

活动星系核 (AGN) 的宽线区 (BLR)(I)*

薛 随 建 程 福 臻

(中国科学技术大学天体物理中心 合肥 230026)

(中国科学院陕西天文台 临潼 710600)

摘 要

AGN 天体 (不包括 BLLac 天体) 的主要特征之一, 就是它们的光谱中有宽而强的发射线, 因此, 这些宽发射线的产生区域 BLR 为人们提供了一个了解 AGN 天体物理本质的独特而重要的场所。在文中围绕讨论 BLR 的基本物理特征, 评述近年来有关的理论和观测研究进展及其现状。在文 (I) 中将重点介绍和讨论 BLR 研究的基本理论框架, 即气体云团的光致电离模型以及发射线云团的起源和约束问题。

关键词 星系: 活动星系 — 星系: 核 — 星系: 赛佛特星系 — 类星体: 线发射 — 辐射机制: 热辐射 — 辐射转移

1 引 言

AGN 是当今天体物理学中最引人注目的研究对象之一。近 30 年来, 随着观测手段的不断改进, 新的发现层出不穷, 对它们的研究势头有增无减, 甚至对其定义也作了多次修改^[1-5]。本文要讲的 AGN, 指的是 AGN 家族中的类星体 (QSO) 和 I 型赛费特星系核 (Sy I)。在这些 AGN 中, 存在产生很宽发射线的区域, 即 BLR, 它紧靠着中心辐射源, 现有的任何观测手段的空间分辨本领都不足以分辨它。研究 BLR 的目的不仅在于掌握 AGN 的结构和宽发射线的成因, 而且在于揭示中心能源产生的物理机制。

目前, 我们主要通过三类不同的观测来获取 BLR 的有关信息: (1) 由发射线的强度观测来推断 BLR 的一些基本物理特征; (2) 通过发射线强度的时变观测可以近似描绘出 BLR 的尺度及其几何结构信息; (3) 根据发射线的轮廓特征及其时变观测, 推断发射线气体的运动状态及有关的物理过程。本文将循着这样的线索, 评述对 BLR 的研究进展和状况。

* 国家科委攀登计划基金支持项目

1993 年 11 月 25 日收到

2 BLR 的基本物理特征

2.1 发射线气体的结团分布

在 AGN 的光谱中, 存在有几种元素的较强的低价电离线, 例如 Mg II、Fe II 线等, 这些谱线是在光学厚气体中才能产生的, 这种气体会强烈吸收紫外电离连续谱。设想, 如果发射线气体完全包围中心电离辐射源, 那么必然会观测到强烈的 Lyman 极限吸收现象; 事实上, 对大多数的 AGN 天体, 观测谱中都不存在这种吸收^[6-8], 说明 BLR 中的发射线气体并不是均匀分布的, 很可能是呈现大量的团块或纤维状结构, 核心区的连续辐射可以通过气体团块间空隙被直接观测到。BLR 的这种特征, 通常用一个几何因子, 即覆盖因子 (covering factor) 来描述。令 Ω 为所有云团对连续谱辐射源所张立体角, 则覆盖因子 $\Omega/4\pi = L(H)/Q(H)$ 。其中, $L(H)$ 、 $Q(H)$ 分别表示 H 元素的某条复合谱线的观测光子数和电离光子数。定量的估算, BLR 的覆盖因子 $\Omega/4\pi \sim 0.1$ ^[6]。

因此, 从理论上, 我们通常假定可以把所讨论的 BLR 看作一球对称分布的云团 (发射线气体组成) 系统, 云团的分布、内部物理条件及云团的动力学状态决定了观测谱中的谱线强度和谱线轮廓, 而这些内容正是理论模型所面临的课题。

2.2 光致电离理论^[4,5]

我们对 BLR 的很多物理猜测得益于早期对河内发射线天体 (例如行星状星云) 的研究。行星状星云的光谱同 AGN 的光谱有类似的特征, 即一些常见元素的粒子发射线叠加在各自的连续谱背景之上。对于前者, 应用光致电离理论, 成功地解释了发射线的各种观测特征, 这促使人们努力把这种机制推广到 AGN 天体。对 AGN 来说, 核心区产生很强的 UV-X 波段连续辐射, 正好提供了丰富的电离光子, 可以解释为什么 AGN 的观测谱比星云谱有丰富得多的不同电离价态的谱线; 另外, 从观测上也发现 AGN 的宽发射线强度与连续谱强度之间有非常好的相关性^[9,10], 这足以说明光致电离是 BLR 中所发生的最重要的物理过程。

光致电离理论可用于计算理论上的谱线强度。在 BLR 中, 该理论包括两部分内容: 对单个云团的光致电离模型, 以及对整个云团系统的处理。单个云团的光致电离模型包含两个方面: 基本方程和模型所需的基本参量。简述如下。

2.2.1 基本方程

(1) 光致电离平衡方程

在 BLR 中某点达到光致电离平衡, 即该点邻域的单位体积内, 所发生的 X 元素的离子 X^i 被光致电离事件数, 与离子 X^{i+1} 和电子发生复合的事件数相等。由于 BLR 内无核反应发生, X 元素丰度守恒, 即 $N_{X^1} + N_{X^2} + \dots + N_{X^i} + \dots = N_X$ 。根据这些方程, 原则上能解出云团的电离结构, 即电离组分 N_{X^i}/N_X 的分布情况。

(2) 能量平衡方程 (或称热平衡方程)

因为光致电离平衡方程中的复合过程直接与电子运动温度有关, 需要定出这一温度, 于是要建立能量平衡方程。物理图像是, 云团一方面吸收中心源辐射而被加热, 同时又通过各种原子过程得到冷却。所以, 该方程形式上可写成: $\sigma_{(\text{加热})} = \Sigma_{(\text{冷却})}$ 。实际上,

建立该方程需要考虑 BLR 中加热和冷却的各种可能机制。主要物理过程有: 束缚 \leftrightarrow 自由过程, 自由 \leftrightarrow 自由过程, 碰撞激发和碰撞退激发过程等。此外, 由于 BLR 云团内部的特殊物理条件, 通常还考虑另外一些加热或冷却机制, 如: 双电子复合、碰撞电离和三体复合、康普顿加热和逆康普顿冷却效应以及次级电子产生过程和电荷交换效应等。由上述可知, 要解能量平衡方程需要联合求解各种离子或原子的能级统计平衡方程。从观测上, $C\ III\ \lambda 977/C\ III]\ \lambda 1907$ 强度比是 BLR 中密度 $\leq 10^{11}\text{cm}^{-3}$ 区的温度指示器, 估算表明 $T_e \leq 2.5 \times 10^4\text{K}$ 。

(3) 辐射转移问题

对 BLR 中的云团, 因为其对发射线和连续辐射都不是光学薄的, 需要认真考虑它们的辐射转移。限于问题的复杂性, 不可能严格求解连续谱及线谱的转移方程, 现代的光致电离计算普遍采用了“onspot”近似和“逃逸几率法”来处理连续谱和谱线的辐射转移。应该指出, 云团的几何形状, 采用球形或平板 (slab) 模型对辐射转移计算有影响。

2.2.2 模型所需的参量

(1) 电离连续谱

通常设 $L_\nu \propto \nu^{-\alpha}$, 谱指数 α 由拟合观测到的 AGN 的连续谱给出。

(2) 云团中的粒子数密度 n

由观测到的谱线特征给出限制。例如, 不存在宽的 $[O\ III]\ \lambda\ 5007$ 禁线, 表明发生了碰撞退激发, 电子密度 $N_e \geq 10^8\text{cm}^{-3}$; 很强的半禁线 $O\ III]\ \lambda 1909$ 、 $N\ III]\ \lambda 1750$ 、 $N\ IV]\ \lambda 1486$ 等, 表明 $N_e \leq 10^{11}\text{cm}^{-3}$ 因而 $10^8\text{cm}^{-3} \leq n \leq 10^{11}\text{cm}^{-3}$ 。

(3) 电离参量 Γ^i

其定义 $\Gamma^i = \text{电离光子数密度} / \text{粒子数密度}$, 模型的计算结果对 Γ^i 也非常敏感。由观测所得的碳元素的线强比, $C\ IV\ \lambda 1549/C\ III]\ \lambda 1909$ 和 $O\ VI\ \lambda 1035/C\ VI\ \lambda 1549$, 给出 Γ^i 的范围是 $10^{-2} - 10^{-1}$ 。

(4) 云团的柱密度 N_{col}

由于 $Mg\ II$ 和 $Fe\ II$ 低激发线的出现, 说明云团是光学厚的, N_{col} 一定大于 Stromgren 临界值 N_S , 量级为 10^{22}cm^{-2} 。如观测到 $Ca\ II$ 线, 则 N_{col} 比 N_S 大得多, 其上限很难估算。

(5) 化学成分

用观测所得的谱线强度比来估算 BLR 化学成分, 不确定性很大。最好的模型计算与观测线强比较指出, 在许多 AGN 中, 观测估算值与宇宙丰度值差约在两倍范围内。模型计算中, 一般采用宇宙丰度值。

实际对单个云团的光致电离模型的计算, 需要考虑十多种元素的上百种粒子的各种原子物理过程, 这是一项艰难繁杂的工作, 但是由于问题的重要性, 几乎从人们认识到 AGN 现象开始, 许多研究者便致力于发展和完善光致电离模型的计算。早期 (1979 年以前) 工作的评述请参阅文献 [11], 后期的工作参阅文献 [12—18]。

光致电离模型中计算的单个云团, 实际上具有 BLR 发射线气体的平均性质, 因此常称之为标准或典型云团, 模型计算结果 (主要是发射线的积分强度) 与实测 AGN 谱线平均强度比拟合得较好。标准云团 (近似为 slab 形状) 的主要特征是^[13]: 密度 $n \approx 4 \times 10^9\text{cm}^{-3}$,

柱密度 $N \approx \times 10^{23} \text{cm}^{-2}$ ，电离参量 $\Gamma^i \approx 0.03$ 。

2.2.3 对整体云团系统的处理

完整的光致电离模型，还应进行第二步工作，即将所有的发射线云团对线辐射的贡献累加起来。这是项困难的工作，因为如 BLR 结构、云团密度、数目分布及几何形状变化等诸多因素，只能由观测到的覆盖因子给出限制。一般的作法是假定球对称几何（即所谓的标准光致电离模型），则所有的未知参量都是径向距离的函数，这样，极大限制了自由参量数目，使得计算结果可与观测比较^[19-21]。图 1 显示了一例光致电离模型的出射谱（谱线叠加在入射连续谱之上）与观测谱的对照。图中不光滑线为多个类星体的平均复合谱，宽线区的内外半径值为： $r_{\text{in}} = 10^{16.5} \text{cm}$ ， $r_{\text{out}} = 2 \times 10^{18} \text{cm}$ 。从理论与观测的比较来看，尽管光致电离模型很大程度上反映了 BLR 电离气体的物理性质，但仍然存在问题，其中较为突出的问题有：

(1) “Ly α /H β ” 疑难

从图 1 中可以看出，Ly α 线与 H β 和 H α 线的强度比的理论值明显低于观测值，其中 H β 较 H α 突出，故此现象称为“Ly α /H β ” 疑难。多数光致电离模型都试图在电离云团中引入“HI 区”来解决此问题。因为在 HI 区中，一方面，Ly α 光子会被“囚禁”，即基态 H 原子吸收 Ly α 光子跃到第一激发态上；另一方面，随着 $n = 2$ 态的 H 原子数的增加，H 原子碰撞激发或电离的几率增大，进而会产生较多的 Balmer 线光子。结果，Ly α /H β 比值会在一定程度上减小。遗憾的是，迄今还没有一个模型能够给出与观测符合得很好的 Ly α /H β 值。不少天文学家注意到，尘埃对理论谱的“红化”效应也有助于解释“Ly α /H β ” 疑难。例如，电离云中如果存在尘埃，会“选择”吸收 Ly α 光子；BLR 以外的尘埃则会“红化”整段谱，使波长长的光子相对增加。但是尘埃在 BLR 中的存在及其分布是个更加不确定的因素。另外，一种新颖的谱线辐射理论——Cerenkov 机制的应用，可以近乎“完美”地给出 Ly α /H β 值及其 Balmer 减缩^[22]，但该模型要求云团中性 H 原子密度高达 10^{15}cm^{-3} ，目前尚缺乏有力的观测证据。

(2) “Fe II” 线问题

由于 Fe⁺ 离子能级的复杂性，Fe II 发射线往往呈现一簇簇的线丛，分布在紫外至光学谱区，其中 2000—4000Å 一段线丛特别强，它们与 Balmer 连续谱、Mg II 线等一些低电离谱线混杂在一起，在 AGN 光谱中产生一明显的隆起，俗称“小蓝包”。在标准光致电离模型的框架下，如不改变 Fe 元素的正常丰度，理论计算很难解释观测到的 Fe II 发射线强度^[23]（其总强度甚至可与 Ly α 强度相比）。因此，Fe II 线问题也是有待解决的难题之一。

(3) Baldwin 效应

对 AGN 天体的统计研究发现，某些宽发射线的等值宽度 (EW) 与连续谱光度之间存在很强的反相关关系，这一现象最初由 Baldwin 分析对 CIV $\lambda 1549$ 的研究结果得到，故称为 Baldwin 效应。其表示为 $\text{EW}(\text{CIV}) \propto L_{1549}^{-r}$ ， r 为小的正指数，不同的统计样本，其值略有差异。进一步研究发现，一般高电离线较低电离线的 Baldwin 效应明显，例如 $\text{EW}(\text{Ly}\alpha)$ 与连续谱光度的相关弱于 $\text{EW}(\text{CIV})$ ，因为前者的电离阈值为 13.6eV，而后者为 48eV。光学谱线如 H β 与其光学光度之间却无 Baldwin 效应。这些事实是理解

Baldwin 效应的关键。根据光致电离图像, 谱线的 EW 主要是由电离连续谱形和覆盖因子决定的物理量, 相应地, 对 Baldwin 效应产生了两种定性解释。一种认为 BLR 的覆盖因子与 AGN 光度有逆相关, 即高光度的 QSO 比低光度的 Sy I 星系显得更“透明”些, 从而引起 Baldwin 效应。另一种观点认为, Baldwin 效应是由于电离连续谱形随光度的变化造成的^[25,26]。最近的统计研究表明, 随着光度的增加, AGN 的连续谱形变“软”, 即 48eV 以上的高能电离光子相对于其 UV 和光学光子要少, 这不仅可以解释 Baldwin 效应, 而且同时也解释了不同谱线之间 Baldwin 效应的系统性差别。

我们曾经指出, 谱线强度与连续光度之间的密切联系是建立 BLR 光致电离理论的重要观测依据之一。Baldwin 效应使我们从另一方面看到光致电离理论的应用, 同时也能给出有关 AGN 核心连续谱辐射源的重要信息。一个自然的问题是, 究竟什么原因造成不同 AGN 天体连续谱形的不同? 答案只能在 BLR 以内的区域去找。幸运的是, AGN 核心区同样有着丰富的物理内容, 前述一些困扰 BLR 标准模型的疑难问题似乎都需借助此得以解决。例如, AGN 核心区吸积盘的存在可能对 BLR 至少有两方面的影响: (1) 标准模型中的电离连续谱不再是各向同性的, 尤其是 UV 电离辐射部分沿吸积盘轴向和径向分布不均匀^[28]。标准模型倾向于较多考虑了受到 UV-X 波段辐射场均匀照射的沿轴向分布的云团; 而沿盘径向分布的云团, 主要的电离光子来自 X 射线辐射。因而这些云团主要产生低电离发射线, 这在一定程度上弥补标准模型的不足。非各向同性辐射吸积盘的谱形, 主要是与视角(盘轴与视线夹角)有关的。当盘面向我们时, 连续谱光度大, 但谱形较软, 当盘侧向时, 则正相反, 这或许是对 Baldwin 效应更深层的解释, 或许可以反过来作为 AGN 核心区有吸积盘存在的一个佐证。顺便指出, AGN 吸积盘的视角效应, 在探索各类 AGN 的统一模型中起着极其重要的作用^[33]。(2) 大尺度吸积盘(尺度 $\sim 10^6 R_g$, 引力半径 $R_g = GM/c^2$) 的外区温度已降至很低 ($< 10^4 K$), 被认为是另一个电离发射区。虽然该区不可能有直接的电离照射源, 但 X 射线光子可以通过吸积盘外围介质的散射作为间接电离源, 因而盘外区也主要是低电离发射区^[29-32]。近年来, 作为一种独立的光致电离模型, 吸积盘上的线辐射问题得到较好的研究, 最大的问题是目前对大尺度几何薄盘的结构还缺乏深入了解^[33]。所以, AGN 中是否存在多成分的 BLR, 还有待于观测检验。

2.3 云团的约束和起源

2.3.1 BLR 的两个特征量

(1) 发射线气体的总质量

考虑云团中由质子—电子复合产生的发射线, 例如 Ly α (该过程对 Ly α 总光度的贡献约为 94%^[10], 另外碰撞激发过程对 Ly α 光度有贡献), 考虑电离平衡条件, 则可给出发射线气体即所有发射线云团的总质量的下限。

$$M \geq 30M_{\odot} \left(\frac{L_{\text{Ly}\alpha}}{3 \times 10^{44} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}} \right) \left(\frac{4 \times 10^9 \text{cm}^{-3}}{N_e} \right) \left(\frac{N_{\text{col}}}{5 \times 10^{21} \text{cm}^{-2}} \right)$$

其中 $L_{\text{Ly}\alpha}$ 代表谱线的观测光度, 上式中的最后一项表示云团中包含有的“Stromgren 柱”, 即 $N_S = 5 \times 21 \text{cm}^{-2}$ (标准云团密度下)。

(2) 云团个数及填充因子 (Filling Factor)

单个云团的特征尺度 $a \sim 10^{13}\text{cm}$ ，假定云团为球形，则单个云团的质量 $m_c \propto na^3 \sim 10^{-8}M_\odot$ 。因此整个 BLR 大约包含有云团总数为 $N_c = M/m_c \sim 10^9$ ！如此众多的小云团，所占的 BLR 的空间体积用一个几何因子——填充因子表达；采用 BLR 的尺度为 $R \sim 0.1\text{—}1\text{pc}$ (由发射线的光变特征估算)，则填充因子 $f \propto N_c a^3/R^3 \sim 10^{-3}\text{—}10^{-6}$ 。可见，发射线气体只占整个 BLR 的一小部分体积。这一图像与我们观测到连续谱辐射源非完全覆盖的现象是吻合的。

2.3.2 两相介质假说

典型的发射线云团，具有 $T \sim 10^4\text{K}$ ， $n \sim 10^9\text{cm}^{-3}$ ， $a \sim 10^{13}\text{cm}$ 。首先它不可能是自引力束缚的，因为其内部粒子的热能远远大于引力能，即：

$$\frac{c_{\text{th}}}{c_{\text{grav}}} = \frac{3kT}{m_{\text{H}}} \frac{3a}{4\pi a^3 n G m_{\text{H}}} \approx 5 \times 10^7 T_4 a_{13}^{-2} n_9^{-1}$$

其次，注意到云团内声波传播时标为： $t_s = a/c_s \sim 2.5 \times 10^{-2} a_{13} T_4^{-1/2} \text{yr}$ ，即云团自身达到压力平衡的时标，远小于云团在 BLR 中的动力学时标 $t_c = R/V \sim 32 R_{18} V_9^{-1} \text{yr}$ ，这里采用了由宽发射线轮廓推断的云团运动速度约为 $V_9 = V/10^9 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$

以上两点说明，光致电离理论给出的发射线云团是不稳定的，即然它们能够存在 (因为产生可观测的谱线)，一定也存在某种机制来“约束”它们。很自然想到，云团际空间绝非真空，很可能存在一种热而稀薄的介质与云团保持着压力平衡，这样整个 BLR 处于一种两相介质的平衡共存状态，此即两相介质假说^[34-36]。基于此假说，BLR 的整体图像称为两相介质模型 (Two Phase Model)。

两相介质假说中，有一个关键参量决定了辐射场中气体电离及热平衡性质，其定义为

$$\Xi = \text{const} \times \frac{\Gamma^i}{T_c} \propto \frac{f_i}{n T_e} \propto \frac{p_r}{p_g}$$

f_i — 电离流量， p_r — 辐射压， p_g — 气体压。根据 Krolik 等人的计算^[34]， T_e 随 Ξ 值的变化成“S”型 (见图 2)，这意味着在 Ξ 很窄的一个取值范围内 (压力近似平衡) 有双温度解，其中低温正好是发射线云团的温度 $T_c \sim 10^4\text{K}$ ；高温被认为是热相介质的温度 $T_h \sim 10^8\text{K}$ ，冷热两相气体共存。由 AGN 光谱线强度直接估算的 Γ^i ，大致与两相介质所要求的 Ξ 值相当：这正好解释了如下一个观测事实，整个活动星系核家族，其光度差别可达 3 个量级，而它们的宽发射线谱却非常类似，这正是因为它们 BLR 中的发射云具有几乎相同的电离参量的缘故。

实际上，对辐射场中的高温气体 ($T \gg 10^4\text{K}$)，其热平衡完全由康普顿散射 (加热机制) 和逆康普顿散射 (冷却机制) 控制，热相介质的温度 T_h 实则由康普顿温度 T_c 给出，即 $T_h = T_c = h\bar{\nu}/4k$ ，其中 $h\bar{\nu}$ 是电离光子的平均能量， k 是波尔兹曼常数。可以看出 T_h 不依赖于气体密度，完全由电离辐射谱决定。

近年来发现，AGN 的连续谱形与过去光致电离计算较多采用的简单幂律谱有很大差别，主要是在紫波段显示出较幂律谱过剩辐射 (即“紫外大包”)。Fabian 等人及 Mathews

和 Ferland 采用更实际的电离谱, 重新考察两相介质假说^[37,38], 发现由于过剩的紫外光子对康普顿冷却的贡献, 热相介质不再很热, 其温度仅在 10^7K 左右。较“冷”的热相介质会有较大的电子散射光深, 可能会引起一些显著的观测效应, 例如抹平光变, 致宽谱线, 造成 X 射线吸收等, 而这些效应似乎在 AGN 的观测谱中并不普遍。另外, Netzer 指出, 采用新的电离谱形, “S”形也很难出现^[5], 图 2 给出了两种电离谱形及其对应的 $T-\epsilon$ 曲线。从中看出, 实线所代表的 AGN 标准电离谱不能产生两相解。所有这些因素使得十分流行的两相介质假说颇具争议。

2.3.3 约束云团的其他假说

另有其他非“标准”模型解决云团的不稳定性问题。例如, Scoville 和 Norman 认为 AGN 的宽发射线气体, 即红巨星外围的气体包层, BLR 即是这些巨星组成的包围中心核的星团系统^[39]。该模型颇具几个特色: 电离气体的来源明确, 云团的不稳定性也不再成问题; 而且云团的动力学也非常简明。遗憾的是该模型预言了过多数目的主序后星的存在, 单是它们的红外光度就远远超过了 AGN 的紫外光度^[40], 因此该模型显得不切实际。

另外, 电离云团的磁约束思想开始引人注目。BLR 中的磁场可能源于吹入的相对论性粒子风或吸积流; 约束标准云团的磁场强度大致需 1G ^[5], 对模型定量的计算也在发展之中。

2.3.4 发射线云的起源

BLR 的标准图像是, 大量低温高密度的电离云, 沉浸在高温低密的云际介质中, 相应的引发出两类云团起源假说。一种认为发射线云来源于低密热物质, 其生成机制主要是低密物质中热不稳定性的扰动增长。可能的图像是, 由辐射压驱动, 吸积盘表面沿轴向吹出的热风, 受到来自中心核强大的粒子风压作用, 从而引发热不稳定, 结果会产生发射线云^[41-44]。Krolik 则认为, 云际热介质由于热扰动而结团降温, 产生发射线云; 随之, 云团又被其他动力学机制摧毁, 整个 BLR 处于这种动态循环过程^[45]。

另一类假说认为发射线云起源于冷而致密的气体团。Emmering 和 Blandford 提出, 发射线云来自吸积盘外区沿磁力线被辐射压吹出的分子云, 这些分子云被磁场所约束, 受到 UV-X 光子照射, 成为普通的电离发射云^[46]。Kwan 和 Carroll 则提出一种云团的“自然注入”模型, 即认为 AGN 发射线区以外, 可能存在巨大的星际气体云, 它们在 AGN 核心强大引力的作用下, 落入 BLR, 成为发射线云^[47,48]。

Mathews 等人认为, 热扰动机制在合理的扰动幅度和时间内增长为普通的发射线云有很大困难^[49], 他的结论倾向于第二类云团起源模型。

总之, 发射线云的起源是有关 BLR 研究最深刻的问题之一, 该问题与云团的动力学研究密不可分, 而动力学的直接表象是运动学。在 BLR 中, 发射线云的集团性运动反应在谱线轮廓的各种观测特征上, 这一切决定了对 BLR 最基本问题的研究也不仅是一个理论课题, 各种模型的优劣都将依赖于观测检验。

参 考 文 献

- [1] Oke J B *et al.* *Ap. J.*, 1982, 255: 11
- [2] Lawrence A. *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1987, 99: 30
- [3] 程福臻. *天文学进展*, 1989, 7: 241
- [4] Osterbrock D E. In: Kelly A eds. *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*. California: Mill Valley, 1989. 308
- [5] Netzer H. In: Blandford R D *et al* eds. *Active galactic nuclei*. Berlin: Springer, 1990. 57
- [6] Smith M G *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1981, 195: 437
- [7] Reichert G A *et al.* *Ap. J.*, 1985, 296: 69
- [8] Antonucci P R J *et al.* *Ap. J.*, 1989, 342: 64
- [9] Kinney A L *et al.* *Ap. J.*, 1985, 291: 128
- [10] Baldwin J A *et al.* *Ap. J.*, 1989, 338: 630
- [11] Davidson K, Netzer H. *Rev. Mod. Phys.*, 1979, 51: 715
- [12] Weisheit J C *et al.* *Ap. J.*, 1981, 245: 406
- [13] Kwan J, Krolik J H. *Ap. J.*, 1981, 250: 478
- [14] Mushotzky R F, Ferland G J. *Ap. J.*, 1984, 278: 558
- [15] Netzer H *et al.* *Ap. J.*, 1985, 299: 752
- [16] Krolik J, Kallman T. *Ap. J.*, 1987, 324: 717
- [17] Ferland G J, Persson S E. *Ap. J.*, 1989, 347: 656
- [18] Kwan J. *Ap. J.*, 1984, 283: 70
- [19] Netzer H. *Comments On Astrophysics*, 1989, 14: 137
- [20] Rees M, Netzer H, Ferland G. *Ap. J.*, 1989, 347: 640
- [21] Kallman T R *et al.* *Ap. J.*, 1993, 403: 45
- [22] You Junhan, Kiang T, Cheng Fuzhen *et al.* *Astrophys. Spac. Sci.*, 1985, 114: 395
- [23] Wills B J, Netzer H, Wills D. *Ap. J.*, 1985, 288: 97
- [24] Baldwin J A. *Ap. J.*, 1977, 214: 679
- [25] Malkan M A, Sargent W L W. *Ap. J.*, 1982, 254: 22
- [26] Netzer H, Laor A *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1992, 254: 15
- [27] Zheng Wei, Malkan M. *Ap. J.*, 1993, 415: 517
- [28] Netzer H. *M.N.R.A.S.*, 1987, 225: 55
- [29] Collin-Souffrin S *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1988, 232: 539
- [30] Collin-Souffrin S *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1988, 205: 19
- [31] Collin-Souffrin S *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1990, 229: 292
- [32] Dumont A M, Collin-Souffrin S. *Astron. Astrophys.*, 1990, 229: 302
- [33] Blandford R D. In: Blandford R D eds. *Active galactic nuclei*. Berlin: Springer, 1990. 161
- [34] Krolik J, Mckee C M, Tatter C B. *Ap. J.*, 1981, 249: 422
- [35] Lepp S *et al.* *Ap. J.*, 1985, 288: 58
- [36] Kallman T R, Mushotzky R F. *Ap. J.*, 1985, 292: 49
- [37] Fabian A C *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1986, 218: 457
- [38] Mathews W G, Ferland G J. *Ap. J.*, 1987, 323: 456
- [39] Scoville N, Norman C. *Ap. J.*, 1988, 332: 163
- [40] Kwan J, Cheng Fuzhen, Li Zhongwei. *Ap. J.*, 1992, 393: 87
- [41] Smith M D, Raine D J. *M.N.R.A.S.*, 1985, 212: 425
- [42] Smith M D, Raine D J. *M.N.R.A.S.*, 1988, 234: 297

- [43] Mardaljevic J *et al.* *Astrophys. Lett. Commun.* 1988, 26: 35
- [44] Mobasher B, Raine D J, *M.N.R.A.S.*, 1989, 237: 979
- [45] Krolik J H. *Ap. J.*, 1988, 325: 148
- [46] Emmering R T, Blandford R D, Shlosman I. *Ap. J.*, 1992, 385: 460
- [47] Kwan J, Carroll T J. *Ap. J.*, 1982, 261: 25
- [48] Carroll T J, Kwan J. *Ap. J.*, 1985, 288: 73
- [49] Mathews W G, Doane J S. *Ap. J.*, 1990, 352: 423

(责任编辑 刘金铭)

The Broad-line Region in Active Galactic Nuclei (I)

Xue Suijian Cheng Fuzhen

(Center For Astrophysics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

Shaanxi Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Lintong 710600)

Abstract

One of typical characteristics of active galactic nuclei (AGNs, except BL Lac objects) is that strong and broad emission lines appear in their spectra. It is therefore that the broad-line region (BLR), from which broad emission lines come, affords us a unique and important probe of the physics of AGNs. This paper will discuss the various physical conditions of the BLR, review the recent progress and situation in the observations and theoretical studies of the BLR. In paper (I), we will describe the fundamental framework of the BLR—the photoionization model of gas clouds and discuss how these emission clouds are originated and confined.

Key words galaxies: active—galaxies: nuclei—galaxies: Seyfert—quasars: emission lines — radiation mechanisms: thermal— radiation transfer