

# 赖曼 $\alpha$ 森林的研究进展 (I) : 观测

黄克谅      周洪楠

(南京师范大学物理系 南京 210097)

## 摘 要

Hubble 空间望远镜和 Keck 镜投入使用 10 年来, 赖曼  $\alpha$  森林的研究取得了巨大进展, 使人们对其性质和起源有了新的认识。评述了观测方面的主要成果, 包括柱密度、多普勒参数、元素丰度、吸收体形状和尺度、空间分布、演化、与星系的关系等。

**关键词** 类星体 — 赖曼  $\alpha$  森林 — 星系际介质

**分类号** P158

## 1 引 言

Lynds 在 1971 年指出<sup>[1]</sup>, 高红移类星体的赖曼  $\alpha$  发射线短波一侧的大部分窄吸收线是中性氢的赖曼  $\alpha$  线。在此后的 30 年间, 对这些被称为赖曼  $\alpha$  森林 (Sargent 等人 (1980)<sup>[2]</sup>) 的吸收线进行了广泛的研究。通过对大量中低分辨率光谱的研究, 已经在 20 世纪 80 年代中期确定了赖曼  $\alpha$  森林的基本观测特征。它们与类星体光谱中所谓重元素吸收系统有着完全不同的性质。20 世纪 80 年代后期开展了类星体吸收线高分辨率光谱的观测研究。然而, 由于类星体一般都很暗, 要获得高信噪比的高分辨率光谱, 即便是 4m 级的望远镜, 耗时也过多。另一方面, 由于观测窗口的限制, 通过地面望远镜无法研究低红移的赖曼  $\alpha$  森林。

20 世纪 90 年代以来, 哈勃空间望远镜 (HST) 和 Keck 镜相继投入使用, 极大地促进了赖曼  $\alpha$  森林的观测研究。现在, 人们可以获得红移从 0 到 5 的广阔空时范围内的赖曼  $\alpha$  森林的高质量观测资料, 对其进行深入细致的研究。理论方面, 20 世纪 90 年代广泛开展的宇宙等级式结构形成模型的流体模拟计算取得了巨大进展, 使人们对赖曼  $\alpha$  森林的本质有了新的认识。

本文简要介绍近年来在赖曼  $\alpha$  森林的观测研究方面取得的进展。关于赖曼  $\alpha$  森林的较早期的评述见 Weymann 等人 (1981)<sup>[3]</sup>、Sargent (1987)<sup>[4]</sup>、Huang (1993)<sup>[5]</sup>, 近期的, 见 Rauch (1998)<sup>[6]</sup>。

## 2 基本观测量和观测结果

### 2.1 等值宽度和柱密度

等值宽度是直接可观测量。影响等值宽度测量的主要因素是谱线的重叠。赖曼  $\alpha$  线数很多, 在中低分辨率光谱里, 许多谱线分解不开。即使在高分辨率光谱里, 线翼部分也可能重叠。因此, 常需做致淆改正 (confusion correction)。常用的方法是假定谱线具有 Voigt 轮廓, 选定适当的参数后将谱线分解开。当讨论赖曼  $\alpha$  森林的性质时, 等值宽度的分布是一个重要的统计量。大量研究表明, 等值宽度分布函数取指数形式:  $n(W) = \partial^2 N / \partial W \partial z \propto \exp(-W/W^*)$ , 这里,  $W$  为静止坐标系里的等值宽度,  $W^*$  为常数,  $N$  为线数。中低分辨率光谱的研究结果为:  $W^* \approx 0.25 \sim 0.32 \text{ \AA}$ , 如 Bechtold (1994)<sup>[7]</sup> 得到,  $W^* \approx 0.27 \text{ \AA}$ 。高分辨率光谱得到的值略低些。Kulkarni 等人 (1996)<sup>[8]</sup> 分析了 Q1331+170 的高分辨率光谱, 在不同的谱线拟合技术的假定下得到了几组赖曼  $\alpha$  森林线的样本, 求得  $W^* \approx 0.1 \sim 0.2 \text{ \AA}$ 。Murdoch 等人 (1986)<sup>[9]</sup> 指出, 在  $W < 0.2 \text{ \AA}$  时, 分布函数变陡。然而, 以后的高分辨率资料并未证实此结果。另外, 分布函数的形式及  $W^*$  的值可能与红移有关。

由等值宽度可以求得更有物理意义的量——柱密度。对于未饱和的弱线, 即在生长曲线线性部分的线, 只要假定了 Voigt 轮廓, 很容易从等值宽度求得柱密度。对于强线, 这种转换非常困难。赖曼  $\alpha$  森林的柱密度  $N_{\text{HI}}$  差别很大: 从 Keck 镜探测极限的  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  直到大于  $10^{22} \text{ cm}^{-2}$ , 平均  $10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 。

柱密度  $N_{\text{HI}}$  的分布是赖曼  $\alpha$  森林的重要统计量。任何关于赖曼  $\alpha$  森林的理论模型都必须说明观测到的柱密度分布。通常, 柱密度的分布取幂律谱形式:  $dN/dN_{\text{HI}} \propto N^{-\beta}$ 。高分辨率资料表明<sup>[5,6]</sup>,  $\beta = 1.7 \sim 2.0$ 。当然, 这种幂律谱分布只在一定的柱密度范围内成立。然而, 近年来的许多研究 (如 Kulkarni 等人 (1996)<sup>[8]</sup>、Khare 等人 (1996)<sup>[10]</sup>、Giallongo 等人 (1993)<sup>[11]</sup> 等) 指出, 单一的幂律谱不能很好地拟合观测资料。在  $N_{\text{HI}} > 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  高柱密度区, 分布变陡。不过, Keck 镜的高分辨率资料 (如 Kim 等人 (1997)<sup>[12]</sup>、Kirkman 和 Tytler (1997)<sup>[13]</sup>、Hu 等人 (1995)<sup>[14]</sup>、Lu 等人 (1996)<sup>[15]</sup> 等) 似乎表明, 在  $10^{12} \text{ cm}^{-2} < N_{\text{HI}} < 10^{22} \text{ cm}^{-2}$  的范围内幂律谱分布都成立, 并不支持上述结论。 $\beta$  是否依赖于柱密度, 尚须进一步研究。

上面给出的是地面望远镜的观测结果, 也就是说, 反映了  $z > 1.7$  的高红移赖曼  $\alpha$  森林的性质。对于低红移赖曼  $\alpha$  森林, 现也积累了不少 HST 的观测资料。Penton 等人 (2000)<sup>[16]</sup> 获得了 15 个河外天体的 HST 高分辨率光谱, 研究了  $0.002 < z < 0.069$  的低红移赖曼  $\alpha$  森林。结果表明,  $W^* \approx 27 \text{ m\AA}$ , 远小于高红移赖曼  $\alpha$  森林的  $W^*$  值。同时, 在  $W < 133 \text{ m\AA}$  的区间, 等值宽度的分布明显变化, 似乎证实了 Murdoch 等人 (1986)<sup>[9]</sup> 的结果。等值宽度分布的这种变化实际上可能反映了在弱线区等值宽度的分布不是指数型, 而是幂律谱 (Jenkins 和 Ostriker (1991)<sup>[17]</sup>、Press 和 Rybicki (1993)<sup>[18]</sup>)。至于柱密度的分布, 对各种样本得到在  $12.3 < \log N_{\text{HI}} < 16.0$  区间,  $1.4 < \beta < 1.7$ , 比高红移的值略小。另外, 在  $N_{\text{HI}} \approx 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  两边,  $\beta$  值略有变化, 支持了 Kulkarni 等人 (1996)<sup>[8]</sup> 的结果, 但很不确定。比较高低红移的观测结果,  $\beta$  值似乎不随红移演化。但目前掌握的资料不多, 具体情况如何尚有待于进一步研究。

### 2.2 多普勒宽度和温度

多普勒宽度  $b = (V_0^2 + V_t^2)^{1/2}$ , 其中,  $V_0$  为热运动速度,  $V_t$  为湍流速度。用 Voigt 轮廓拟合谱线可直接求得  $b$  值。 $b$  是一个很重要的物理量。一方面, 它涉及到吸收物质的温度, 另一方面, 利用生长曲线由等值宽度求柱密度时也需要知道  $b$  值。同讨论柱密度和等值宽度一样, 我们关心的是  $b$  的分布、适用范围、以及这种分布是否随红移演化。

20 世纪 90 年代的各种高分辨率光谱 (如 Kulkarni 等人 (1996)<sup>[8]</sup>、Khare 等人 (1996)<sup>[10]</sup>、Kim 等人 (1997)<sup>[12]</sup>、Hu 等人 (1995)<sup>[14]</sup>、Lu 等人 (1996)<sup>[15]</sup>、Rauch 等人 (1992)<sup>[19]</sup>、Rauch 等人 (1993)<sup>[20]</sup>、Savaglio 等人 (1999)<sup>[21]</sup>、Carswell 等人 (1991)<sup>[22]</sup> 等) 的分析表明, 在  $1.2 < z < 4.0$  ( $z$  为红移, 下同) 时,  $b$  值一般为  $15 \sim 55 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 很少看到  $b < 15 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  的谱线;  $b$  的分布类似于高斯分布, 其中值  $\langle b \rangle$  为  $25 \sim 35 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。如果湍流对  $b$  的贡献可以忽略, 这个  $\langle b \rangle$  值意味着吸收气体的温度  $T \approx 5 \times 10^4 \text{ K}$ 。

$b$  与红移有关吗? Williger 等人 (1994)<sup>[23]</sup> 发现, 在  $z \approx 4$  时,  $\langle b \rangle \approx 20 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 对比其它研究结果, 这似乎表明,  $b$  随红移演化: 红移增加,  $b$  减小。Kim 等人 (1997)<sup>[12]</sup> 的研究也得出在低红移时  $b$  值变大。然而, 其它大量的研究却未证实上述结果。最近 Penton 等人 (2000)<sup>[16]</sup> 也研究了  $b$  的分布, 得到在  $0.002 < z < 0.069$  时,  $\langle b \rangle \approx 35 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 略大于高红移的  $b$  值, 统计上并不支持  $b$  随红移演化的结论。Shull 等人 (2000)<sup>[24]</sup> 则利用低红移 ( $z < 0.07$ ) 赖曼  $\beta$  森林的 FUSE 资料, 从  $\text{Ly}\beta/\text{Ly}\alpha$  推出  $b$  的中值  $\langle b \rangle = 28 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 平均值  $(31.4 \pm 7.4) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 与高红移的值相当。Ricotti 等人 (2000)<sup>[25]</sup>、Bryan 和 Machacek (2000)<sup>[26]</sup> 提出, 用星系际物质的“有效物态方程”去拟合赖曼  $\alpha$  线, 得出  $z$  从 3 变到 0,  $b$  反而减小。因此, 目前尚无确凿的证据证明  $b$  随红移而变。

从  $b$  值很难准确地求得温度  $T$ 。主要是我们完全不知道吸收体里湍流的情况。Pettini 等人 (1990)<sup>[27]</sup> 分析了 Q2206-199N 的高分辨率光谱, 发现  $b$  和  $N_{\text{H I}}$  相关, 并由此推论湍流是主要的加宽机制, 因而赖曼  $\alpha$  吸收体的温度应低到  $5000 \sim 10000 \text{ K}$ 。这项研究引发了一场争论。20 世纪 90 年代的许多研究 (如 Rauch 等人 (1992)<sup>[19]</sup>、Rauch 等人 (1993)<sup>[20]</sup> 及前面提到的一系列论文) 都讨论了  $b$ - $N$  相关的问题。有些研究发现了  $b$ - $N$  相关, 有些则没有。现在, 这场争论已趋平静。普遍的看法是所谓的  $b$ - $N$  相关是不真实的。噪音使弱线 (低柱密度线) 的  $b$  值减小, 相关性是选择效应造成的。因此, 吸收体的温度不会如 Pettini 等人 (1990)<sup>[27]</sup> 想象的那么低。虽然  $b$ - $N$  的相关是不真实的, 但在  $b$ - $N$  图上人们发现,  $b$  似乎有下截断, 而且此截断随  $N$  的增大而缓慢增加。另加, 有些线的  $b$  特别大,  $b$  的分布存在高  $b$  “尾”。(见 Kim 等人 (1997)<sup>[12]</sup>、Kirkman 等人 (1997)<sup>[13]</sup>、Hu 等人 (1995)<sup>[14]</sup>、Lu 等人 (1996)<sup>[15]</sup> 等)。Bryan 和 Machacek (2000)<sup>[26]</sup>、Hui 和 Lutledge (1999)<sup>[28]</sup> 等讨论了  $b$  分布的这些特点的意义。

从  $b$  求温度还有一个问题。谱线轮廓不一定是 Voigt 轮廓。除了热运动和湍流外, 引起谱线加宽的还有别的许多因素, 如旋转 (Prochaska 和 Wolfe (1997)<sup>[29]</sup>)、坍缩 (Meiksin (1994)<sup>[30]</sup>)、外流 (Wang (1995)<sup>[31]</sup>) 等。下面我们将看到, 赖曼  $\alpha$  吸收体的尺度很大, 可能达  $1 \text{ Mpc}$ , 因此, 还需考虑 Hubble 膨胀引起的加宽 (Weinberg 等人 (1997)<sup>[32]</sup>)。但要从观测上准确地估计这些因素的影响相当困难。

理论方面, 光致电离模型要求赖曼  $\alpha$  吸收体的温度约为  $30000 \text{ K}$ , 考虑其它一些因素 (如逆康普顿冷却) 温度还会低些。尽管  $b$  值实际上给出的是温度的上限, 但其值明显地高于近年来 CDM 宇宙学模拟计算预言的温度。Theuns 等人 (2000)<sup>[33]</sup> 及其他一些人讨论了这个问题。

### 2.3 元素丰度

20 世纪 90 年代以前, 虽然有些观测提供了在赖曼  $\alpha$  森林吸收体里探测到重元素的证据 (Meyer 和 York(1987)<sup>[34]</sup>、Lu(1991)<sup>[35]</sup>), 但绝大多数观测却得到否定的结果<sup>[2]</sup>。因此, 通常认为, 赖曼  $\alpha$  吸收气体是原始的, 其重元素丰度小于  $10^{-3}$  太阳丰度。

探测赖曼  $\alpha$  森林吸收系统的重元素吸收线需要获得高分辨率高信噪比光谱, 相当困难。Keck 望远镜可以探测到柱密度低到  $10^{12}\text{cm}^{-2}$  的弱线, 它的投入使用极大地促进了重元素吸收线的探测工作。然而, 即便如此, 还需用一些特别的处理方法。最常用的是所谓“平移堆积”法。将观测到的类星体光谱平移到每一条赖曼  $\alpha$  森林线的静止坐标系里, 得到若干条光谱, 然后把这些光谱加起来, 得到一条高信噪比的合成光谱。在这条合成光谱里搜索重元素谱线。有时为了最大限度提高信噪比, 甚至于可将两个或多个类星体的光谱加起来。

Cowie 等人 (1995)<sup>[36]</sup>、Tytler 等人 (1995)<sup>[37]</sup> 利用 Keck 镜的 HIRES 光谱发现, 50% 以上的柱密度大于  $3 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$  的赖曼  $\alpha$  森林线系统 ( $z \approx 3$ ) 与 C IV 线成协, 与 Womble 等人 (1996)<sup>[38]</sup> 预言的结果一致。稍后, Songaila 和 Cowie (1996)<sup>[39]</sup> 得到了更高信噪比的光谱, 他们的分析表明, 大约 75% 的柱密度大于  $3 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$  的赖曼  $\alpha$  森林线系统和 90% ~ 100% 的柱密度大于  $10^{15.2}\text{cm}^{-2}$  的赖曼  $\alpha$  森林线吸收系统 ( $z \approx 3$ ) 与 C IV 吸收成协。此外, 他们还探测到 Si IV, C II, N V 等吸收。从上述观测推断, 柱密度大于  $3 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$  的高红移赖曼吸收体的金属度  $[C/H] \approx -2.5$ , 大约为太阳的 1/100。Dave 等人 (1998)<sup>[40]</sup> 以及 Ellison 等人 (1999)<sup>[41]</sup> 利用 QSO APM 08279+5525 的 HIRES 光谱进行的研究, 证实了上述结果。

柱密度低于  $3 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$  的赖曼  $\alpha$  森林系统的情况如何? Lu 等人 (1998)<sup>[42]</sup> 利用 Keck 镜得到 9 个类星体的高信噪比光谱, 研究了红移在 2.2 ~ 3.6、柱密度为  $10^{13.5}\text{cm}^{-2} \sim 10^{14}\text{cm}^{-2}$  的赖曼  $\alpha$  森林, 结果并未探测到 C IV 吸收。他们给出上限:  $[C/H] < -3.5$ , 这个值比高柱密度赖曼  $\alpha$  森林的  $[C/H] \approx -2.5$  小一个量级。Ellison 等人 (1999)<sup>[41]</sup> 也分析了 QSO APM 08279+5525 中的  $10^{13.5}\text{cm}^{-2} < N_{\text{HI}} < 10^{14}\text{cm}^{-2}$  的赖曼  $\alpha$  森林线。他们按 51 条低柱密度赖曼  $\alpha$  线的静止波长堆积光谱, 得到一条信噪比达 580 的合成光谱, 但是, 并没有探测到 C IV 线。他们又用了 Cowie 和 Songaila (1998)<sup>[43]</sup> 提出的“逐点光深” (pixel-pixel optical depth) 技术, 虽然得到了存在 C IV 线的证据, 但很不确定。Ellison 等人 (2000)<sup>[44]</sup> 最近又得到了 Q1422+231 的高信噪比光谱, 联合 APM 08279+5525 的光谱, 将光谱按 67 条  $10^{13.5}\text{cm}^{-2} < N_{\text{HI}} < 10^{14}\text{cm}^{-2}$  的赖曼  $\alpha$  森林线的静止波长堆积, 得到一条信噪比高达 1250 的合成光谱, 仍未探测到 C IV 吸收。但是, 他们指出这是由于“平移堆积”法的缺点, 低估了 C IV 的含量。应用更好的“逐点光深”技术, 确实发现了 C IV 吸收。但要准确地测定 C IV/H I 相当困难。低柱密度赖曼  $\alpha$  云的重元素丰度看来与高柱密度云并无显著差别, 但要直接探测这些重元素吸收线非常困难, 因为它们的强度可能在探测极限以下。

利用 HST 可以探测低红移赖曼  $\alpha$  森林吸收体的重元素吸收线。Pento 等人 (2000)<sup>[16,45]</sup>、Barlow 和 Tytler (1998)<sup>[46]</sup> 等做了这种尝试, 但探测的结果不确定, 仅给出上限。最近, Dave 等人 (2001)<sup>[47]</sup> 利用 3C273 的 HST/STIS 光谱探测了  $N_{\text{HI}} > 10^{14}\text{cm}^{-2}$  的低红移赖曼  $\alpha$  森林的重元素, 也仍只有上限:  $[C/H] < -1.7$ 。

可以肯定地说, 至少高红移赖曼  $\alpha$  云的重元素丰度比原始丰度高得多。这就提出一个问题: 什么过程造成赖曼  $\alpha$  云的增丰? 可能的增丰过程有两个: 一是与星族 III 恒星有关的早期

恒星形成引起增丰。另一是来自星系际云周围的星系或星系际云本身恒星形成的污染。有关的讨论可参见 Gnedin 和 Ostriker (1997)<sup>[48]</sup>、Gnedin (1998)<sup>[49]</sup>、Hellsten 等人 (1997)<sup>[50]</sup> 等论文。

## 2.4 吸收体大小和形状

至今未找到赖曼  $\alpha$  森林的对应体, 难以直接确定其大小和形状。通常可以通过对引力透镜类星体或者“类星体对”的观测, 寻找其光谱中共同的赖曼  $\alpha$  森林线, 以确定赖曼吸收体的尺度。由此得到的是赖曼  $\alpha$  吸收体大小的下限。

对引力透镜类星体 Q0957+561A,B 的观测 (Young 等人 (1981)<sup>[51]</sup>) 给出吸收体尺度下限约为  $7h^{-1}\text{kpc}$  ( $h = H_0/100$ , 下同), 对 Q2345+007A,B 的观测 (Foltz 等人 (1984)<sup>[52]</sup>、McGill(1990)<sup>[53]</sup>) 给出  $1 \sim 11h^{-1}\text{kpc}$ 。随后, Smette 等人 (1992)<sup>[54]</sup> 对 UM673 的观测得到下限为  $12h^{-1}\text{kpc}$ , Smette 等人 (1995)<sup>[55]</sup> 对 Q1104-1805A,B 的观测得到的数值略大一些, 即  $25h^{-1}\text{kpc}$ 。从引力透镜类星体的观测, 人们普遍认为, 产生赖曼  $\alpha$  森林线的吸收云的大小约为几十 kpc, 与星系的大小同量级。

然而, 近年来对类星体对的观测却令人大吃一惊, 得到的赖曼  $\alpha$  吸收体的大小比想象中的要大得多。Bechtold 等人 (1994)<sup>[56]</sup>、Dinshaw 等人 (1994)<sup>[57]</sup> 分析了类星体对 Q1343+266A,B 的观测资料, 得出在  $z \approx 2$  处的赖曼  $\alpha$  吸收体的大小达几百 kpc。Dinshaw 等人 (1995)<sup>[58]</sup> 从类星体对 Q0107-025A,B 的 HST 光谱得出在  $0.5 < z < 0.9$  的吸收体的尺度至少为  $150h^{-1}\text{kpc}$ , 甚至可达 1 Mpc。Fang 等人 (1996)<sup>[59]</sup> 对类星体对 Q1343+266A,B 重新进行了观测分析, 得出在  $z \approx 2$  处的吸收体的大小为  $61 \sim 533h^{-1}\text{kpc}$ , 平均为  $149h^{-1}\text{kpc}$ 。Dinshaw 等人 (1997)<sup>[60]</sup> 进一步分析了 HST 微弱天体摄谱仪得到的 Q0107-025A,B 的紫外光谱, 得到在  $0.5 < z < 0.9$  区间, 吸收体的大小为  $345 \sim 1520h^{-1}\text{kpc}$ , 平均为  $505h^{-1}\text{kpc}$ 。D'Odorico 等人 (1998)<sup>[61]</sup> 观测了另一个类星体对 Q0307-195A,B, 得出  $(298 < R < 426)h^{-1}\text{kpc}$ , 典型值  $R = 362h^{-1}\text{kpc}$ 。Dinshaw 等人 (1998)<sup>[62]</sup> 观测了 LB9605(即 Q1517+2305,  $z = 1.834$ ) 和 LB9612(即 Q1517+2356,  $z = 1.903$ ), 在其 HST 光谱中找到 5 条共同的赖曼  $\alpha$  吸收线, 得出  $(305 < R < 595)h^{-1}\text{kpc}$ , 最可能的值  $R = 380h^{-1}\text{kpc}$ 。Monier 等人 (1999)<sup>[63]</sup> 分析了 5 个类星体的光谱, 得到在  $z = 0.7$  时,  $(135 < R < 218)h^{-1}\text{kpc}$ , 最可能的值为  $159h^{-1}\text{kpc}$ 。最近, Young 等人 (2001)<sup>[64]</sup> 重新对类星体对 Q0107-025A,B 以及 LBQS0107-0232 进行了观测, 得到了这个三重类星体的 HST 光谱。对它们共同的赖曼  $\alpha$  森林吸收线的分析表明,  $0.4 < z < 0.9$  的低红移吸收体的尺度达  $0.5 \sim 1h^{-1}\text{Mpc}$ 。总之, 赖曼  $\alpha$  吸收体的大小至少达几百 kpc。

另一有趣的结果是, Dinshaw 等人 (1998)<sup>[62]</sup> 发现, 赖曼  $\alpha$  吸收体的尺度随红移演化, 即红移减小时赖曼  $\alpha$  吸收体的特征尺度增大。然而, Crotts 和 Fang (1998)<sup>[65]</sup> 分析了类星体对 LB 9605 和 LB 9612 以及三重类星体 KP 76 (Q1623+2651A,  $z = 2.467$ )、KP 77 (Q1623+2653,  $z = 2.526$ )、KP 78 (Q1623+2651B,  $z = 2.605$ ) 的高信噪比光谱, 并未找到特征尺度随红移演化的证据。特征尺度是否演化的问题尚需进一步研究。

上面提到的尺度是假定吸收体为球状时得到的。如此巨大的吸收体对以往关于赖曼  $\alpha$  森林起源的理论提出了严重的挑战。基于光致电离模型, 从观测到的尺度和柱密度算得的宇宙中的重子数将太多。因此, 人们认为, 赖曼  $\alpha$  吸收体可能不是球状, 而是片状或者纤维状。宇宙结构形成的  $N$  体模拟也表明, 赖曼  $\alpha$  吸收体可能具有片状结构。基于片状吸收体模型,

Dinshaw 等人 (1997)<sup>[60]</sup> 求得吸收体的特征尺度在  $470 \sim 2310h^{-1}\text{kpc}$  之间, 平均为  $715h^{-1}\text{kpc}$ ; D'Odorico 等人 (1998)<sup>[61]</sup> 得到  $333 \sim 514h^{-1}\text{kpc}$ , 典型值  $412h^{-1}\text{kpc}$ ; Monier 等人 (1999)<sup>[63]</sup> 则得到  $157 \sim 289h^{-1}\text{kpc}$ , 平均  $196h^{-1}\text{kpc}$ 。Young 等人 (2001)<sup>[64]</sup> 的分析指出, 至少有一个强吸收体呈片状结构。Crotts 和 Fang (1998)<sup>[65]</sup> 对不同的等值宽度阈做了更详细的分析并指出, 只有  $W > 0.4$  的赖曼  $\alpha$  吸收体才呈片状结构。很可能, 典型的赖曼  $\alpha$  吸收体呈盘状, 其厚度  $\approx 30h^{-1}\text{kpc}$ , 盘的直径  $\approx 1h^{-1}\text{Mpc}$ (Rauch 和 Haehnelt(1995)<sup>[66]</sup>)。

## 2.5 演 化

观测上确定吸收体数目的演化常表为下式:  $dN/dz = (dN/dz)_0(1+z)^\gamma$ , 其中,  $dN/dz$  为单位红移间隔的赖曼  $\alpha$  森林数,  $(dN/dz)_0$  为  $z=0$  时的数目,  $\gamma$  为演化参数。如果没有演化, 则  $\gamma = 1$  ( $q_0 = 0$ ) 或  $\gamma = 1/2$  ( $q_0 = 1/2$ ), 因此,  $\gamma > 1$  意味着强烈演化。

对于  $1.7 < z < 4$  的赖曼  $\alpha$  森林, 无论是中低分辨率或高分辨率光谱的分析研究都表明:  $\gamma > 1$ , 赖曼  $\alpha$  森林有强烈的宇宙演化。由于不同的作者采用的样本不同, 得到的  $\gamma$  值不同, 适用区间 (如红移, 柱密度等) 也不同。表 1 列出在  $1.7 < z < 4$  红移区间赖曼  $\alpha$  森林演化的一些研究结果。

表 1 在  $1.7 < z < 4$  区间赖曼  $\alpha$  森林演化的研究结果

| 作 者                                 | $\gamma$        | 适用范围                             | 方 法   |
|-------------------------------------|-----------------|----------------------------------|---|
| Lu 等人 (1991) <sup>[67]</sup>        | $2.75 \pm 0.29$ | $W > 0.36 \text{ \AA}$           | 中低分辨率光谱谱线计数                                   |
| Bechtold (1994) <sup>[7]</sup>      | $1.89 \pm 0.28$ | $W > 0.32 \text{ \AA}$           | 中低分辨率光谱谱线计数                                   |
| Cristiani 等人 (1995) <sup>[68]</sup> | $1.86 \pm 0.21$ | $\log N_{\text{H I}} \geq 13.8$  | 高分辨率光谱谱线计数                                    |
| Giallongo 等人 (1996) <sup>[69]</sup> | 2.7             | $\log N_{\text{H I}} \geq 14$    | 高分辨率光谱谱线计数                                    |
| Kim 等人 (1997) <sup>[12]</sup>       | $2.78 \pm 0.71$ | $\log N_{\text{H I}} \geq 13.77$ | 高分辨率光谱谱线计数                                    |
| Cooke 等人 (1997) <sup>[70]</sup>     | $2.9 \pm 0.3$   |                                  | 高分辨率光谱谱线计数                                    |
| Press 等人 (1993) <sup>[71]</sup>     | $2.46 \pm 0.37$ |                                  | 测量共振线有效光深                                     |
| Zuo 和 Lu (1993) <sup>[72]</sup>     | $2.87 \pm 0.23$ |                                  | $\text{Ly}\alpha \sim \text{Ly}\beta$ 发射线流量减缩 |

最近, Scott 等人 (2000)<sup>[73]</sup> 利用 MMT 得到 39 个类星体的中等分辨率光谱, 结合其它 60 个类星体的中分辨率资料, 获得一个  $1.6 < z < 4.1$  包括 2079 条赖曼  $\alpha$  森林线的均匀样本, 对演化进行了详细的研究。结果表明, 对  $W > 0.32\text{\AA}$  的线,  $\gamma = 1.88 \pm 0.22$ , 与以前的结果 (Bechtold (1994)<sup>[7]</sup>) 完全一致。进一步的统计检验表明, 在整个红移区间,  $\gamma$  值不变。在高分辨率光谱方面, Kim 等人 (2001)<sup>[74]</sup> 获得了三个类星体高分辨率、高信噪比 VLT/UVES 光谱, 结合其它类星体的高分辨率光谱资料, 得到一个  $1.5 < z < 4$  的样本, 并求得  $\gamma = 2.19 \pm 0.27$  (对  $N_{\text{H I}} = 10^{13.66} \sim 10^{16}\text{cm}^{-2}$ ), 且与红移无关。这两个最新的研究再次表明赖曼  $\alpha$  森林具有强烈的宇宙演化, 而且, 在  $1.6 \sim 4$  的红移区间, 演化参数与红移无关。

在  $z < 1.7$  的情形, 只能利用 HST 的观测结果。Morris 等人 (1991)<sup>[75]</sup>、Bahcall 等人 (1991)<sup>[76]</sup>、(1993)<sup>[77]</sup>、(1996)<sup>[78]</sup>、Impey 等人 (1996)<sup>[79]</sup>、Weymann 等人 (1998)<sup>[80]</sup>、Penton 等人 (2000)<sup>[16]</sup> 的研究表明, 在低红移区间观测到的赖曼  $\alpha$  森林线数比高红移区间赖曼  $\alpha$  森林演化规律外推的数目多得多。另外, 演化参数  $\gamma \approx 0.5$ , 几乎不演化 ( $q_0 = 1/2$ )。如 Bahcall 等人 (1996)<sup>[78]</sup> 对  $z < 1.3$ 、 $W > 0.24\text{\AA}$  的赖曼  $\alpha$  线, 得到  $\gamma = 0.58 \pm 0.50$ 。从高红移的强烈

演化过渡到低红移的几乎不演化发生在何处? Impey 等人 (1996)<sup>[79]</sup> 得出在  $z \approx 1$ , Weymann 等人 (1998)<sup>[80]</sup> 得出在  $z \approx 1.7$ , Kim 等人 (2001)<sup>[74]</sup> 则认为在  $z \approx 1.2$ 。

在  $z > 4$  的区间, 目前的资料不多。Williger 等人 (1994)<sup>[81]</sup> 分析了一个高红移类星体的 CTIO 4m 镜资料后发现,  $z > 4$  以后, 演化加快,  $\gamma$  值从略小于 3 增大到 5.5。

赖曼  $\alpha$  森林演化的另一有趣结果是  $\gamma$  值可能与柱密度 (或等值宽度) 有关。Giallongo (1991)<sup>[82]</sup> 分析了四个类星体的高分辨率光谱, 发现随着等值宽度的增加, 演化变慢 ( $\gamma$  减小)。对于  $0.5\text{\AA} > W > 0.3\text{\AA}$  的子样本,  $\gamma = 1.05 \pm 0.85$ , 几乎不演化。这种较差演化似乎同下述观测事实一致: 在高柱密度端, 例如  $N_{\text{H I}} > 10^{17} \text{cm}^{-2}$  的赖曼系限吸收系统, 不演化。然而, Rauch (1992)<sup>[19]</sup> 的分析并未发现这种现象。相反, Bechtold (1994)<sup>[7]</sup> 发现  $\gamma$  值从弱线 ( $W > 0.16\text{\AA}$ ) 的  $1.32 \pm 0.24$  增加到强线 ( $W > 0.32\text{\AA}$ ) 的  $1.89 \pm 0.28$ , 反而是弱线演化慢, 强线演化快。Kim 等人 (1997)<sup>[12]</sup>、Scott 等人 (2000)<sup>[73]</sup> 也得到类似的结果。看来, 较差演化是否存在尚无定论, 还须进一步研究。

## 2.6 紫外背景辐射和 Proximity 效应

由于演化, 在高红移类星体光谱里, 赖曼  $\alpha$  森林线数随红移的增加而迅速增加。但是, 当接近类星体发射线红移时, 线数比按演化规律估计的反而减少。这就是所谓 Proximity 效应, 也称为逆 (inverse) 效应<sup>[3]</sup>。大量的观测 (如 Bechtold (1994)<sup>[7]</sup>、Murdoch (1986)<sup>[83]</sup>) 都证实了该效应的存在。通常对 Proximity 效应的解释是: 赖曼  $\alpha$  云被星系际紫外背景辐射电离, 但类星体发出的强烈的紫外辐射增强了类星体附近的气体云的电离, 使其吸收减少 (见 Tytler (1987)<sup>[84]</sup>、Bajtlik 等人 (1988)<sup>[85]</sup>、Lu 等人 (1991)<sup>[67]</sup> 等文献)。因此, 在红移接近类星体时只能观测到较少的赖曼  $\alpha$  云。

如果上述解释是正确的, 利用 Proximity 效应就可以求得紫外背景辐射。Bajtlik 等人 (1988)<sup>[85]</sup> 发现, 紫外背景辐射平均强度  $J(\nu_0)$  ( $\nu_0$  为赖曼系限) 在  $1.7 < z < 3.8$  区间为常数, 且  $J_{-21} \approx 1 (J(\nu_0) = J_{-21} \times 10^{-28} \text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}, \text{下同})$ 。其它许多研究无论利用的是高分辨率还是中低分辨率光谱都得到类似结果, 只是  $J_{-21}$  的数值不同。Lu 等人 (1991)<sup>[67]</sup> 求得  $J_{-21} \approx 1 (1.7 < z < 3.8)$ ; Bechtold (1994)<sup>[7]</sup> 得到在  $1.6 < z < 4.1$  时,  $J_{-21} \approx 3$ ; Srianand 和 Khare (1996)<sup>[86]</sup> 利用 69 个类星体的中低分辨率光谱, 求得在  $1.7 < z < 4.1$  时,  $J_{-21} \approx 6$ ; Giallongo 等人 (1996)<sup>[69]</sup> 分析了六个类星体的高分辨率光谱后发现, 在  $2.8 < z < 4.1$  时,  $J_{-21} \approx 0.5$ ; 同样是利用高分辨率光谱, Cooke 等人 (1997)<sup>[70]</sup> 则求得  $J_{-21} \approx 1_{-0.3}^{+0.5}$ 。

最近, Scott 等人 (2000)<sup>[87]</sup> 利用 99 个类星体的中等分辨率光谱详细地研究了 Proximity 效应。他们发现, 在类星体发射线红移对应位置的  $1.5h^{-1} \text{Mpc}$  范围内, 赖曼  $\alpha$  线明显减少, 而且该现象与类星体光度有关。因此, Proximity 效应确实存在, 而且, 传统的解释是正确的。他们假定紫外背景光谱在  $1.7 < z < 3.8$  的范围内是均匀的, 求得  $J_{-21} = 1.4_{-0.5}^{+1.1}$ 。

利用不同的样本得到的结果差别很大。影响  $J(\nu_0)$  测量的因素很多。首先需考虑的是类星体本身的红移。由窄的禁线定出的红移同由赖曼等宽发射线定出的不同。禁线定出的略大。这种系统差将影响  $J$  的测量。Scott 等人 (2000)<sup>[87]</sup> 的 99 个类星体样本中, 有些类星体由禁线 (如 [O III] 5007) 定出的红移, 其值比由赖曼  $\alpha$  发射线定出的大了约  $400 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。如果加上这种改正, 定出的背景辐射为:  $J(\nu_0) = 7.0_{-4.4}^{+3.4} \times 10^{-29} \text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。此外, 类星体的光变、引力透镜、赖曼  $\alpha$  森林柱密度分布函数的形状、成团性、其它电离辐射源

等也会对确定  $J$  的测量带来不确定。

在极高红移端, Williger 等人 (1994)<sup>[23]</sup> 求得在  $z \approx 4.2$  时,  $J_{-21} \approx 0.1 \sim 0.3$ ; Lu 等人 (1996)<sup>[15]</sup> 得到类似的结果; 而 Savaglio 等人 (1997)<sup>[88]</sup> 则得到  $J_{-21} \approx 0.7$ 。  $J_{-21}$  值均比  $1.7 < z < 4$  的略低。在  $z < 1.7$  的低红移端, 只能利用 HST 的资料。 Kulkarni 和 Fall(1993)<sup>[89]</sup> 利用 Bahcall 等人 (1993)<sup>[77]</sup> 的 HST/FOS 资料, 求得在  $\langle z \rangle \approx 0.5$  处,  $J_{-21} = 6 \times 10^{-3}$ , 远小于高红移处的值。最近, Scott 等人 (2001)<sup>[90]</sup> 利用 270 个类星体的光谱资料求得  $z \approx 2$  时,  $J(\nu_0) = 7.0_{-4.4}^{+3.4} \times 10^{-29} \text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ;  $1 < z < 1.67$  时  $J(\nu_0) = 1.0_{-0.2}^{+3.8} \times 10^{-22}$ ;  $0.03 < z < 1$  时  $J(\nu_0) = 6.5_{-1.6}^{+3.8} \times 10^{-23}$ , 首次明确提出了 UV 背景辐射随红移演化的证据。

## 2.7 空间分布: 成团性和空洞

赖曼  $\alpha$  森林吸收体的空间分布是否成团一直是人们关注的问题。由于赖曼  $\alpha$  线常挤得很紧, 在研究成团性时, 光谱的分辨率显得特别重要。另外, 即便是高分辨率光谱, 有些谱线还有重叠。因此, 还须采用某种方法分离谱线。通常假定谱线具有 Voigt 轮廓, 选择适当的参数后对混合的谱线进行分离。

研究空间分布最简单最经常采用的方法是计算速度空间里的两点相关函数, 其定义为:  $\xi(\Delta v) = N_{\text{obs}}(\Delta v)/N_{\text{exp}}(\Delta v) - 1$ , 其中,  $N_{\text{obs}}(\Delta v)$  为观测到的在速度间隔  $\Delta v$  内的线对数目,  $N_{\text{exp}}(\Delta v)$  为随机分布时预期的线对数目,  $\Delta v = c(z_2 - z_1)/[1 + (z_2 + z_1)/2]$ ,  $z_1$ 、 $z_2$  为两条线的红移。 Zuo (1992)<sup>[91]</sup>、Zuo 和 Bond (1994)<sup>[92]</sup> 等人指出, 在计算相关函数时, 除了考虑两条线的位置外, 还可考虑其它的因素 (如等值宽度或柱密度)。

大量中低分辨率光谱的两点相关函数分析表明, 赖曼  $\alpha$  森林吸收体的空间分布不成团。这一点同星系、类星体吸收线中的重元素吸收系统形成鲜明对照。但分辨率为  $1\text{\AA}$  或更低的光谱只能研究尺度  $3000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  以上的成团。分辨率  $0.1\text{\AA}$  左右或更高的高分辨率光谱可以研究尺度小到  $300 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  或更小的成团。

高分辨率光谱的两点相关函数的研究得到矛盾的结果。 Rauch 等人 (1992)<sup>[19]</sup> 在  $z \approx 3$  处, Williger 等人 (1994)<sup>[23]</sup> 在  $z \approx 4$  处未探测到任何尺度上的成团; 而 Kirkman 和 Tytler (1997)<sup>[13]</sup> 用了高信噪比的 Keck/HIRES 光谱也未探测到成团。但更多的观测发现赖曼  $\alpha$  森林吸收体在小尺度上成团。早在 20 世纪 80 年代, Webb (1986)<sup>[93]</sup>、Muecket 和 Mueller (1987)<sup>[94]</sup>、Ostriker 等人 (1988)<sup>[95]</sup> 就提出高红移赖曼  $\alpha$  森林小尺度弱成团的证据。20 世纪 90 年代以后, 证据更多。如 Cristiani 等人 (1995)<sup>[68]</sup> 在  $z \approx 3$ 、Hu 等人 (1995)<sup>[14]</sup> 在  $z \approx 2.8$ 、Kulkarni 等人 (1996)<sup>[8]</sup> 在  $z \approx 1.9$ 、Lu 等人 (1996)<sup>[15]</sup> 在  $z \approx 3.7$ 、Fernandez-Soto 等人 (1996)<sup>[96]</sup> 在  $z \approx 2 \sim 3$ 、Cristiani 等人 (1997)<sup>[97]</sup> 在  $z \approx 3.3$ 、Kim 等人 (1997)<sup>[12]</sup> 在  $z \approx 2.8$ 、Khare 等人 (1997)<sup>[10]</sup> 在  $z \approx 2$ 、Savaglio 等人 (1999)<sup>[21]</sup> 在  $z \approx 1.7$ 、Kim 等人 (2001)<sup>[74]</sup> 在  $1.5 < z < 2.4$  以及 Penton 等人 (2000)<sup>[16]</sup> 在低红移 ( $0.002 < z < 0.069$ ) 都找到成团的证据。上述研究还发现, 成团性幅度随柱密度 (等值宽度) 的增加而增加 (Cristiani 等人 (1995)<sup>[68]</sup>、Kim 等人 (2001)<sup>[74]</sup>、Cristiani 等人 (1997)<sup>[97]</sup>); 可能随红移的减小而增加 (Kim 等人 (2001)<sup>[74]</sup>)。现在可以肯定地说, 赖曼  $\alpha$  森林吸收体的空间分布是非均匀的, 具有明显的成团倾向。

上面介绍的是沿某一类星体视线方向的情况, 也就是一维成团。利用类星体对或某一小天区里的多个类星体可以研究赖曼  $\alpha$  森林的二维或三维结构。当然, 这种研究非常困难。前面已经提到, 赖曼  $\alpha$  吸收体的尺度可能大到 Mpc 的量级。当分析类星体对或多重类星体的资

料时, 人们必须判断探测到的究竟是巨大云的不同部分还是小云组成的团或结构。Williger 等人 (2000)<sup>[98]</sup> 利用 1 平方度天区里 10 个类星体的光谱资料, 研究赖曼  $\alpha$  森林在  $2.2 < z < 3.4$  的二维空间分布。他们发现, 存在尺度  $10h^{-1}$  Mpc 的大尺度结构。Liske 等人 (2000)<sup>[99]</sup> 用不同的方法重新分析了 Williger 等人 (2000)<sup>[98]</sup> 的资料, 也发现了赖曼  $\alpha$  森林存在大尺度结构的证据。vanden Berk 等人 (1999)<sup>[100]</sup> 利用银极方向 1 平方度天区里的 13 个类星体的 HST 光谱, 研究了低红移 ( $z \approx 0.7$ ) 赖曼  $\alpha$  森林的三维成团。他们的研究表明, 低红移赖曼  $\alpha$  吸收体可能有尺度  $2.5 \sim 5h^{-1}$  Mpc 的结构, 且可能与亮星系有关。

还有一些其它方法, 探测到赖曼  $\alpha$  森林的各种尺度的成团。Fang (1991)<sup>[101]</sup> 利用最邻近间隔的 Kolmogorov-Smirnov 检验, 发现了尺度  $30 \sim 50h^{-1}$  Mpc 的结构; Mo 等人 (1992)<sup>[102]</sup> 从分析两点相关函数斜率的极值发现存在 60 和  $130h^{-1}$  Mpc 的结构; Pando 和 Fang (1996)<sup>[103]</sup> 则利用小波分析方法求得赖曼  $\alpha$  森林的成团尺度  $\approx 20h^{-1}$  Mpc。

赖曼  $\alpha$  森林空间分布研究中还有一个有趣问题, 即是否存在空洞 (Void)? 严格地定义空洞是很困难的。从观测上, 空洞实际上是指一个区域, 其中没有强度在探测阈以上的赖曼  $\alpha$  线。因此, 空洞并非空无一物。一般可以在光谱上直接搜寻缺少赖曼  $\alpha$  线的区域, 然后进行统计检验。最初, Crofts (1987)<sup>[104]</sup> 在 Q0420-388 方向发现一个  $43h^{-1}$  Mpc 的空洞。20 世纪 90 年代, 更多的空洞被发现。Dobrzycki 和 Bechtold (1991)<sup>[105]</sup> 在 Q0302-003 方向探测到一个  $32h^{-1}$  Mpc 的空洞; Cristiani 等人 (1995)<sup>[68]</sup> 在 Q0055-269 方向、Liske 和 Webb (1999)<sup>[106]</sup> 在 Q0041-027 方向、Kim 等人 (2001)<sup>[74]</sup> 在 Q0515-4414 方向等都探测到尺度几十 Mpc 的空洞。但这些都是高红移区域探测的结果, 在低红移区域却未探测到空洞。另外, 赖曼  $\alpha$  森林空洞并不等价于星系分布中的空洞。事实上, 在低红移星系空洞中已经探测到赖曼  $\alpha$  森林吸收体 (见 Morris 等人 (1993)<sup>[107]</sup>、Stocke 等人 (1995)<sup>[108]</sup> 等论文)。

赖曼  $\alpha$  森林空洞是怎样产生的? 一种可能是空洞确实反映了赖曼吸收体空间分布的非均匀性; 另一种可能则是 Proximity 效应。如果接近同一视线方向的两个类星体空间上很靠近, 其间的中性氢云将被类星体的强烈的紫外辐射电离, 因而只能观测到很少的赖曼  $\alpha$  森林线, 形成空洞。

## 2.8 与星系的关系

赖曼  $\alpha$  森林吸收线是否由星系产生? 这是长久未解决的问题。早在 20 世纪 80 年代就直接观测到产生金属吸收线系统的星系。但迄今未探测到任何星系直接产生了赖曼  $\alpha$  森林吸收线。近年来的一些观测进展 (如探测到赖曼  $\alpha$  森林的重元素丰度决非原始丰度、赖曼  $\alpha$  森林的大尺度结构在某种程度上类似于星系等) 更加促使人们去探索赖曼  $\alpha$  森林与星系的关系。

由于得到高红移星系样本非常困难, 近年来多利用低红移特别是 HST 星系资料来研究两者的关系。直接寻找产生某条赖曼  $\alpha$  吸收线的星系是困难的, 通常的方法是研究赖曼  $\alpha$  森林样本和星系样本的相关。研究的结果各种各样。大体上可分为两类。一部分研究结果认为, 赖曼  $\alpha$  森林线产生于星系的延展晕。Lanzetta 等人 (1995)<sup>[109]</sup> 利用 HST 进行了低红移微弱星系巡天, 发现赖曼  $\alpha$  吸收线等值宽度和星系碰撞参数间存在反相关, 当碰撞参数  $\leq 160h^{-1}$  kpc 时, 星系总与赖曼  $\alpha$  吸收线相关, 而当碰撞参数  $\geq 160h^{-1}$  kpc 时, 星系从不与赖曼  $\alpha$  吸收线成协。由此他们推断: 星系被半径  $\approx 160h^{-1}$  kpc 的气体包围, 柱密度大于  $10^{14}$  cm<sup>-2</sup> 的吸收系统就产生于这种星系晕。Chen 等人 (1998)<sup>[110]</sup> 详细分析了他们得到的 HST 类星体巡天中的

87 个低红移星系样本, 证实并改进了上述结果。Chen 等人 (2000)<sup>[111]</sup> 进一步研究了哈勃深场得到的  $z > 1$  的星系样本, 认为至少 50%, 甚至 100% 的  $W > 0.32\text{\AA}$  的赖曼  $\alpha$  吸收系统可以用星系延展晕的吸收来解释。此外, Lin 等人 (2000)<sup>[112]</sup>、Linder (2000)<sup>[113]</sup>、Ortiz-Gil 等人 (1999)<sup>[114]</sup>、Barcons 等人 (1998)<sup>[115]</sup> 的研究也支持上述结论。最近, Chen 等人 (2001)<sup>[116]</sup> 公布了对另一微弱星系巡天的研究结果, 认为所有的赖曼  $\alpha$  吸收都产生于星系的延展晕, 其半径大到  $200h^{-1}\text{kpc}$ 。

另一部分研究则认为赖曼  $\alpha$  森林产生于纤维状结构的星系际物质, 它们同星系相关仅仅是由于二者的分布反映了由暗物质分布决定的大尺度结构。最直接的证据莫过于用各种方法进行的深度巡天中未能找到与某条赖曼  $\alpha$  吸收线对应的星系。从星系 - 赖曼  $\alpha$  吸收体之间的相关分析也得不到强有力的支持。Morris 等人 (1993)<sup>[107]</sup> 研究了 3C 273 附近星场, 对其星系样本和 3C 273 方向的赖曼  $\alpha$  森林的分析表明, 星系和吸收体之间确有关系, 但星系 - 吸收体的交叉相关函数弱于星系 - 星系的相关。Impey 等人 (1999)<sup>[117]</sup> 得到 Virgo 团方向 10 个类星体的 HST/GHRS 光谱, 分析了赖曼  $\alpha$  吸收体和星系样本的关系, 未找到与吸收体对应的星系, 不支持赖曼  $\alpha$  吸收产生于星系晕的假说。类似的研究还很多, 如 Stocke 等人 (1995)<sup>[108]</sup>、Rauch 等人 (1996)<sup>[118]</sup>、Dinshaw 等人 (1997)<sup>[60]</sup>、Jannuzi 等人 (1998)<sup>[119]</sup>、Dave 等人 (1999)<sup>[120]</sup>、Penton 等人 (2000)<sup>[116]</sup> 等。最近, Morris 等人 (2001)<sup>[121]</sup> 对赖曼  $\alpha$  吸收体 - 星系关系的争论进行了评述并公布了对类星体对 Q0107-025A,B 的研究结果。他们发现, 某些强吸收体附近确有若干星系, 因此, 吸收体 - 星系肯定是相关的, 但是却找不到与该吸收线对应的星系; 许多强吸收体附近也看不到星系。Stocke 等人 (2001)<sup>[122]</sup>、Stocke (2001)<sup>[123]</sup>、Penton 等人 (2001)<sup>[124]</sup> 等在讨论吸收体 - 星系相关时还进一步研究了吸收体与空洞、超团的关系。前面已经提到, 在空洞里发现了赖曼  $\alpha$  吸收体 (Morris 等人 (1993)<sup>[107]</sup>、Stocke 等人 (1995)<sup>[108]</sup> 等)。上述研究也发现, 不少空洞里有赖曼  $\alpha$  吸收体。这表明, 至少一部分吸收体不是星系晕。上述研究还表明, 赖曼  $\alpha$  吸收体与大尺度结构如星系“巨壁”有明显的联系。

## 2.9 Gunn-Peterson 效应

所谓 Gunn-Peterson(GP) 效应是指连续分布的星系际介质 (中性氢) 的赖曼  $\alpha$  吸收由于宇宙膨胀而成为连续吸收, 使类星体赖曼  $\alpha$  发射线蓝端的连续辐射强度相对红端而言减弱了。如果 Gunn-Peterson 效应的确存在, 它就用来估计弥漫星系际中性氢的密度。

最初, Gunn 和 Peterson(1965)<sup>[125]</sup> 在分析了 3C9 的光谱后认为, 蓝端的连续辐射强度下降了 40%, 并推出在  $z = 2$  时星系际中性氢的数密度为  $6 \times 10^{-11}\text{cm}^{-3}$ 。随后, 许多人探测了 Gunn-Peterson 效应。表 2 列出了一些研究结果。

由表 2 可见, 在高红移区域大部分探测工作实际上并未得到 GP 效应存在的肯定证据。一个重要原因是, 在高红移区域, 赖曼  $\alpha$  森林线的云集压低了连续背景, 使确定类星体赖曼  $\alpha$  发射线短波端的真实的连续辐射背景变得十分困难。因此, 在探测 GP 效应时应尽可能利用高分辨率光谱, 并采用某种方法消除赖曼  $\alpha$  森林线的混合带来的影响。Fang 等人 (1998)<sup>[132]</sup> 利用 Keck 望远镜重新观测了高红移类星体 PKS 1937-011, 得到了它的高分辨率 (全半宽约  $15\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ )、高信噪比 (约 50) 光谱, 能有效地分离柱密度低到  $N_{\text{HI}} = 10^{12}\text{cm}^{-2}$  的弱线, 并采用所谓强度分布分析方法消除强线线翼的混合带来的影响, 求得  $\tau_{\text{GP}} = 0.113 \pm 0.020$ , 与以前的结果 (Fang 和 Crotts(1995)<sup>[130]</sup>) 类似。

表 2 Gunn-Peterson 效应的研究结果

| 作者  | 类星体                     | 吸收光深 $\tau_{\text{GP}}$ | 红移        |
|---|-------------------------|-------------------------|-----------|
| Jenkins 和 Ostriker(1991) <sup>[17]</sup>  | $z_{\text{em}} > 4$ 的样本 | 0.11 ~ 0.31             | 2.7 ~ 3.8 |
| Giallingo 等人 (1992) <sup>[127]</sup>      | Q2126-158               | 0.013±0.026             | ≈ 3       |
| Webb 等人 (1992) <sup>[128]</sup>           | Q0000-263               | 0.04±0.01               | ≈ 4       |
| Giallingo 等人 (1994) <sup>[129]</sup>      | BR1202-0725             | 0.02±0.03               | ≈ 4.3     |
| Fang 和 Crotts (1995) <sup>[130]</sup>     | PKS1937-011             | 0.115±0.025             | ≈ 3.4     |
| Williger 等人 (1994) <sup>[23]</sup>        | BR1033-0327             | ≈ 0.1                   | < 4       |
| Songaila 等人 (1999) <sup>[131]</sup>       | J033829+002156.3        | ≤ 0.1                   | < 5       |
| Steidel 和 Sargent (1987) <sup>[126]</sup> | 8 个类星体                  | ≤ 0.05                  | ≈ 2.5     |

探测 GP 效应的另一个困难是如何区分 GP 连续吸收和弱赖曼  $\alpha$  森林线。一方面, 弥漫星系际介质的分布不一定完全均匀; 另一方面, 在通常的 GP 效应的分析中完全忽略了星系际介质的流体运动速度, 而只考虑哈勃膨胀。Levshakov 和 Kegel (1998)<sup>[133]</sup> 指出, 弥漫星系际介质的大尺度速度场可造成一种类线结构, 类似于  $10^{11} \leq N_{\text{HI}} \leq 5 \times 10^{13}$  的弱赖曼  $\alpha$  森林线。因此, 他们认为, 通常的分析低估了 GP 吸收。他们求得, 在  $z \approx 3$ ,  $\tau_{\text{GP}} \approx 0.3$ , 比其它人的结果大得多。

但是, Becker 等人 (2001)<sup>[134]</sup> 最近分析了 Sloan 巡天发现的三个高红移类星体 ( $z = 5.82$ 、5.99、6.28) 的中分辨率 Keck 光谱, 求得  $\tau_{\text{GP}} > 20$ , 明显探测到了 GP 吸收。

在低红移区域, 赖曼  $\alpha$  森林线较少, 它们对连续光谱的影响很小, 因而能更有效地探测 GP 效应。Khersonsky 等人 (1997)<sup>[135]</sup> 利用 HST 资料, 分析了两个低红移类星体 PKS 1354+195 ( $z_{\text{em}} = 0.72$ ) 和 PKS 2415+067 ( $z_{\text{em}} = 0.99$ ) 的光谱, 探测 GP 吸收。结果表明, 对 PKS 1354+195,  $\tau_{\text{GP}}(z \approx 0.5) < 0.02$ , 没有显著的吸收; 但对 PKS 2415+067 却发现, 在  $z \approx 0.8$  时, 连续光谱下降了 12% ~ 14%, 对应的  $\tau_{\text{GP}} \approx 0.14$ 。这似乎表明, 在 PKS 2415+067 方向,  $z \approx 0.8$  附近, 存在过密的星系际中性氢区, 其数密度估计约为  $10^{-6} \text{cm}^{-3}$ 。当然, 这个结果尚须进一步验证。

综上所述, 大多数情况下, 并未探测到明显的 GP 效应。这表明星系际中性氢要么密度很低, 不然就是温度很高, 使其大部分电离了。某些情况下可能探测到了 GP 吸收, 似乎表明弥漫星系际介质的分布是非均匀的, 存在过密区。

## 参 考 文 献

- 1 Lynds C R. *Ap. J.*, 1971, 164: L73
- 2 Sargent W L W, Young P J, Boksenberg A et al. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1980, 42: 41
- 3 Weymann R J, Carswell R F, Smith M G. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1981, 19: 41
- 4 Sargent W L W., In: Blade J C et al eds. *QSO Absorption Lines*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1987: 1
- 5 Huang K. *Progress in Astronomy*, 1993, 11: 32
- 6 Rauch M. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1998, 36: 267
- 7 Bechtold J. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1994, 91: 1
- 8 Kulkarni V P, Huang K, Green R F et al. *M.N.R.A.S.*, 1996, 279: 197

- 9 Murdoch H S, Hunstead R W, Pettini M *et al.* *Ap. J.*, 1986, 309: 19
- 10 Khare P, Srianand R, York D G *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1997, 285: 167
- 11 Giallongo E, Cristiani S, Fontana A *et al.* *Ap. J.*, 1993, 416: 137
- 12 Kim T-S, Hu E M, Cowie L L *et al.* *A. J.*, 1997, 114: 1
- 13 Kirkman D, Tytler D. *Ap. J.*, 1997, 484: 672
- 14 Hu E M, Kim T-S, Cowie L L *et al.* *A. J.*, 1995, 110: 1526
- 15 Lu L, Sargent W L W, Womble D S *et al.* *Ap. J.*, 1996, 472: 509
- 16 Penton S V, Shull J M, Stocke J T. *Ap. J.*, 2000, 544: 150
- 17 Jenkins E B, Ostriker J P. *Ap. J.*, 1991, 376: 33
- 18 Press W H, Rybicki G B. *Ap. J.*, 1993, 418: 585
- 19 Rauch M, Carswell R F, Chaffee J K *et al.* *Ap. J.*, 1992, 390: 387
- 20 Rauch M, Carswell R F, Webb J K *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1993, 260: 589
- 21 Savaglio S, Ferguson H C, Brown T M *et al.* *Ap. J.*, 1999, 515: L5
- 22 Carswell R F, Lanzetta K M, Parnell H C *et al.* *Ap. J.*, 1991, 371: 36
- 23 Williger G M, Baldwin J A, Carswell R F *et al.* *Ap. J.*, 1994, 428: 574
- 24 Shull J M, Giroux M L, Penton S V *et al.* *Ap. J.*, 2000, 538: 13
- 25 Ricotti M, Gnedin N Y, Shull J M. *Ap. J.*, 2000, 534: 41
- 26 Bryan G L, Machacek M E. *Ap. J.*, 2000, 534: 57
- 27 Pettini M, Hunsdead R W, Smith L J *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1990, 246: 545
- 28 Hui L, Lutledge R E. *Ap. J.*, 1999, 517: 541
- 29 Prochaska J X, Wolfe A M. *Ap. J.*, 1997, 487: 73
- 30 Meiksin A. *Ap. J.*, 1994, 431: 109
- 31 Wang B. *Ap. J.*, 1995, 444: 17
- 32 Weinberg D H, Hernquist L, Katz N *et al.* In: Petijeans P, Charlot S eds. *Proceedings of the 13 IAP Colloquium: Structure and Evolution of the Intergalactic Medium from QSO Absorption Lines System*, Paris: Editions Frontieres, 1997: 45
- 33 Theuns T, Shaye J, Haehnelt M G. *M.N.R.A.S.*, 2000, 315: 600
- 34 Meyer D M, York D G. *Ap. J.*, 1987, 315: L5
- 35 Lu L. *Ap. J.*, 1991, 379: 99
- 36 Cowie L L, Songaila A, Kim T-S *et al.* *A. J.*, 1995, 109: 1522
- 37 Tytler D, Fan X-M, Burles S *et al.* In: Meylan G ed. *QSO Absorption Lines*, Berlin: Springer Verlag, 1995: 289
- 38 Womble D S, Sargent W L W, Lyons R S. In: Bremer M N *et al.* eds. *Cold Gas at High Redshift*. *Astrophys. Space Sci. Libro.*, 1996, 206(XII): 249
- 39 Songaila A, Cowie L L. *A. J.*, 1996, 111: 72
- 40 Dave R, Hellsten U, Hernquist L *et al.* *Ap. J.*, 1998, 509: 661
- 41 Ellison S L, Lewis G F, Pettini M *et al.* *Ap. J.*, 1999, 520: 456
- 42 Lu L, Sargent W L W, Barlow T A *et al.* 1998, *A. J.*, 1998, 115: 55
- 43 Cowie L L, Songaila A. *Nature*, 1998, 394: 44
- 44 Ellison S L, Songaila A, Schaye J *et al.* *A. J.*, 2000, 120: 1175
- 45 Penton S V, Stocke J T, Shull J M. *Ap. J.*, 2001, 544: 150
- 46 Barlow T A, Tytler D. *A. J.*, 1998, 115: 1725
- 47 Dave R, Heap S R, Williger G M *et al.* *Ap. J.*, 2002(astro.ph/0109242)
- 48 Gnedin N Y, Ostriker J P. *Ap. J.*, 1997, 486: 581
- 49 Gnedin N Y. *M.N.R.A.S.*, 1998, 294: 407
- 50 Hellsten U, Dave R, Hernquist L *et al.* *Ap. J.*, 1997, 487: 482
- 51 Young P J, Sargent WLW, Boksenberg A *et al.* *Ap. J.*, 1981, 249: 415
- 52 Foltz C B, Weymann R J, Roser H J *et al.* *Ap. J.*, 1984, 281: 1

- 53 McGill C. *M.N.R.A.S.*, 1990, 242: 544
- 54 Smette A, Surdej J, Shaver P A *et al.* *Ap. J.*, 1992, 389: 39
- 55 Smette A, Robertson J G, Shaver P A *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1995, 113: 199
- 56 Bechtold J, Crotts A P S, Dunkan R C *et al.* *Ap. J.*, 1994, 437: 83
- 57 Dinshaw N, Impey C D, Foltz C B *et al.* *Ap. J.*, 1994, 437: 87
- 58 Dinshaw N, Foltz C B, Impey C D *et al.* *Nature*, 1995, 373: 223
- 59 Fang Y, Duncan R C, Crotts A P S *et al.* *Ap. J.*, 1996, 462: 77
- 60 Dinshaw N, Weymann R J, Impey C D *et al.* *Ap. J.*, 1997, 491: 45
- 61 D'Odorico V, Cristiani S, D'Odorico S *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1998, 339: 678
- 62 Dinshaw A, Foltz C B, Impey C B *et al.* *Ap. J.*, 1998, 494: 567
- 63 Monier E M, Turnshek D A, Hazard C. *Ap. J.*, 1999, 522: 627
- 64 Young P A, Impey C D, Foltz C B. *Ap. J.*, 2001, 549: 76
- 65 Crotts A P S, Fang Y. *Ap. J.*, 1998, 502: 16
- 66 Rauch M, Haehnelt M G. *M.N.R.A.S.*, 1995, 275: 76
- 67 Lu L, Wolfe A M, Turnshek D A. *Ap. J.*, 1991, 367: 19
- 68 Cristiani S, D'Odorico S, Fontana A *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1995, 273: 1016
- 69 Giallongo E, Cristiani S, D'Odorico S *et al.* *Ap. J.*, 1996, 466: 46
- 70 Cooke A J, Espey B, Carswell R F. *M.N.R.A.S.*, 1997, 284: 552
- 71 Press W H, Rybicki G B, Schneider D P. *Ap. J.*, 1993, 414: 64
- 72 Zuo L, Lu L. *M.N.R.A.S.*, 1993, 418: 601
- 73 Scott J, Bechtold J, Dobrzycki A. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 2000, 130: 37
- 74 Kim T S, Cristiani S, D'Odorico S. *Astron. Astrophys.*, 2001, 373: 757
- 75 Morris S L, Weymann R J, Savage B D *et al.* *Ap. J.*, 1991, 377: L21
- 76 Bahcall J N, Jannuzi B T, Schneider D P *et al.* *Ap. J.*, 1991, 375: L5
- 77 Bahcall J N, Bergeron J, Boksenberg A *et al.* *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1993, 87: 1
- 78 Bahcall J N, Bergeron J, Boksenberg A *et al.* *Ap. J.*, 1996, 457: 19
- 79 Impey C D, Petry C E, Malkan M A *et al.* *Ap. J.*, 1996, 463: 473
- 80 Weymann R J, Jannuzi B T, Lu L *et al.* *Ap. J.*, 1998, 506: 1
- 81 Williger G M, Baldwin J A, Carswell R F *et al.* *Ap. J.*, 1994, 428: 574
- 82 Giallongo E. *M.N.R.A.S.*, 1991, 251: 541
- 83 Murdoch H S, Hustead R W, Pettini M *et al.* *Ap. J.*, 1986, 309: 19
- 84 Tytler D. *Ap. J.*, 1987, 321: 69
- 85 Bajtlik S, Duncan R C, Ostriker J P. *Ap. J.*, 1988, 327: 570
- 86 Srianand R, Khare P. *M.N.R.A.S.*, 1996, 280: 767
- 87 Scott J, Bechtold J, Dobrzycki A *et al.* *Ap. J. Suppl. Ser.*, 2000, 130: 67
- 88 Savaglio S, Cristiani S, D'Odorico S *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1997, 318: 347
- 89 Kulkarni V P, Fall S M. *Ap. J.*, 1993, 413: L63
- 90 Scott J, Bechtold J, Steinmetz M *et al.* *Ap. J.*, 2002, (astro-ph/0108097)
- 91 Zuo L. *M.N.R.A.S.*, 1992, 258: 45
- 92 Zuo L, Bond J R. *Ap. J.*, 1994, 423: 73
- 93 Webb J K. In: Hewitt A, Burbidge G, Fang L-Z eds. *Proceedings of IAU Symp. 124, Dordrecht: Reidel, 1986: 803*
- 94 Muecket J P, Mueller V. *Astrophys. Space. Sci.*, 1987, 139: 163
- 95 Ostriker J P, Bajtlik S, Duncan R C. *Ap. J.*, 1988, 327: 350
- 96 Fernandez-Soto A, Lanzetta K M, Barcons X *et al.* *Ap. J.*, 1996, 460: L85
- 97 Cristiani S, D'Odorico S, D'Odorico V *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1997, 285: 209
- 98 Williger G M, Smette A, Hazard C *et al.* *Ap. J.*, 2000, 532: 77
- 99 Liske J, Webb J K, Williger G M *et al.* *M.N.R.A.S.*, 2000, 311: 657

- 
- 100 vanden Berk D E, Lauroesch J T, Stoughton C *et al.* *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1999, 122: 355  
101 Fang L-Z. *Astron. Astrophys.*, 1991, 244: 1  
102 Mo H J, Xia X Y, Deng Z G *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1992, 256: L23  
103 Pando J, Fang L-Z. *Ap. J.*, 1996, 459: 1  
104 Crotts A P S. *M.N.R.A.S.*, 1987, 228: 41  
105 Dobrzycki A, Bechtold J. *Ap. J.*, 1991, 377: L69  
106 Liske J, Webb J K. In: Morganti F, Couch W J eds. *Proceedings of the ESO/Australia Workshop held at Sydney, Australia*, Berlin: Springer-Verlag, 1999: 234  
107 Morris S L, Weymann R J, Dresler A *et al.* *Ap. J.*, 1993, 419: 524  
108 Stocke J T, Shull J M, Penton S *et al.* *Ap. J.*, 1995, 451: 24  
109 Lanzetta K M, Bowen D B, Tytler D *et al.* *Ap. J.*, 1995, 442: 538  
110 Chen X-W, Lanzetta K M, Webb J K *et al.* *Ap. J.*, 1998, 498: 77  
111 Chen X-W, Lanzetta K M, Fernandez-Soto A. *Ap. J.*, 2000, 533: 120  
112 Lin W P, Borner G, Mo H J. *M.N.R.A.S.*, 2000, 319: 517  
113 Linder S M. *Ap. J.*, 2000, 529: 644  
114 Ortiz-Gil A, Lanzetta K M, Webb J K *et al.* *Ap. J.*, 1999, 523: 72  
115 Barcons X, Lanzetta K M, Chen H *et al.* *Astrophys. Space. Sci.*, 1998, 263: 75  
116 Chen X-W, Lanzetta K M, Webb J K *et al.* *Ap. J.*, 2001, 559: 654  
117 Impey C D, Petry C E, Flint K P. *Ap. J.*, 1999, 524: 536  
118 Rauch M, Weymann R J, Morris S L. *Ap. J.*, 1996, 458: 518  
119 Jannuzi B T, Bahcall J N, Bergeron J *et al.* *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1998, 118: 1  
120 Dave R, Hernquist L, Katz N *et al.* *Ap. J.*, 1999, 511: 521  
121 Morris S L, Jannuzi B, Weymann R. *ASP Conference Series*. 2001. (astro-ph/0108129)  
122 Stocke J T, Shull J M, Penton S V *et al.* In: Hibbard J E, Rupen M, Van Gorkom J H eds. *Gas and Galaxy Evolution*, San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2001: 21  
123 Stocke J T. *ASP Conference Series*, 2001.(astro-ph/0107481)  
124 Penton S V, Stocke J T, Shull J M. *Ap. J.*, 2002, 565: 720  
125 Gunn J E, Peterson B A. *Ap. J.*, 1965, 142: 1633  
126 Steidel C C, Sargent W L W. *Ap. J.*, 1987, 318: L11  
127 Giallongo E, Cristiani S, Treverse D. *Ap. J.*, 1992, 398: L9  
128 Webb J, Barcons X, Carswell R *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1992, 255: 319  
129 Giallongo E, D'Odorico S, Fontana A *et al.* *Ap. J.*, 1994, 425: L1  
130 Fang Y, Crotts A. *Ap. J.*, 1995, 440: 69  
131 Songaila A, Hu E M, Cowie L L. *Ap. J.*, 1999, 525: L5  
132 Fang Y, Fan X, Tytler D *et al.* *Ap. J.*, 1998, 497: 67  
133 Levshakov S A, Kegel W H. *M.N.R.A.S.*, 1998, 301: 323  
134 Becker R H, Fan X, White R L *et al.* *A. J.*, 2001, 122: 2850  
135 Khersonsky V K, Turnshek D A, Strub S M. *Ap. J.*, 1997, 491: 29

## Progress in Study on Lyman $\alpha$ Forest (I): Observations

Huang Keliang    Zhou Hongnan

(Department of Physics, Nanjing Normal University, Nanjing, 210097)

### Abstract

Since Hubble Space Telescope and Keck Telescope were operated, great progress in study on Lyman  $\alpha$  forests has been made in the past 10 years. The properties and origin of Lyman  $\alpha$  forest have been better and better understood. In this paper, the observations on Lyman  $\alpha$  forest, including column density, Doppler parameter, abundance, size and shape of absorbers, space distribution, evolution and relationship between Lyman  $\alpha$  forest and galaxies, are reviewed.

**Key words** quasar—Lyman  $\alpha$  forest—intergalactic medium

\* \* \* \* \*

### 重要更正

由于工作中的疏忽, 本刊今年第 1 期发表的王伟、赵永恒的文章《黑洞证认的新进展》中出现了概念性错误。在 16 页表 3 下的第 1 行: “这是因为施瓦西黑洞吸积盘的内半径(即最小稳定圆轨道)只能是  $3r_g$  ( $r_g = GM/c^2$ , 即施瓦西半径), 而克尔黑洞吸积盘在赤道面的最小稳定轨道半径甚至可以小于  $r_g$ 。”应为“这是因为施瓦西黑洞吸积盘的内半径(即最小稳定圆轨道)只能是  $6r_g$  ( $r_g = GM/c^2$ ), 而克尔黑洞吸积盘在赤道面的最小稳定轨道半径甚至可以小于  $2r_g$ 。”另外, 该稿的收到日期应为“2001-06-12”, 特此更正, 并对由于以上差错给作者和读者造成的不良影响及不便深表歉意。

天文学进展编辑部

2002. 4. 11.