

高红移类星体光谱中的 L_{α} 森林

卞毓麟

(中国科学院北京天文台)

提 要

在类星体光谱证认史上,“ L_{α} 森林”假说的提出与证实是继“发射红移”、“吸收红移”、“多重红移”之后的又一座里程碑。 L_{α} 森林的概念形成于六、七十年代之交,八十年代初对它的研究逐渐进入高潮。研究 L_{α} 森林是了解星系际物质分布及其演化的重要途径,其潜在的宇宙学意义将是很深刻的。本文是继 Sargent 和 Boksenberg^[5]之后有关 L_{α} 森林的第二篇专题评述,全文的要点是: L_{α} 森林概念的形成和证实(第二、三节),吸收线密度的统计研究(第五节)、静止等值宽度(第六节)、吸收云的成团性(第七节)、吸收云的尺度(第八节)和其他物理参数(第九节)。其他有关论题可参阅文献[5]和另外几篇综述类星体吸收线的文章(参考文献[6,7,8]),以及为它们所引用的文献。

一、引 言

在高红移类星体光谱中 L_{α} 发射线的短波侧,存在着相当密集的吸收线。现已确认,它们之中的大部分乃是位于类星体与观测者之间不同宇宙学距离上的吸收体造成的 L_{α} 吸收线,每一条成员线各有不同的红移值。由于这类吸收线为数众多,故被形象化地称呼为“ L_{α} 森林”。典型的 L_{α} 森林光谱图,例如可参见 Sargent 等人^[1], Chen 等人^{[2], [3]}, Peterson 等人^[4]的文章。

L_{α} 森林的专题评述,迄今仅有 Sargent 和 Boksenberg^[5]一篇。Chen^{[6], [7]}综论类星体吸收线的两篇评述,对 L_{α} 森林以及与之相关的宇宙学问题作了言简意赅的分析。此前 Weymann 等人^[8]对类星体吸收线的长篇评论也论及了 L_{α} 森林。

本文比较完整地归纳了迄今有关 L_{α} 森林的各项研究结果。为便于比较,本文的体例与 Sargent 和 Boksenberg^[5]相似;为避免重复,凡 Chen^{[6], [7]}详述的内容,本文从简。

二、“ L_{α} 森林”概念的形成

1. 形成这一概念的历史背景 可分三个阶段,

(1) “吸收红移系统”的确立 六十年代中期,继发射线之后又发现了类星体光谱中的吸收线。Burbidge 等人^[9], Stockton 和 Lynds^[10]于 1966 年率先在类星体 3C 191 的光谱中证实了第一个吸收红移系统。

(2) “多重红移”概念的提出 自1966年后的关键一步是1967年对类星体 PKS0237-23 吸收线光谱的证认。先是 Arp 等人^[11]和 Burbidge^[12]各证认出一个吸收红移系统；随后，Greenstein 和 Schmidt^[13] 确认：在该类星体的光谱中同时存在着两个吸收红移系统 $Z_{obs,1,2} = 2.2020, 1.9555$ ，而且还有一些吸收线无法证认。Burbidge 和 Burbidge^[14]指出：“如果对这个最感人的天体最后又发现了更多的红移(系统)，我们将不会因此而震惊。”多重红移的概念即发轫于此。

(3) 两个重要事实之成定论 六十年代后期，下述事实渐成定论：i) 高红移类星体光谱中吸收红移系统的数目可以相当多，ii) 在所有允许出现的吸收线中以 L_{α} 最为“拗执”(persistent)，也就是即使其他谱线因吸收物质不足而不出现在观测光谱中， L_{α} 依然有可能单独出现。对此作出主要贡献的是 Lynds 和 Burbidge 夫妇。

再进一步，便可以很自然地推论：某些高红移类星体可以拥有非常多的吸收红移系统，而每个系统实际出现的谱线却只有一条 L_{α} 。Lynds 首先明确地跨出了这一步。

2. “ L_{α} 森林”概念的提出 在1970年8月于 Uppsala 举行的“河外星系与类星体”讨论会上，Lynds 再次论证了前述各点，并强调指出：当发射红移 z_{em} 变大时，类星体光谱越来越以吸收线为主要特征，且 $z_{obs} > z_{em}$ 的事例极少；在三个研究得最好的高红移类星体光谱中，几乎全部未能证认的谱线均在 L_{α} 发射线短波侧，应该认为这是一种规律性的表现。据此他得出结论^[15]：

“这些未能证认的吸收线相对于 L_{α} ——天体物理学中非常重要的一种跃迁——发射线的非常特殊的布排方式，使我几乎毋庸置疑，对这些谱线的正确解释乃是它们同样起源于 L_{α} ”。

1971年，Lynds^[16]重申了上述这一切，并明确预言：“红移大于2.3的类星体——即使不是全部也该是大多数——看来很可能都有多重吸收红移系统，而且会有大量系统主要只出现 L_{α} 线。”

至此， L_{α} 森林的观念业已实际形成，但何人首先使用“ L_{α} forest”这一名称则不详。不过，在 Weymann 等人^[8]的长篇评论中它已成了一个定型的名词。

三、 L_{α} 森林的证实

证实 L_{α} 森林假说的最好方法，是证明在同样的红移下常同时存在着 L_{β} 线。这可以利用交叉相关函数作统计研究：

若光谱中确实存在着许多 L_{α}/L_{β} 对，则 L_{α} 区和 L_{β} 区吸收线的 $\ln\lambda$ 交叉相关函数会在

$$\Delta \ln\lambda = \ln \frac{\lambda_{L_{\alpha}}}{\lambda_{L_{\beta}}} = 0.1699 \approx 0.17 \quad (1)$$

处出现甚强的峰值。

Young 等人^[17] 首先对 PKS 2126-158 的光谱施以此种技巧，结果证实 L_{α} 和 L_{β} 确实同时存在。

嗣后，Chen 等人^[2]对 PKS 0805+046(4C 05.34) 得到非常好的 L_{α}/L_{β} 相关；Peterson 等人^[4]对 PKS 1442+101(OQ 172) 不仅得到 L_{α}/L_{β} 的强相关，而且首次得到甚强的 L_{α}/L_{γ} 相

关。

这些工作表明, 把 L_a 发射线短波侧未能证认的许多吸收线归因于氢的 Lyman 吸收是令人信服的。此外, 例如 Bian 等人^[18] 在 PKS 1442 + 101 的光谱中确实证认出一个由 L_a , L_b , L_γ , L_δ , L_e 支持的吸收红移系统, 也可以作为这一结论的一种佐证。

四、 L_a 森林的起源

Sargent 和 Boksenberg^[5] 归纳了前人提出的 L_a 森林起源的五种假说。它们都承认所有的吸收线皆由分布在宇宙学距离上的插入吸收体所致, 其差异则在于对吸收物质的看法不同。五种假说的吸收分别源自:

(1) 星系际云; (2) 星系晕; (3) 矮星系风; (4) 超团中普遍分布的气体; (5) 星系际激波。

对这些假说的分析可参阅文献[5]及其引用的原始文献。总的结论是: 已有的观测和研究结果对第(1)种可能性最有利。事实上, 持此种观点的天文学家为数也最多。

五、 $n(z)$ 的统计研究

记 $n(z)$ 为红移 z 处的单位红移间隔内 L_a 森林的吸收线数, 即 L_a 森林在红移 z 处的吸收线密度; $dN(z)$ 为红移间隔 $(z, z + dz)$ 内的吸收线数, 则

$$dN(z) = n(z) dz \quad (2)$$

假定位于宇宙学距离上的 L_a 云的特征尺度和云内密度不随宇宙时而变化, 吸收云的共动体密度 ρ 也不随宇宙时变化, 则由 Friedmann 模型易得(取宇宙常数 $\Lambda = 0$),

$$n(z) = \frac{dN}{dz} = \frac{c}{H_0} \sigma \rho_0 \frac{(1+z)}{(1+2q_0z)^{1/2}} \quad (3)$$

其中 c, H_0, q_0, σ 分别为光速, 哈勃常数, 减速参数, 云的共动截面积, ρ_0 是 $z=0$ 处的 ρ 值。若将(3)式写成

$$n(z) = \frac{dN}{dz} = n_0(1+z)^\gamma \quad (4)$$

则对 Friedmann 模型下的无演化云有: $q_0=0$ 时, $\gamma=1$; $q_0=0.5$ 时, $\gamma=0.5$; $q_0=1$ 时, 对 $z=2$ 和 3 分别有 $\gamma=0.268$ 和 0.298 。显然, $n(z)$ 是 z 的缓变函数。

1. 截至 1983 年止 $n(z)$ 的统计研究 1978 年, Peterson^[20] 率先研究了 4 个高红移类星体 L_a 森林的 $n(z)$ 随 z 变化的行为。结果发现 $n(z)$ 随 z 陡增, 这与上述均匀分布、无演化的云模型不相容。但在此之后, Sargent 等人^[21] 对 5 个类星体的统计分析求得 $\gamma = 0.48 \pm 0.54$, 与无演化云模型相容; Zou 等人^[22] 将样本扩大到 9 个类星体, 红移又向高端延伸, 结果得到与 [21] 相同的结论。

接着 Young 等人^[23] 由 9 个类星体求得 $\gamma = 1.81 \pm 0.48$; Chen 等人^[24] 由 13 个类星体求得 $\gamma = 1.9$; Peterson^[25] 由 16 个类星体求得 $\gamma = 2.2 \pm 0.4$; 这些工作再度支持了文献 [20] 的结

论。

最后, Sargent 和 Bokseberg^[5]由当时他们所知的所有(20个)高红移类星体的 L_{α} 森林资料求得 $\gamma=2.1$ 。至此, 各家的结论已趋一致。 $n(z)$ 随 z 的变化要比吸收云无演化时快得多, 云随宇宙时而演化似已无大争论。

2. 1984年的几项新结果 1984年, 对于 $n(z)$ 再次得出了几种互不相同的结果。

Hunstead 等人^[26]将最大发射红移类星体 PKS 2000-330($z_{em}=3.78$)的 L_{α} 森林与先前其他类星体的资料一并研究, 结果表明这“族”云在较早的宇宙时刻为数显然较多, 这与早先的结果相吻合。

Bechtold 等人^[27]获得了9个类星体($1.0 \leq z_{em} \leq 2.2$)的 IUE 光谱。虽然受分辨率和信噪比的限制, 这些资料尚不足以显示出紫外区的 L_{α} 森林, 但该文作者在“如果可将 L_{α} 与 L_{β} 之间的连续谱下降归因于窄线 L_{α} 吸收”的假定下, 将这9个类星体中 z_{em} 较大者的紫外谱与先前已获得的高分辨可见区光谱作了比较, 结果导出 L_{α} 森林的 $n(z)$ 从 $z=1$ 到 $z=3.5$ 具有中等程度的演化: $\gamma=1.29 \pm 0.20$ 。

Peterson 等人^[4]则由16个类星体求得 $\gamma=2.36 \pm 0.36$, $n(z)$ 随 z 变化得十分迅速。

前述所有工作中, 作为自变量的 z 皆系 L_{α} 森林中吸收线红移的某种平均值。遵循不同的思路, Bian 等人^[28]研究了16个类星体的 $n(z)$ 与发射红移 z_{em} 的关系, 结果发现对给定的吸收红移 z_{obs} 而言, $n(z_{obs})$ 在统计意义上明显地随 z_{em} 的增加而增加。今后如能以更大的样本在更大的红移范围内证实这一结果, 则它将为“ L_{α} 森林起源于星系际云”的假说造成一定的困难。

3. 不同研究工作何以导致不同结果 以往统计研究 $n(z)$ 主要有三种不同的做法:

(1) 对每个类星体的 L_{α} 森林的全部成员线求出平均红移值 \bar{z}_{obs} 和平均线密度 $n(\bar{z}_{obs})$, 然后对诸类星体的 \bar{z}_{obs} 和 $n(\bar{z}_{obs})$ 进行统计。典型实例如 Peterson^[30] 和 Peterson^[25]。

(2) 对某一确定的 z_{obs} , 对所有类星体求出一个平均线密度值 $\bar{n}(z_{obs})$, 再研究 $\bar{n}(z_{obs})$ 随 z_{obs} 的变化。典型实例如 Sargent 等人^[21]。

(3) 原则上, 更合理的做法应是单独查明每个类星体的 L_{α} 森林的 $n(z)-z$ 关系。但实际上, 由于单独一个类星体的 L_{α} 森林覆盖的 z_{obs} 范围太小, 吸收线数亦太少, 故不足以单独确定 γ 值。Carswell 等人^[29] 和 Bian 等人^[28] 都对此作过计算和讨论。

(4) 将整个统计样本中的全部类星体依红移大小分组, 求出每组的 \bar{z} 和 $n(\bar{z})$, 再研究两者的关系。这实际上是(1)和(2)的结合。实例如 Chen 等人^[24]。

Carswell 等人^[29] 曾对同样7个类星体分别用上述(1)、(2)、(3)三种方法求 γ 值, 结果差异很大。对此, 该文以置疑的方式提出三种可能的起因: (1) 是否有某种隐藏的效应, 致使对单个类星体而言 $n(z)$ 随 z 的增大而减小, 但是整个类星体 L_{α} 森林的平均线密度又随 z_{em} 的增大而增加? (2) 是否有 L_{β} 吸收线混杂在内? (3) 混合效应和对连续谱的估计影响了吸收线样品, 例如信噪比的变化致使一群不够入选标准的弱线在某些情况下因混合而被当作一条强线, 并纳入了统计样本?

Bian 等人^[28] 对7个类星体分别求出其 $n(z)$ 变化的行为, 结果不存在共同的规律性, 从而不支持“对单个类星体而言 $n(z)$ 随 z 而减小”; 同时, 许多作者的统计样本都仅限于取 $\lambda_{L_{\beta}}$ (1

$+z_{em}) < \lambda < \lambda_{L_{\alpha}}(1+z_{em})$ 的吸收线, 故不会混入 L_{β} 吸收; 上述第(3)种可能性较复杂, 需有更多更高分辨率的观测, 将吸收线更好地分离开来, 才能得到较为明朗的结果。

总之, 目前对 $n(z)$ 的研究仍是相当初步的, 更好的结果尚有待于更多更好的观测资料。但 $n(z)$ 随 z 迅增, 因而吸收云有演化看来大体上已可肯定。云演化的物理机制尚需探讨, 已提供的可能性例如有“在较早的宇宙时刻云的电离度较小”(见 Ostriker 和 Ikeuchi^[39])。

地面观测受大气吸收限制, 光谱紫端通常都局限于 $\lambda > 3,200 \text{ \AA}$, 相应的 L_{α} 森林吸收线红移值 $z_{obs} > 1.7$ 。不久前 Murdoch 等人^[19] 利用英澳望远镜发现了 BL Lac 型天体 0215 + 015 的光谱中有 $z_{obs} \sim 1.5$ 的 L_{α} 森林, 这是一项新的进步。对未来的研究而言, 在大气外取得高分辨率高信噪比的类星体紫外光谱乃是至为重要的, 这可望由空间望远镜来完成。

六、静止等值宽度 w_0

L_{α} 森林区因吸收线密集, 故其连续背景很难确定, 谱线等值宽度的观测和测量误差就很大。迄今关于吸收线静止等值宽度 w_0 的统计研究工作仍很少, 已有的结果可归纳为四个方面。

1. 静止等值宽度谱 Sargent 等人^[21] 由 6 个类星体得出其吸收线 L_{α} 森林静止等值宽度谱具有指数形式:

$$n(w_0) = (N^*/w_0^*) \exp(-w_0/w_0^*) \quad (5)$$

且 $N^* = 154 \pm 11$, $w_0^* = 0.362 \pm 0.021$, 即 $n(w_0) = 426 \cdot e^{-2.76w_0}$ 。该文附录 A 考虑了谱线混合效应。作混合改正后得 $N^* = 250$, $w_0^* = 0.25$, 或 $n^*(w_0) = 1000e^{-4w_0}$ 。

Young 等人^[23] 对 3 个类星体求得 $N^* = 135 \pm 20$, $w_0^* = 0.232 \pm 0.034$ 。该文作者认为由于这 3 个类星体 z_{em} 都较小, 谱线密度较低, 故可不作谱线混合改正。由 w_0^* 可知 [23] 与 [21] 的指数律形式十分相似。

Carswell 等人^[30] 由 Q1101-264 的 0.25 \AA (FWHM) 分辨率观测导出: 对于 $z=2$, 统计 $w_0 > 0.033 \text{ \AA}$ 的吸收线有 $N^* = 264 \pm 8$, $w_0^* = 0.16 \pm 0.02$; 若限于统计 $w_0 > 0.075 \text{ \AA}$ 的吸收线, 则有 $w_0^* = 0.19 \pm 0.14$, 与取 $w_0 > 0.033 \text{ \AA}$ 的统计结果很接近。这说明等值宽度谱对所选取的探测极限不敏感。该文作者认为所得结果与文献 [21] 差异较大的原因是本文的观测分辨率更高, 因而探测到的弱线数目增多, 于是 w_0 谱变陡。

2. w_0 随 z 的变化 Sargent 等人^[21] 和 Zou 等人^[22] 先后对 5 个和 9 个类星体使用同样的非参数统计方法得出: w_0 无随 z 的显著变化。这两项工作又在“吸收云源自类星体抛射”的假说框架下, 检验了 w_0 是否随抛射参数 $\beta = v/c$ 显著变化 (v 是抛射速度, c 是光速), 并得出否定的结果, 故此项统计结果有利于吸收物质的插入假说。

3. 不同类星体的 w_0 谱是否相同 文献 [21] 和 [22] 用同样的非参数统计方法得出: 不同类星体的 w_0 谱无显著差异。

4. 在 L_{α} 发射翼与在连续区的吸收线 w_0 之比较 文献 [21] 和 [22] 用同样的方法, 将 $\Delta z = z_{em} - z_{obs} < 0.1$ 的吸收线归为一组, $\Delta z > 0.1$ 的作为另一组, 用非参数统计方法比较这两组样本, 结果表明它们无显著差异。由此可推断吸收云的尺度 $D \gtrsim 10^{20}$ 厘米, 详情见上述文献。

七、吸收云的成团性

研究 L_a 吸收云是否有成团性, 常用的方法是计算这些 L_a 吸收线的两点相关函数。

1. 基本概念 在Friedmann模型中, 与给定的红移范围 $[z^a, z^b]$ 相应的共动坐标距离范围 $[S_0^a, S_0^b]$ 与 q_0 有关, 但因两点相关函数对 q_0 不敏感, 故可取 $q_0 = 0.5$ 。这时红移为 z 的天体共动坐标为

$$S_0 = 2[1 - (1+z)^{-1/2}] \quad (6)$$

对于每一对吸收线 i 和 j , 其共动距离为

$$s_0 = S_0^i - S_0^j = (1+z)^{-3/2} \Delta z \quad (7)$$

$$\Delta z = |z_i - z_j|, \quad z = (z_i + z_j)/2$$

L 条线共有 $L(L-1)/2$ 个 s_0 值。对 s_0 计数, 为补偿“边缘效应”, 需将间隔为 s_0 的计数除以响应函数

$$\psi(s_0) = (S_0^b - S_0^a - s_0) / (S_0^a - S_0^b) \quad (8)$$

设 $m(s_0)$ 为作这种改正后在 s_0 到 $s_0 + \Delta s_0$ 中的线对数, 则定义两点相关函数 $\xi(s_0)$ 为

$$\xi(s_0) = \frac{m(s_0)}{m_b} - 1 \quad (9)$$

m_b 是每个 Δs_0 间隔中的平均线对数。

2. 结果 Sargent 等人^[21]首先对 5 个类星体作了 L_a 云的两点相关函数, 得出共动距离在 300 至 30,000 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的尺度上相关函数皆平坦, 即 L_a 云无成团倾向。Zou 等人^[22]计算了 9 个类星体的 L_a 云两点相关函数, 结果在仪器分辨率极限内平坦。Sargent 等人^[31]取得了类星体对 Q1623 + 269 ($z_{em} = 2.518$) 和 Q1623 + 268 ($z_{em} = 2.605$) 的 1.1 \AA 分辨率光谱, 它们在天球上分离 173", 相应于 $z = 2.5$ 的线距离为 1.92 Mpc ($q_0 = 0$) 或 0.86 Mpc ($q_0 = 1$)。对它们的 L_a 森林分别作自相关后相加, 结果从 138 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 到 12,500 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 两点相关函数平坦。后来, Sargent 等人^[32]对 Q1623 + 269 研究的新结果仍表明 L_a 云不成团。

3. 类星体对 L_a 吸收线的交叉相关 在(7)式中 i 和 j 分别取自一个对中的两个类星体 A 和 B, 且将响应函数改为

$$\begin{aligned} \psi(s_0) &= F(s_0) / F(0) \\ F(s_0) &= \min\{S_{\max}^A, S_{\max}^B + s_0\} - \max\{S_{\min}^A, S_{\min}^B + s_0\} \\ &\quad + \min\{S_{\max}^A + s_0, S_{\max}^B\} - \max\{S_{\min}^A + s_0, S_{\min}^B\} \end{aligned} \quad (10)$$

则可得该类星体对 L_a 吸收线的交叉相关函数。据此, Sargent 等人^[31]对类星体对 Q1623 + 269 和 Q1623 + 268 得出, 它们的 L_a 云在 0—12,500 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围内无相关。

Shaver 和 Robertson^[33]研究了类星体对 Q0307 - 195A ($z_{em} = 2.144$) 和 Q0307 - 195B ($z_{em} = 2.122$), 它们在天球上分离 58", 光谱的有效分辨本领为 2 \AA (FWHM), 交叉相关的结果是速度分离 $\leq 500 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的线对似乎稍多, 但“过剩”仅在临界水平上。Sargent 等人^[5]用类似于文献[31]中所述的方法分析了这对类星体的光谱, 结果并无相关。

总的说来, 迄今尚未在类星体对的 L_a 吸收线间发现交叉相关, 这就限制了吸收云的尺度

上界。文献[31]和[5]据此否定了Oort^[34]关于 L_{α} 吸收源自超团内普遍气体的想法。

八、吸收云的尺度

L_{α} 云无法直接观测, 因此只能用各种间接方法确定其尺度上下限。

1. 下限 如前所述, 文献[21]和[22]对 L_{α} 发射翼和连续区的吸收线静止等值宽度 w_0 的对比分析, 导出吸收云尺度下限 $D > 10^{20}$ 厘米。

Weymann和Foltz^[35]研究了引力透镜三重类星体 1115 + 080 ($z_{em} = 1.725$) 的 A, C 象, 它们在天球上分离 $2''.3$ 。它们有三条 L_{α} 吸收线是共同的; 由其中的一条 $\lambda 3,275 \text{ \AA}$ ($z_{obs} = 1.693$) 可确定吸收云尺度下限为 $D > 0.4 \text{ kpc}$ (1.2×10^{21} 厘米)。

显然, 用引力透镜确定 D 的下限时, “透镜”需离观测者越远越好, 吸收云则离透镜越近越好。有鉴于此, Foltz 等人^[36]以 2 \AA 分辨率研究引力透镜双类星体 2345 + 007 A, B ($z_{em} = 2.151$) 的结果导致 $z = 2$ 处 $D > 5 - 25 \text{ kpc}$ (即 $1.5 - 7.5 \times 10^{22}$ 厘米, 具体数值需视“透镜”的位置而定), 一举将下限较先前提高了一个多量级。该文作者认为由于 A, B 两象的光谱中有 2—3 条线非共有, 或强度显著不同, 故上述 D 值也许就是云的特征尺度, 而不只是它的下限。

2. 上限 由前文所述类星体对的 L_{α} 森林吸收线无交叉相关可得 $z = 2.5$ 处 $D < 0.45 \text{ Mpc}$ (1.4×10^{24} 厘米, 取 $q_0 = 1/2$)^[5]。

高分辨观测的结果表明, L_{α} 森林吸收线的多普勒宽度不超过大约 $40 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 由此可得云的视向尺度上限 $D < 3.7 \times 10^{23}$ 厘米^[5]。

3. 综上所述, 吸收云尺度 D 需满足:

$$1.5 - 7.5 \times 10^{22} \text{ cm} < D < 3.7 \times 10^{23} \text{ cm}.$$

九、 L_{α} 云的物理性质

这方面工作尚少, 主要文献有 Sargent 等人^[21](无自引力的云模型), Melotte^[37] (*引力束缚云”的提出), Black^[38](多方球云模型), 以及 Ostriker 和 Ikeuchi^[39](遵循文献[21]作更详尽的研究), 文献[5]已作评述。此外, Oort^[34]在薄饼模型的框架下考虑了平面平行层的引力束缚系统。

所求的物理参数主要是云的尺度 D 、温度 T° 、氢的数密度 n_{H} 、电离度 $n_{\text{HII}}/n_{\text{HI}}$ 和质量 M 等。结果还很不确定。云的尺度 D 已如上节所述。 T° 的典型值为 $10^{4.5 \pm 0.5} \text{ K}$, 电离度约为 $10^4 - 10^5$, n_{H} 的典型值为 $10^{-4} - 10^{-5} \text{ cm}^{-3}$, 云的典型质量为 $10^7 M_{\odot}$ 。

Sargent 等人^[21]及 Sargent 和 Boksenberg^[5]以所得的云参数为依据, 断言 L_{α} 云对宇宙平均质量密度的贡献 Q° 小得可以忽略(约为 2×10^{-5})。

十、其他论题简述

与 L_{α} 森林以及 L_{α} 云有关的问题很多, 除前述诸项外, 重要的尚有:

1. **氢云是否原始** 判别的基础是: 若 L_a 云是大爆炸后产生的第一代原始氢云, 则其中应几乎不含恒星核反应产生的各种重元素。反之, 若它们已经历相应程度的演化, 则重元素含量应较高。目前用于探讨该问题的技巧和所得的结果可参阅文献[5]、[6]、[7]及其引用的原始文献。总的说来, 答案尚有待空间望远镜提供的观测资料来揭晓。

2. **氢云的柱密度** 与典型的静止等值宽度 $w_0=0.5\text{\AA}$ 相应的柱密度约为 $N(\text{HI})=10^{14}\text{cm}^{-2}$ 。已知的最高柱密度是 $\log N(\text{HI})=17.3$ (见 Sargent和 Boksenberg^[40])。文献[21]、[22]关于“ w_0 无随 z 的显著变化”这一结论(见第六节)意味着云的柱密度无演化。但鉴于等值宽度测量的不确定性, 与柱密度相关的问题皆尚待更深入地探讨。

3. **更高分辨率的观测和线宽** 迄今所得的高红移类星体光谱分辨率一般都不优于 0.7\AA , 此时 L_a 森林的成员线尚易彼此相混。欲使观测吸收线彼此清晰地分开, 分辨率必须大大提高, 目前所得的结果还很少。Chaffee 等人^[41]在 $\lambda 4,500\text{\AA}$ 附近窗宽 90\AA 范围内以 $12\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ($\sim 0.18\text{\AA}$)的分辨率探测到 Q0100+130($z_{em}=2.69$)的最强 L_a 线多普勒宽度为 $40\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。Carswell 等人^[30]以 0.25\AA (FWHM)的分辨率取得 Q1101-264 的三个窗口(总宽度约 480\AA)的光谱资料, 得出线宽范围为 $10\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 至 $40\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 典型值为 $25\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ (约 $0.30-0.35\text{\AA}$)。第八节中已给出由线宽上限确定的 L_a 云视向尺度上限。此外, Chaffee^[42]对星系和类星体高分辨光学与紫外光谱观测的评述中, 有关 L_a 森林的部分也颇值得一读, 此处不再赘述。

参 考 文 献

- [1] Sargent, W. L. W., Young, P. J., Boksenberg, A., Carswell, R. F. and Whelan, J. A. J., *Ap. J.*, 230 (1979), 49.
- [2] Chen, J.-S., Morton, D. C., Peterson, B. A., Wright, A. E. and Jauncey, D. L., *MNRAS*, 196 (1981), 715.
- [3] Chen, J.-S., Morton, D. C., Peterson, B. A., Wright, A. E. and Jauncey, D. L., *Proc. Astr. Soc. Australia*, 5 (1984), 355.
- [4] Peterson, B. A., Chen, J.-S., Morton, D. C., Wright, A. E. and Jauncey, D. L., *MNRAS*, (1985).
- [5] Sargent, W. L. W. and Boksenberg, A., in *Quasars and Gravitational Lenses, Proc. of the 24th Liège International Astrophysical Colloquium*, 518, (1983).
- [6] Chen, J.-S., in *The Third Asian-Pacific Meeting of IAU (1984)*, Submitted to *Astrophys. and Space Sci.*
- [7] Chen, J.-S., *Progress in Astronomy*, 3 (1985), 122.
- [8] Weymann, R. J., Carswell, R. F. and Smith, M. G., *Ann. Rev. A. Ap.*, 19 (1981), 41.
- [9] Burbidge, E. M., Lynds, C. R. and Burbidge, G. R., *Ap. J.*, 144 (1966), 447.
- [10] Stockton, A. N. and Lynds, C. R., *Ap. J.*, 144 (1966), 451.
- [11] Arp, H. C., Bolton, J. G. and Kinman, T. D., *Ap. J.*, 147 (1967), 840.
- [12] Burbidge, E. M., *Ap. J.*, 147 (1967), 845.
- [13] Greenstein, J. L. and Schmidt, M., *Ap. J.*, 148 (1967), L13.
- [14] Burbidge, G. and Burbidge, M., in *Quasi-Stellar Objects*, p.40, San Francisco: Freeman, (1967).
- [15] Lynds, C. R., in *External Galaxies and Quasi-Stellar Objects*, IAU Symp. No. 44, p.127, ed. by D. E. Evans, Dordrecht: Reidel, (1972).
- [16] Lynds, C. R., *Ap. J.*, 164 (1971), L73.
- [17] Young, P. J., Sargent, W. L. W., Boksenberg, A., Carswell, R. F. and Whelan, J. A. J., *Ap. J.*, 229 (1979), 891.
- [18] Bian, Y.-L., Cui, Z.-X. and Chen, J.-S., *Acta Astrophysica Sinica*, 3 (1983), 253.

- [19] Murdoch, H. S., Hunstead, R. W., Blades, J. -C. and Pettini, M., in *The Third Asian-Pacific Meeting of IAU* (1984).
- [20] Peterson, B. A., in *The Large Structure of the Universe*, IAU Symp. No. 79, p.389, ed. by M. S. Longair and J. Einasto, Dordrecht: Reidel, (1978).
- [21] Sargent, W. L. W., Young, P. J., Boksenberg, A. and Tytler, D., *Ap. J. Suppl.*, **42** (1982), 41.
- [22] Zou, Z. -L., Chen, J. -S., Bian, Y. -L., Tang, X. -Y. and Cui, Z. -X., *Acta Astrophysica Sinica*, **2** (1982), 253.
- [23] Young, P. J., Sargent, W. L. W. and Boksenberg, A., *Ap. J.*, **252** (1982), 10.
- [24] Chen, J. -S., Zou, Z. -L., Cui, Z. -X., Bian, Y. -L., Tang, X. -Y. and Sun, S. -D., in *Proc. of the Third Marcel Grossmann Meeting on General Relativity*, p.855, ed. by Hu Ning, Beijing: Science Press, (1983).
- [25] Peterson, B. A., in *Early Evolution of the Universe and Its Present Structure*, IAU Symp. No. 104, p.349, ed. by G. Chincarini and G. O. Abell, Dordrecht: Reidel, (1983).
- [26] Hunstead, R. W., Murdoch, H. S., Pettini, M., Blade, J. C., in *The Third Asian-Pacific Meeting of IAU* (1984).
- [27] Bechtold, J., Green, R. F., Weymann, R. J., Schmidt, M., Estabrook, F. B., Sherman, R. D., Wahlgvist, H. D. and Heckman, T. M., *Ap. J.*, **281** (1984), 76.
- [28] Bian, Y. -L., Chen, J. -S. and Zou, Z. -L., *Acta Astrophysica Sinica*, to be Published.
- [29] Carswell, R. F., Whelan, J. A. J., Smith, M. G., Boksenberg, A. and Tytler, D., *MNRAS*, **198** (1982), 91.
- [30] Carswell, R. F., Morton, D. C., Smith, M. G., Stockton, A. N., Turnshek, D. A., Weymann, R. J., *Ap. J.*, **278** (1984), 486.
- [31] Sargent, W. L. W., Young, P. and Schneider, D. P., *Ap. J.*, **256** (1982), 374.
- [32] Sargent, W. L. W., Boksenberg, A., Fillmore, J. and Young, P. J., *Ap. J.*, (in preparation) quoted by ref. [5].
- [33] Shaver, P. A. and Robertson, J. G., *Ap. J.*, **268** (1983), L57.
- [34] Oort, J. H., *Astron. Astrophys.*, **94** (1981), 359.
- [35] Weymann, R. J. and Foltz, C. B., *Ap. J.*, **272** (1983), L1.
- [36] Foltz, C. B., Weymann, R. J., Röser, H. -J. and Chaffee, Jr., F. H., *Ap. J.*, **281** (1984), L1.
- [37] Melotte, A. L., *Ap. J.*, **241** (1980), 889.
- [38] Black, J. H., *MNRAS*, **197** (1981), 553.
- [39] Ostriker, J. P. and Ikeuchi, S., *Ap. J.*, **268** (1983), L63.
- [40] Sargent, W. L. W. and Boksenberg, A., *Ap. J.*, (in preparation) quoted by ref. [5].
- [41] Chaffee, Jr., F. H., Weymann, R. J., Latham, D. W. and Strittmatter, R. A., *Ap. J.*, **267** (1983), 12.
- [42] Chaffee, Jr., F. H., *P.A.S.P.*, **95** (1983), 700.

(责任编辑 刘金铭)

The Lyman-Alpha Forests in QSO Spectra

Bian Yulin

(Beijing Astronomical Observatory, Academia Sinica)

Abstract

In the history of identifying QSO spectra, "Lyman-Alpha forest" is the next milestone following the previous ones, "emission redshift", "absorption redshift" and "multiple redshifts". The study of Lyman-Alpha forest is an efficient way to understand

the problems of the distribution and the evolution of intergalactic matter, and therefore it is significant in cosmology. The first review article focused on the problems concerning Lyman-Alpha forest is Sargent and Boksenberg^[5], and the present one is the second. There are ten sections included in this article: (1) introduction, (2) the formation of the idea about "Lyman-Alpha forest", (3) the confirmation of this hypothesis, (4) origin of Lyman-Alpha forest, (5) number density $n(z)$ of absorption lines in Lyman-Alpha forest, (6) rest equivalent width w_0 , (7) clustering of Lyman-Alpha clouds, (8) scale of Lyman-Alpha clouds, (9) physical state of Lyman-Alpha clouds, (10) brief notes on other topics involving Lyman-Alpha forest (as to the details, one can see Refs. [5,6,7,8] and the Refs. quoted by these reviews).