍然有偏, 例如低红移样本严重缺少, 尘埃影响无法定量衡量, 引力透镜效应也需要进一步研究。尽管如此, 通过研究大样本的 DLAs, 仍然获得了许多有关宇宙气体演化的信息, 如 DLAs 对宇宙质量密度的贡献随红移的演化很弱, 而 DLAs 的数密度在高红移处是有演化的 ($z > 1.5$), 但是在低红移处基本不演化, 从而确认了今天的星系形成于较高的红移观点。此外, 统计发现 DLAs 中性氢气体柱密度的分布函数与本地星系的中性氢柱密度分布函数十分相似。因此, DLAs 气体很可能是现今星系的前身。DLAs 的红移所对应的宇宙学时标也正好符合银河系老年恒星的年龄。虽然如此, 仍然还有许多本质的问题不清楚^[67-69]: DLAs 星系中的金属丰度从哪里来, 丰度随红移如何演化, 高红移环境下恒星的形成模式是否与在本地星系环境下一致, 等等。不过, 近年来基于地面大口径望远镜的高分辨率观测, 不少 DLAs 已经有了可靠的金属丰度观测, 这为我们研究星系际空间化学演化和宇宙恒星形成历史提供了有用的信息^[70,71]。基于化学元素金属丰度, 可以详细研究产生 DLAs 的气体与原初宇宙星系或者宇宙星系风之间的关系, 进一步探索宇宙重子物质的分布, 有关这方面的进展, 我们将在下一篇文章中予以详细的介绍。

参考文献:

- [1] Wolfe A M, Turnshek D A, Smith H E, et al. ApJS, 1986, 61: 249
- [2] Lowrance J L, Morton D C, Zucchini P, et al. BASS, 1971, 3: 238
- [3] Beaver E A, Burbidge E M, McIlwain C E, et al. ApJ, 1972, 178: 95
- [4] Wolfe A M, Gawiser E, Prochaska J X. ARAA, 2005, 43: 861
- [5] Levshakov S A, Agafonova I I, Molaro P, et al. A&A, 2009, 507: 209
- [6] 黄克谅. 天文学进展, 1993, 11: 27
- [7] Rouch M. ARAA, 1998, 36: 267
- [8] Viegas S M. MNRAS, 1995, 276: 268
- [9] Prochaska J X, Wolfe A M. ApJ, 1996, 470: 403
- [10] Haardt F, Madau P. IAU Colloq.163, 1997, 121: 711
- [11] Savaglio S. New Journal of Physics, 2006, 8: 195
- [12] Khare P, Kulkarni V P, Peroux C, et al. A&A, 2007, 464: 487
- [13] Kulkarni V P, Khare P, Som D, et al. 2010, arXiv: 1006. 0298
- [14] Peroux C, McMahon R G, Storrie-Lombardi L J, et al. MNRAS, 2003, 346: 1103
- [15] Wagoner R V. ApJ, 1967, 149: 465
- [16] Lanzetta K M, McMahon R G, Wolfe A M, et al. ApJS, 1991, 77: 1

- [17] Turnshek D A, Wolfe A M, Lanzetta K M, et al. *ApJ*, 1989, 344: 567
- [18] Wolfe A M, Turnshek D A, Lanzetta K M, et al. *ApJ*, 1993, 404: 480
- [19] Lanzetta K M, Wolfe A M, Turnshek D A. *ApJ*, 1995, 440: 435 (LWT)
- [20] Wolfe A M, Lanzetta K M, Foltz C B, et al. *ApJ*, 1995, 454: 698
- [21] Storrie-Lombardi L J, McMahon R G, Irwin M J. *MNRAS*, 1996, 283: L79
- [22] Storrie-Lombardi L J, Wolfe A M. *ApJ*, 2000, 543: 552
- [23] Peroux C, Storrie-Lombardi L J, McMahon R G, et al. *AJ*, 2001, 121: 1799
- [24] Ellison S L, Yan L, Hook I M, et al. *A&A*, 2001, 379: 393
- [25] Rao S M, Turnshek D A. *ApJS*, 2000, 130: 1
- [26] Rao S M, Turnshek D A, Nestor D B. *ApJ*, 2006, 636: 610
- [27] Prochaska J X, Herbert-Fort S. *PASP*, 2004, 116: 622
- [28] Prochaska J X, Herbert-Fort S, Wolfe A M. *ApJ*, 2005, 635: 123
- [29] Prochaska J X, Hennawi J F, Herbert-Fort S. *ApJ*, 2008, 675: 1002
- [30] Noterdaeme P, Petitjean P, Ledoux C, et al. *A&A*, 2009, 505: 1087
- [31] Lanzetta K M, Turnshek D A, Sandoval J. *ApJS*, 1993, 84: 109
- [32] Kinney A L, Bohlin R C, Neill J D. *PASP*, 1991, 103: 694
- [33] Turnshek D A, Rao S M. *ApJ*, 2002, 572: L7
- [34] Rao S M, Turnshek D A, Briggs F H. *ApJ*, 1995, 449: 488
- [35] Jannuzi BT, Buell T, Bahcall J N, et al. *ApJS*, 1998, 118: 1
- [36] Zwaan M A, van der Hulst J M, Briggs F H, et al. *MNRAS*, 2005, 364: 1467
- [37] Ellison S L, Hall P B, Lira P. *AJ*, 2005, 130: 1345
- [38] Ellison S L, York B A, Pettini M, et al. *MNRAS*, 2008, 388: 1349
- [39] Ellison S L, Lopez S. *MNRAS*, 2009, 397: 467
- [40] Rao S M. *IAU Colloquium 199*, Cambridge: Cambridge University Press. 2005: 125
- [41] Nestor D B, Turnshek D A, Rao S M. *ApJ*, 2005, 628: 637
- [42] Bahcall J N, Peebles P J E. *ApJ*, 1969, 156: L7
- [43] Tytler D. *Nature*, 1982, 298: 427
- [44] Prochaska J X, Wolfe A M. *ApJ*, 2009, 696: 1543 (PW09)
- [45] Tytler D. *ApJ*, 1987, 321: 49
- [46] Lanzetta K M. *ApJ*, 1991, 375: L1
- [47] Ryan-Weber E V, Webster R L, Staveley-Smith L. *MNRAS*, 2003, 343: 1195
- [48] Petitjean P, Bergeron J, Puget J L. *A&A*, 1992, 265: 375
- [49] Schaye J. *ApJ*, 2001, 562: L95
- [50] Zwaan M A, Prochaska J X. *ApJ*, 2006, 643: 675
- [51] Gupta N, Srianand R, Petitjean P, et al. *MNRAS*, 2009, 398: 201
- [52] Komatsu E, Dunkley J, Nolte M R. *ApJS*, 2009, 180: 330
- [53] Ostriker J P, Heisler J. *ApJ*, 1984, 278: 1
- [54] Pei Y C, Fall S M, Bechtold J. *ApJ*, 1991, 378: 6
- [55] Fall S M, Pei Y C. *ApJ*, 1993, 402: 479
- [56] Pettini M, King D L, Smith L J, et al. *ApJ*, 1997, 478: 536
- [57] Murphy M T, Liske J. *MNRAS*, 2004, 354: L31
- [58] Pettini M, Smith L J, Hunstead R W, et al. *ApJ*, 1994, 426: 79
- [59] Junkkarinen V T, Cohen R D, Beaver E A, et al. *ApJ*, 2004, 614: 658
- [60] Zhou H, Ge J, Lu H, et al. *ApJ*, 2010, 708: 742
- [61] Motta V, Mediavilla E, Muñoz J A, et al. *ApJ*, 2002, 574: 719
- [62] Bartelmann M, Loeb A. *ApJ*, 1996, 457: 529
- [63] Maller A H, Flores R A, Primack J R. *ApJ*, 1997, 486: 681
- [64] Vladilo G, Peroux C. *A&A*, 2005, 444: 461
- [65] Pei Y C, Fall S M. *ApJ*, 1995, 454: 69
- [66] Trenti M, Stiavelli M. *ApJ*, 2006, 651: 51

- [67] Hou J L, Shu C G, Shen S Y, et al. ApJ, 2005, 624: 561
- [68] Wolfe A M, Gawiser E, Prochaska J X. ApJ, 2003, 593: 235
- [69] Wolfe A M, Prochaska J X, Gawiser E. ApJ, 2003, 593: 215
- [70] Prochaska J X, Wolfe A M. ApJ, 2000, 533: L5
- [71] Prochaska J X, Wolfe A M, Howk J C, et al. yCat, 2009, 217: 10029
- [72] Wild V, Hewett P C, Pettini M. MNRAS, 2006, 367: 211

Progress in Research of Damped Lyman Alpha Systems (DLAs) (I): Survey and Statistical Properties

HOU Jin-liang, SHI Xi-heng, FU Cheng-qi

(Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Shanghai 200030, China)

Abstract: Damped Lyman α Absorption systems (DLAs) are high column density gaseous systems ($\lg(N_{\text{H I}}) > 20.2$), detected through their absorption lines in the optical spectra of quasars at up to relatively high redshifts (~ 5). They are regarded as the reservoirs of neutral gas in the Universe. Their study constitutes a powerful means to investigate the properties of distant galaxies and intergalactic medium (IGM). In this first one of the two review papers, we give a detailed introduction to the recent progress in DLAs surveys. The next will review the results and progress in cosmic abundances of chemical elements and galactic evolution based on DLAs surveys and researches.

The first systematic search for DLAs was done by Wolfe et al. in 1986. This Lick survey has found 15 systems at a mean redshift of 2.5 along the line of sight of 68 QSOs. Later, a series of surveys found more DLAs absorbers, but most of them are biased towards high redshifts since surveys at low and intermediate redshifts are difficult due to the lack of UV observations. In the recent years, the number of DLAs has increased substantially, especially from Sloan Digital Sky Survey (SDSS). After mining the thousands of QSOs spectra from SDSS, Prochaska et al. and Noterdaeme et al. have found 738 and 937 DLAs respectively, increasing by one order of magnitude the number of known DLAs. The large sample of DLAs has statistically derived and/or confirmed some important results about the properties of neutral gas evolution across the cosmic time.

One of the important quantities of DLAs from these surveys is the frequency distribution function $f(N, \text{H I})$. Early surveys show that this function can be described by a power law. But recent large sample surveys show that the slope of $f(N, \text{H I})$ is much larger at high column

density ($\lg(N_{\text{H I}}) > 21.5$). The whole shape can be well fitted by a double power law or Gamma-function. The large slope at high column density implies that the systems at large neutral column density are rare. On the other hand, the shapes of $f(N, \text{H I})$ for different redshifts are similar. This invariant suggests that the DLAs might not consume the gas according to the classical Kennicutt-Schmidt star formation law and that the accretion of gas into existing H I galaxies must be balanced by the consumption of gas into stars and its removal from galaxies.

DLAs contain most of the neutral gas in the Universe at $0 < z < 5.0$. The results from surveys show that the cosmological mass density of neutral gas is indeed dominated by DLAs for redshifts between 2.2 and 5.0. But there still exist some controversies for the cosmic evolution of $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$, the mass density of neutral gas in DLAs, especially at low redshifts between 0 and 2. The measured $\Omega_{\text{g}}^{\text{DLA}}$ at $z \sim 3$ is about 10^{-3} . This is only about 2% of the total baryon at high redshift, implying that most of the baryons are in the form of ionized gas in IGM. The measured amount of baryons in stars at present epoch is about two times larger than the neutral gas contained in DLAs at redshift $z \sim 3$. This means that the DLAs phase must be replenished by gas before they evolved into the present galaxies. This could be strong evidence of gas accretion and/or recombination of ionized gas from IGM or walls of supershells. These results provide strong constraints for the numerical simulation of galaxies evolution.

DLAs surveys are suffered by two kinds of bias, the dust and the gravitational lensing biases. Dust could be the most serious factor for optically selected survey. Radio selected surveys demonstrate that the missing DLAs from optically selected survey could be 50% at most. Usually, there are some methods to detect the dust in DLAs. First method is to compare the spectral indices of quasars with and without DLAs along the lines of sight. From this, we could deduce the extinction and dust-to-gas ratio in DLAs. But it needs an unbiased sample of quasars with DLAs. The second is to measure abundance ratio of iron-peak elements with zinc, which is an indicator of dust depletion. The third is to search for the 2 175 Å bump or the diffuse interstellar bands (DIBs) in the spectra of the background quasars.

Another bias is induced by the gravitational lensing effect. This effect could increase the mass density of DLAs by 10%~20%. But this has little effect on the cosmic evolution of DLAs mass density. However, the effect could be more important for the samples of DLAs at lower redshifts.

Key words: quasar; absorption system; intergalactic medium; galactic evolution