

类星体的高分辨率光谱: Ly α 线丛研究

黄克谅

(南京师范大学物理系, 南京 210024)

提 要

近年来对几个高红移类星体的 Ly α 线丛区进行了高分辨率光谱研究, 得到了一些有趣的结果。本文简要地评述这些最新的研究进展。

自从 Lynds^[1]建议, 类星体光谱中波长短于 Ly α 发射线的大量吸收线是居间天体产生的 Ly α 吸收线以后, 对所谓“Ly α 线丛”进行了广泛的研究。已有的研究表明, 产生 Ly α 线丛吸收线的云(以下简称 Ly α 云)同产生重元素吸收线的天体截然不同。Ly α 云是星系际吸收云, 可能是原始星系, 而重元素吸收线则产生于通常的星系的晕或盘。两者的不同反映在许多方面。例如, Ly α 云有着强烈的宇宙演化, 而重元素吸收线天体则没有; 重元素吸收线天体显示出明显的成团性, 但 Ly α 云在任何尺度上都没有明显成团。在物理性质方面, 两者的不同也是显著的。许多作者对类星体吸收线, 包括 Ly α 线丛, 做了评述, 如[2-4]。然而, 迄今为止, 对 Ly α 线丛的研究绝大部分是利用低、中分辨率($\sim 1\text{\AA}$)的光谱。由于大量的谱线聚集在 Ly α 线丛区, 谱线的混合非常严重。通常的中、低分辨率光谱不可能把谱线完全分解开。这对研究 Ly α 线丛的性质自然会带来很大的影响。为了深入地了解 Ly α 线丛的性质, 需要得到高分辨率($\lesssim 30\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)的光谱资料。近年来, 已获得了几个高红移类星体的高分辨率高信噪比和大的波长覆盖范围的光谱资料, 对他们的 Ly α 线丛的研究得到了一些有趣的结果。本文简要地介绍并讨论这些研究结果。

一、柱密度和多普勒宽度

对于一个吸收云来说, 最重要的物理参数不外乎大小、温度、密度等。可是, 从观测上来说, 谱线的等值宽度是一个直接的观测量。在高分辨率光谱中, 几乎所有的 Ly α 线丛都被分解开了。因此, 可以用 Voigt 轮廓去拟合每一条线, 从而求出每个 Ly α 云的柱密度 $N(\text{HI})$ 和多普勒宽度 b 。如果谱线未能分解开, 自然需要做某种假设才能应用谱线拟合技术求出每条子线(如果谱线由多条子线组成)对应的柱密度和多普勒宽度。

一般来说, 大多数 Ly α 吸收云柱密度的范围在 10^{13} — 10^{16}cm^{-2} 。Pettini 等(文献[5], 以后记为 PHSM)求出类星体 2206-199($Z_e = 2.559$)的 Ly α 云的平均柱密度 $\log N(\text{HI}) \approx 13.3$ 。可是, Carswell 等(文献[6], 以后记为 CWBA)对 QSO 2000-330($Z_e = 3.777$),

Carswell 等(文献[7], 以后记为 CLPW)对 QSO 1100-264($Z_0=2.148$), Rauch 等(文献[8], 以后记为 RCCFWWBG)对 QSO 0014+813($Z_0=3.384$)和 Atwood 等(文献[9], 以后记为 ABC)对 QSO 0420-388($Z_0=3.123$)的 Ly α 云的研究, 却得到了较高的平均柱密度: $\log N(\text{HI}) \approx 14$ 。当然, 柱密度的测量具有相当的不确定性。我们并不清楚, 上述柱密度的差别是否是真实的。另一方面, 我们也不清楚, 这种差别是不是由于分辨率的不同而引起。Q 1100-264 的光谱分辨率是 $9\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ (CLPW), 很接近 Q 2206-199N 的 $6\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 分辨率(PHSM)。但是, 它们的 Ly α 云的平均柱密度却不甚相同。

通常, $N(\text{HI})$ 的分布可以用一个幂谱来表示: $dn \propto N^{-\beta} dN$ 。几个类星体的高分辨率光谱资料的分析表明, $\beta \approx 1.7-2.0$ 。这个结果明显地小于由中等色散光谱得到的值^[4]。可是, 更加有趣的是, CWBA 发现, Q 2000-330 的 Ly α 云的柱密度分布函数有朝着低密度端变平的趋势。因此, 单一的幂谱可能不能很好地拟合全部观测资料。他们指出, 可能需要用两个幂谱:

$$dn \propto d \log N, \text{ 如果 } \log N < 14.35;$$

$$dn \propto N^{-1} d \log N, \text{ 如果 } \log N > 14.35.$$

这个结果显然是很重要的。不过, 证据并不充分。而且, 以后的几个观测并没有证实它。我们需要更多的高分辨率光谱资料。

谱线拟合求出的另一个量是多普勒宽度 b 。Q 2000-330(CWBA)、Q 1100-264(CLPW)和 Q 0420-388(ABC)的资料表明, b 一般分布在 $15-55\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 其平均值 $\langle b \rangle \approx 30-35\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。CWBA 将 Q 2000-330 和 Q 0420-388 的 b 的分布做了比较, 发现这两个分布没有很显著的差别, 它们有 41% 的概率起源于同一个母分布。上述几个类星体的 Ly α 云中, $b < 18\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的不多。如果谱线的加宽主要是由于热运动, $\langle b \rangle = 30-35\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 意味着 Ly α 吸收云的温度 $T \approx 5 \cdot 10^4\text{K}$ 。

可是, PHSM 分析了 Q 2206-199N 的分辨率 $6\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光谱资料, 发现大多数 Ly α 云的 $b < 22\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 而 $\langle b \rangle \approx 17\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 同上面的结果形成鲜明的对照。如果仍是热运动加宽为主, 则吸收云的温度小于 $2 \cdot 10^4\text{K}$ 。考虑到可能还有宏观湍流的加宽, 云的温度还要低。单由 b 值当然无法推断哪种加宽因素是主要的, 但 b 值却给出了温度的上限。大量的低 b 值吸收云的存在无疑地会对理论模型施加限制。

很难直接对上述结果进行比较。可能有好几个原因造成了上述差别。第一, Q 2206-199N 的方向可能比较特殊, 在那个方向聚积了大量的低 b 值吸收云。第二, 可能有一些低 b 值谱线是重元素吸收线, 而不是 Ly α 线。这种可能性是存在的, 需要认真考查。可是, PHSM 仔细分析了 Q 2206-199N 的光谱, 并未找到新的重元素吸收系统, 看起来不存在谱线的误认。第三, 谱线拟合技术和选取谱线的判据可能是最重要的原因。Carswell 和他的合作者利用最小 χ^2 方法来拟合谱线, 从而求出 b 值。可是, PHSM 却只选取轮廓非常确定的未饱和线进行拟合。显然, 一些轮廓很复杂的线和等值宽度很大的线被排除在他们的样本之外。不过, 即便如此, 很难令人相信这会影响到小 b 值线的存在。Webb 和 Carswell(文献[10], 以后记为 WC)详细讨论了上述选择效应, 他们的数值模拟结果表明, Q 1100-264 的 Ly α 云的最佳 b 值仍接近 $30\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 与 CLPW 的估计一致。RCCFWWBG 最近得到的 Q 0014+

813 高分辨率光谱给出 $\langle b \rangle \approx 33 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。看来, 谱线拟合和选线判据的确是一个不可忽视的因素。

二、多普勒宽度—柱密度关系

PHSM 分析了 Q 2206-199N 的光谱后发现, b 和 $N(\text{HI})$ 之间存在着明显的相关。 b 和 $\log N(\text{HI})$ 的未加权的线性回归的相关系数为 0.77; 而 $\log b$ 和 $\log N(\text{HI})$ 的相关系数为 0.73。后者给出 b 和 $N(\text{HI})$ 的关系为 $N(\text{HI}) = A \cdot b^{2.1 \pm 0.3}$, A 为常数。图 1 是 $b - \log N(\text{HI})$ 图, 引自文献[5]的图 4。PHSM 进一步指出, 云的温度随柱密度 $N(\text{HI})$ 而单调增加是缺乏物理基础的。而宏观湍流随柱密度单调增加则可以理解。由于 $b^2 = 2kT/m + b_t^2$, b_t 代表湍流的贡献, 因此, b 同 $N(\text{HI})$ 相关意味着宏观运动, 而不是热运动, 是谱线加宽的主要机制。在这种情况下, 云的温度可能低到 5 000—10 000K, 相应于观测到的最窄谱线的 b 值求出的温度上限。PHSM 得到的观测资料似乎是支持了早先由较低分辨率光谱推出的 Ly α 云温度较低的结论^[11-13]。

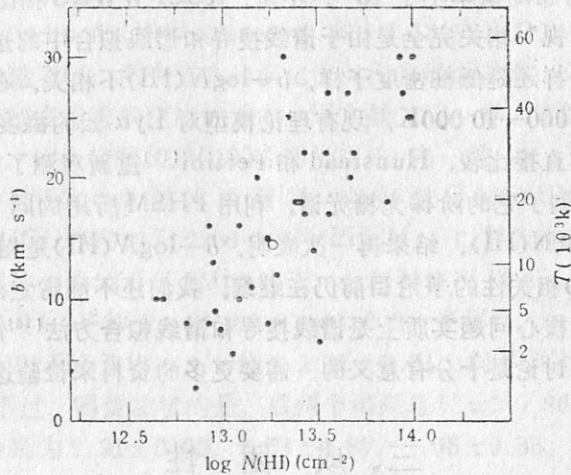


图 1

上述结果非常重要。目前, 关于 Ly α 云的理论模型(例如[14])都持这样的观点: Ly α 云是星系大小的稀薄气体云, $T \approx 3 \cdot 10^4 \text{ K}$, 气体高度电离。如果吸收云的温度只有 5 000—10 000K, 大部分气体将为中性, 云将由很冷很密的纤维状物组成。关于 Ly α 云的整个理论图像都将改变。如果 Ly α 云的确是原始星系, 这也自然会影响到星系形成理论。

可是, RCCFWWBG 和 CLPW 分别分析了 Q 0014+813 和 Q 1100-264 的 Ly α 样本, 他们没有发现 b 和 $N(\text{HI})$ 相关。图 2 是 Q 1100-264 的 $b - \log N(\text{HI})$ 图, 引自文献[7]。简单的线性回归指出, $b - \log N(\text{HI})$ 的相关系数只有 0.11, 相关的概率甚小。RCCFWWBG 不仅分析了 Q 0014+813 的 Ly α 线完备样本, 还分析了子样本。对于具有较大柱密度的子

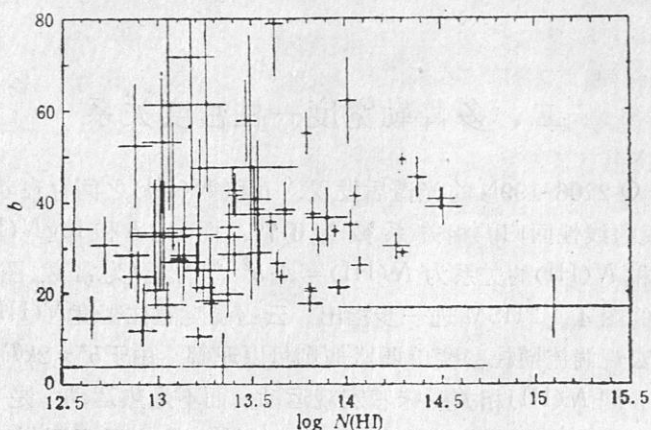


图 2

样, $b-\log N(\text{HI})$ 的相关系数仅为 0.014, 而随机分布的概率则达 89%。因此, 高柱密度子样的 $b-\log N(\text{HI})$ 不相关。可是, 较低柱密度子样的 $b-\log N(\text{HI})$ 却呈现出线性相关。相关系数为 0.35, 随机分布的概率小于 10^{-6} 。不过, RCCFWBG 指出, 这实际上并不是一种真实的相关, 这种“视”相关完全是由于谱线搜寻和谱线拟合中的选择效应造成的。因此, 无论是高柱密度子样还是低柱密度子样, $b-\log N(\text{HI})$ 不相关。在这种情形下, 没有理由证明云的温度低到 5 000—10 000K, 现有理论模型对 Ly α 云的温度的估计仍是合理的。值得注意的是, 为了作直接比较, Hunstead 和 Pettini^[15]重新观测了 CLPW 曾经进行过分析的 Q 1100—264, 得到了它的阶梯光栅光谱。利用 PHSM 所用的同样方法, 他们求出了未混合的 Ly α 线的 b 和 $N(\text{HI})$ 。结果再一次表明, $b-\log N(\text{HI})$ 是相关的。

关于 $b-\log N(\text{HI})$ 相关性的争论目前仍在继续。我们还不能肯定, 这种争论的结局如何。看来, 这种争论的核心问题实质上是谱线搜寻和谱线拟合方法^[16]的争论。无论如何, $b-\log N(\text{HI})$ 相关性的讨论是十分有意义的, 需要更多的资料来检验这种相关性。

三、成团性

对于 Ly α 吸收云的研究的主要结论之一是, 在任何尺度上, Ly α 云未显示成团性(例如, 文献[17]、[18])。高分辨率的 Ly α 线丛光谱自然可以用来研究 Ly α 云的成团性。特别是, 中等分辨率的光谱不适用于研究 Ly α 云的小尺度($<300\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)的成团。而高分辨率光谱可以把成团性分析推广到非常小的尺度($20-30\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)。

PHSM 分析了 Q 2206—199N 的光谱。两点相关函数的分析表明, 在平均红移 $\langle Z \rangle = 2.35$, 该类星体方向的 Ly α 云在任何尺度($\Delta v < 20\,000\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)上都不成团。Webb^[17]曾报导过可能有弱成团。PHSM 进一步指出, 他们的分析同 Webb 的分析并不矛盾。RCCFWBG 检验了 Q 0014+813 的 Ly α 云的成团性。他们发现, 在红移范围 $2.7 < Z < 3.4$, Ly α 云作为一个整体在任何尺度上都不成团。不过, 如果只考虑 $b < 20\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的窄吸收线样本, 他

们发现, 在 $\langle Z \rangle = 2.8$, 两点相关函数在约 $250 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的尺度上有 2.6σ 的超出。而且, 这种效应一直延伸到约 $1000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。没有任何证据证明这些窄吸收线是未证认的重元素谱线。因此, 成团性似乎是真实的。不过, 这种成团性的意义需要进一步研究。

四、Ly α 云的演化

关于 Ly α 云性质的另一个主要结论是: Ly α 云随红移快速地演化(例如, 文献[19], [20])。通常用一个幂谱形式来研究演化效应: $\frac{dN}{dZ} \propto (1+Z)^\gamma$, N 是红移 Z 处 Ly α 云的数密度。对于 $q_0 = 0$ 的宇宙, $\gamma = 1$ 意味着没有演化。以前的研究大多以等值宽度作为选取样本的标准。对于高分辨率光谱, 轮廓拟合技术可用来求出柱密度和多普勒宽度。因此, 柱密度也可用来作为选取样本的标准, 从而推断出演化参数。

RCCFWWBG 利用四个类星体(即 Q 0014+813, Q0420-388(ABC), Q2000-330(CWBA), Q1100-264(CLPW))的高分辨率光谱考查了 Ly α 云的演化。为了避免逆效应的影响, 只选取那些到类星体的距离超过 8Mpc 的云^[20]。他们首先分析了两个以柱密度为选线标准的样本: 样本 A, 要求谱线的 $\log N(\text{HI}) > 13.75$; 样本 B, 要求谱线的 $\log N(\text{HI}) > 14.25$ 。结果为: $\gamma = 2.08 \pm 0.53$ (样本 A); $\gamma = 1.59 \pm 0.82$ (样本 B)。我们看到, Ly α 云的演化是明显的。统计检验表明, 两个样本的演化情况没有显著差别。为了同文献[18]的结果比较, 还分析了以等值宽度为选线标准的样本。同文献[18]一样, 选线标准为 $w > 0.36 \text{ \AA}$ 。结果为 $\gamma = 1.68 \pm 0.80$ 。这个值同文献[18]的结果在 1σ 内一致。

Giallongo^[21]也分析了四个类星体的资料。它们是 Q 0420-388(ABC), Q 2000-330(CWBA), Q1101-264(CLPW)和 Q 2206-199N(PHSM)。以等值宽度作为选取样本的标准。同时, 去掉到类星体的距离不足 8Mpc 的云。分四种情况进行讨论: 子样 A, 谱线等值宽度满足 $0.2 > w > 0.14$; 子样 B, 要求 $0.3 > w > 0.2$; 子样 C, $0.5 > w > 0.3$; 以及全部样本, $0.5 > w > 0.14$; 对于全部样本, γ 值为 2.15 ± 0.51 , 同 RCCFWWBG 的结果及 Lu 等人的结果^[20]一致。不过, 需要注意的是, 后两个结果是对 $w > 0.36$ 的样本而言的。对于子样 A, B, C, γ 值分别为 2.91 ± 0.99 , 2.53 ± 0.87 , 1.05 ± 0.85 。我们看到, 随着样本的平均等值宽度的增加, 演化变得更平缓了。如果只考虑 $0.5 > w > 0.3$ 的子样, $\gamma = 1.05 \pm 0.85$ 意味着这些 Ly α 云没有宇宙演化。我们知道, 重元素吸收系统是同星系的晕或盘联系在一起。它们没有明显的宇宙演化。Giallongo 关于大等值宽度样本的结果表明, 这些 Ly α 云在演化特征上同重元素吸收云似乎没有差别, 它们可能起源于同一个母本。Liu 和 Jones^[22], Parnell 和 Carswell^[23]利用模拟光谱讨论了在中等分辨率光谱中常出现的谱线混合现象对演化规律的影响。结论是, 影响不大。Giallongo^[21]指出, 如果考虑到上述较差演化现象, 即演化规律同样本的平均等值宽度有关, 谱线混合对演化规律的影响就会很明显。高分辨率光谱大大地减轻了谱线混合的影响, 求出的演化规律比较可靠。

Giallongo 的结果改变了传统的观点, 无疑是非常重要的。但 Giallongo 的结果同 RCCFWWBG 的结果明显不同。他们都用了四个类星体的资料。不同的是, 前者用了

Q 2206-199N(PHSM), 而后者用了 Q 0014 + 813。是不是由于 Q 2206-199N 比较特殊, 造成了结果的明显差异? 没有什么理由证明 Q 2206-199N 的特殊性。Giallongo 的结果需要更多的资料加以验证, 特别是需要 $Z > 3$ 的高红移类星体资料和 $Z \lesssim 2$ 的类星体资料, 以扩大红移区间, 对演化规律进行更深入的研究。

参 考 文 献

- [1] Lynds, C. R., *Ap. J. Lett.*, 164 (1971), L73.
 [2] Chen Jiansheng, *Progress in Astronomy*, 3 (1985), 121.
 [3] Bian Yulin, *Progress in Astronomy*, 3 (1985), 129.
 [4] Sargent, W. L. W., in QSO Absorption Lines p. 1., ed. by J. C. Blades, D. Turnshek and C. A. Norman, (1987).
 [5] Pettini, M., Hunstead, R. W., Smith, L. J. and Mar, D. P., *M. N. R. A. S.*, 246 (1990), 545.
 [6] Carswell, R. F., Webb, J. K., Baldwin, J. A. and Atwood, B., *Ap. J.*, 319 (1987), 709.
 [7] Carswell, R. F., Lanzetta, K. M., Parnell, H. C. and Webb, J. K., *Ap. J.*, 371 (1991), 36.
 [8] Rauch, M., Carswell, R. F., Chaffee, F. H., Foltz, C. B., Webb, J. K., Weymann, R. J., Bechtold, J. and Green, R. F. *Ap. J.* (1992) preprint.
 [9] Atwood, B., Baldwin, J. A. and Carswell, R. F., *Ap. J.*, 292 (1985), 58.
 [10] Webb, J. K. and Carswell, R. F., in ESO Scientific Report No. 9., p. 3., (1991).
 [11] Hunstead, R. W., Pettini, M., Blades, J. C. and Murdoch, H. S., in IAU Symp. No. 124, p. 777., (1986).
 [12] Carswell, R. F., Morton, D. C., Smith, M. G., Stockton, A. N., Turnshek, D. A. and Weymann, R. J., *Ap. J.* 278 (1984), 486.
 [13] Chaffee, F. H., Weymann, R. J., Latham, D. W. and Strittmatter, P. A., *Ap. J.*, 267 (1983), 12.
 [14] Ostriker, J. P. and Ikeuchi, S. *Ap. J. Lett.*, 268 (1983), L63.
 [15] Hunstead, R. W. and Pettini, M., in ESO Scientific Report, No. 9, p. 11, (1991).
 [16] Wolfe, A. M., in ESO Scientific Report, No. 9, p. 97, (1991).
 [17] Webb, J. K., in IAU Symp. No. 124, p. 803, (1986).
 [18] Bechtold, J. and Shtetman, S. A., in IAU Symp. No. 134, p. 549, (1989).
 [19] Murdoch, H. S., Hunstead, R. W., Pettini, M. and Blades, J. C., *Ap. J.*, 309 (1986), 19.
 [20] Lu, L., Wolfe, A. M. and Turnshek, D. A., *Ap. J.*, 367 (1991), 19.
 [21] Giallongo, E., *M. N. R. A. S.* 251 (1991), 541.
 [22] Liu, X. D. and Jones, B. J. T., *M. N. R. A. S.*, 230 (1988), 481.
 [23] Parnell, H. C. and Carswell, R. F., *M. N. R. A. S.*, 230 (1988), 491.

(责任编辑 刘金铭)

High Resolution Spectra of QSOs: Ly α Forest

Huang Keliang

(Department of Physics, Nanjing Normal University, Nanjing 210024)

Abstract

In recent years, there appear a few high resolution spectra of QSOs, which are used to study the properties of Ly α forest lines. Many interesting results are obtained. In this paper, the new progress on studies of Ly α forest is shortly reviewed.