

活动星系核 (AGN) 的宽线区 (BLR)(II)*

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 (II) 中主要涉及 BLR 的几何结构和尺度及其运动学研究的进展和现状。

关键词 星系: 活动星系 — 星系: 核 — 类星体: 发射线 — 谱线: 轮廓

1 BLR 的尺度及几何结构

1.1 BLR 的两种尺度

1.1.1 理论特征尺度

通常理论上用标准云团距离中心源的径向距离 (也即 BLR 中所有云团的平均径向距离) 表示 BLR 的特征尺度^[1], 根据电离参量 Γ^i 的定义, 有

$$R = \left(\frac{L_{\text{ion}}}{\Gamma^i 4\pi n c} \right)^{1/2} \sim 1 \text{pc} \left(\frac{L_{\text{ion}}}{10^{46} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}} \right)^{1/2} \left(\frac{4 \times 10^9 \text{cm}^{-3}}{N_e} \right)^{1/2} \left(\frac{0.03}{\Gamma^i} \right)^{1/2}$$

对不同类型的 AGN, 其光度差别可达 3 个量级, 但它们的线谱的相似性说明它们各自 BLR 中云团的性质也大致相同, 即 N_e 和 Γ^i 参量的弥散很小, 因此对不同光度的 AGN 序列, 有 $R \propto L_{\text{ion},46}^{1/2}$, 其中 $L_{\text{ion},46}$ 是以 $10^{46} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$ 为单位的电离光度。

1.1.2 实测尺度

多数 AGN 的光谱都显示光变性质。且通常发射线强度的变化比连续谱光变有一时间滞后。根据光致电离图像, 这一时间滞后正是光子信息由核心电离源到 BLR 的传播时

间, 因而, 通过测量谱线强度对连续谱光变的时间响应可直接获得 BLR 的尺度信息^[2]。

记 $L(t)$ 和 $E_1(t)$ 分别为连续谱 (通常取某频率处光度) 和谱线 1 光变曲线。利用标准数学方法, 可以计算出 $E_1(t)$ 和 $L(t)$ 的互相关函数 (CCF), 即不同时间间隔所对应的一系列相关系数, 函数极大值所对应的延时 (τ_{peak}) 乘以光速即相当于谱线 1 所刻划的 BLR 尺度^[3,4]。一个有意思的现象是, 不同谱线给出的 BLR 尺度略有不同, 它指示出 BLR 中电离气体的某种层次分布。表 1 列出了对近距 AGN 天体 NGC5548 的观测结果。

表 1 NGC5548 观测资料的互相关分析结果^[5-8]

谱 线	时延 (τ_{peak})(d)	光变幅度
N V $\lambda 1240$	2	0.40
He II $\lambda 1640$	2	0.36
He II $\lambda 4686$	7	> 0.17
He I $\lambda 5876$	9	0.08
Ly α $\lambda 1215$	10	0.18
C IV $\lambda 1549$	10	0.14
H γ $\lambda 4340$	13	0.11
H α $\lambda 6563$	17	0.06
H β $\lambda 4861$	20	0.09
C III] $\lambda 1909$	22	0.15
Mg II $\lambda 2798$	34—72	0.07

从表中看出一个明显趋势是, 随着谱线电离态的增加, 延时逐渐减小。不同谱线发射区的这种尺度差异对 BLR 的理论模型具有重要的含义^[9]。

需要指出, BLR 的实测尺度普遍小于理论尺度 3--10 倍。尽管这主要因为互相关分析方法倾向于给出 BLR 实际尺度的下限, 但同时也表明确实有部分发射线气体非常靠近中心电离源。因此理论上光致电离模型还应该考虑处于较为极端条件下的电离气体的贡献, 例如 $\Gamma^i \sim 0.1, n \sim 10^{13}$ ^[10]。于是, 对近距 AGN (主要为低光度的 Sy I 星系), 其 BLR 尺度近似有经验关系^[11], $R \approx 0.1 L_{\text{ion}}^{1/2} \text{Pc}$ 。

1.2 BLR 的几何结构

连续谱和谱线光变曲线还可用来给出整个 BLR 的几何信息。光致电离模型的一个基本结论就是谱线的发射强度依赖于注入 BLR 的连续谱流量。设想, AGN 核心区在 $t = 0$ 时刻 (观测者测时) 发生一次连续谱爆发 (显然这一事件可用 δ 函数描述), 则突然增加的电离流量将以光速传播注入 BLR, 随即引发谱线辐射。如果我们于 $t = t_1$ 时刻对该源测量某条谱线的光度, 则得到的是整个 BLR 的辐射贡献, 但其中只有部分线光子与那次爆发事件有关, 这部分线光子所需满足的条件是: 在 $0-t_1$ 这段时间被增加的电离光子“照射”到而产生、并在 t_1 时刻到达观测者。我们便把于 t_1 时刻观测到的、BLR 响应 δ 函数型连续谱爆发而产生的谱线辐射称作转移函数 (或响应函数), 记为 $\psi(t)$ 。一般情况下, AGN 连续谱光变行为比较复杂, 因此谱线的响应光变 $E_1(t)$ 应当是连续谱光变 $L(t)$ 与转移函数的卷积, 即:

$$E_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} L(\tau) \psi(t - \tau) d\tau$$

其中转移函数 $\psi(t)$ 的具体形式是由 BLR 中的发射线气体 (云) 的空间分布特征决定的, 理论上可以写出各种依赖于模型的 $\psi(t)$ 。但可以想象, 不同几何形状的 BLR, 即使其中的发射气体都作适当的分布, 它们所具有的 $\psi(t)$ 也不相同。正因为此, 我们真正感兴趣的是由实测方法获得的 $\psi(t)$ 的形状, 它才包含着更真实的物理信息。由观测的连续谱光变 $L(t)$ 和谱线光度 $E_1(t)$ 求解积分方程可获得 $\psi(\tau)$, 以此推断 BLR 几何信息的技术称作 Reverberation Mapping^[2]。在图 1 中, 我们给出了这种技术应用的一个简单示意, 图中所示的厚球壳和盘柱是目前理论上颇具争议的两种可能的 BLR 几何形状。理论上 $\psi(\tau)$ 易由 $E_1(t)$ 和 $L(t)$ 的逆 Fourier 变换得到; 但实际上, 由于光变曲线采样的间断性和不完整性 (即 $L(t)$ 和 $E_1(t)$ 往往不能同时采样), 一般使用极大熵 (MEM) 方法 (maximum entropy method) 来获得转移函数^[12,13]。目前, 能够进行 MEM 分析的观测资料也非常有限, 而且限于数据缺陷, 不能给出 $\psi(\tau)$ 的唯一解。例如 Maoz 等人^[14] 对 NGC4151 的光变监测资料分析表明, $\psi(\tau)$ 的形状非常类似于厚球壳 BLR 所对应的转移函数, 但也不能绝对排除盘状或其他 BLR 几何模型的可能性。进一步的光变监测以获得更细致完整的光变曲线, 将有助于最终筛选出适当的 BLR 几何模型。

应当指出, 上述时变分析方法都基于电离气体对连续谱光变为线性响应, 但根据光致电离理论, 对大多数谱线线性响应都不是好的近似, 因此线性响应假设是时变分析方法的重要理论缺陷。回避此缺陷的一种措施是采用模型的数值拟合法^[15], 即假定某种可能的 BLR 几何、谱线响应特征 (线性或非线性) 等量, 通过与连续谱光变曲线的卷积来拟合谱线的光变曲线, 从而可以获得 BLR 的结构和互相关尺度等信息, 该方法是对时变分析方法的一个有力补充。

2 BLR 的运动学

2.1 宽发射线轮廓的产生机制

AGN 天体的研究早期, 关于发射线的展宽机制曾有所争论^[16], 但目前已普遍认为, 运动学 Doppler 效应是 AGN 发射线最有效的致宽机制。通过对 BLR 整体图像的认识, 现在不难理解这一物理思想。对某条静止频率为 ν_1 的谱线来说, 单个云团对应有一定的发射率, 而且辐射近似是“单色”的。这是因为对 $T \sim 10^4\text{K}$ 的云团, 其热致宽贡献小于 $10\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 远小于宽发射线的特征宽度 $\text{FWHM} \sim 5000\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[17,18], 因而单色近似是满足的。如果发射线云团以速度 \mathbf{V} 运动 (我们采用相对于 AGN 整体静止的观测系), 则由于 Doppler 效应, 我们观测到的光子频率将是 $\nu_1(1 + \mathbf{V} \cdot \hat{\mathbf{z}}/c)$, 其中 $\hat{\mathbf{z}}$ 是视线方向的单位矢径。对 BLR 内大量云团, 假如它们的运动速度具有一定弥散, 则我们便观测到 ν_1 附近一定频率范围内的光度分布 $F_\nu \propto P(\nu - \nu_1)$, 此分布即为谱线轮廓。可见, 谱线轮廓中包含着云团的运动学信息。因此, BLR 运动学研究的主要思路是: 假定各种可能的运动学模型, 计算出相应的理论谱线轮廓, 再与轮廓的观测特征比较, 藉此推断 BLR 中真实的物质运动形式, 这也是探知 AGN 神秘核心附近物质动力学的唯一途径。

2.2 谱线轮廓的观测特征

AGN 的宽发射线轮廓非常复杂, 难以用一个特征表述, 一些常见文献中较为确定性

的结论描述如下^[19-23]：

(1) 对单独一条典型的宽发射线(如 $H\beta$) 来说, 将近一半的、得到较好观测的 AGN 光谱, 其轮廓是对称的; 在其余一半源中, 不对称轮廓有蓝边延展的, 也有红边延展的。

(2) 对称的宽线轮廓, 它们的谱形用对数函数或者幂律函数拟合得很好。

(3) 少数 AGN 源(如 Arp102B, 3C390.3 等) 的谱线轮廓具有双峰线构(多见于光学波段的 $H\alpha$ 和 $H\beta$ 线)。

(4) 在同一 AGN 源中, 不同谱线间具有一定的线宽差别, 其中特别显著的是 He I $\lambda 5876$ 的谱线轮廓比 H I 谱线($H\alpha$ 和 $H\beta$ 线) 的轮廓要宽。

(5) 在几乎所有的 AGN 源中, $Ly\alpha$ 谱线轮廓具有较好的对称性; 一般 C IV $\lambda 1549$ 线轮廓的蓝端较红端略有增强。而同 C IV $\lambda 1549$ 线比较, $Ly\alpha$ 轮廓的线心部分有较强的峰尖, 而且两翼也较 C IV $\lambda 1549$ 线扩展的更宽些。

(6) 在一类 AGN 源中, 特别是高光度类星体中, 发现不同的发射线具有系统性的红移差别。已经确认的是, $Ly\alpha$ 线及高电离线如 C IV, C III] 等, 相对于低电离线(如 Mg II、 $H\alpha$) 以及禁线(如强禁线 [O III] $\lambda 5007$) 具有小的蓝移。平均量值在 $600-1000\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 如图 2 所示。

2.3 理论谱线轮廓与 BLR 速度场

2.3.1 对数轮廓与径向运动

形如 $F_\nu \propto \ln|\nu - \nu_1|$ 的谱线轮廓, 称为对数轮廓。最初由 Mathews 和 Blumenthal 提出的稳态辐射压加速光学薄云团外流模型得到^[24]; 后来 Capriotti 等人^[25] 及 Penston 等人^[26] 把此结论推论到更广泛的模型, 认为无论云团的光学厚薄, 稳态辐射压加速外流或球对称引力吸积, 都能够产生对数型谱线轮廓, 故对称的对数线型不能对云团纯径向运动模型(内流和外流) 给出很强的约束。但如果考虑到轮廓其他观测特征的限制, 如不同谱线的轮廓宽度差别, 则对较为流行的外流模型不利^[27]。

光学厚云团的径向运动模型还有如下的疑难问题。考虑到 $Ly\alpha$ 光子各向异性辐射的性质, 即大部分 $Ly\alpha$ 光子只能从云团被电离谱照射的一面逃逸, 则模型将预言极端不对称的 $Ly\alpha$ 谱线轮廓。外流模型对应红端强的轮廓; 内流模型对应蓝端强的轮廓, 而观测上, $Ly\alpha$ 轮廓却有很好的对称性。

在径向运动模型的框架下解决上述疑难的最好思想是引入热相介质的电子散射效应, 根据 Kallman 和 Krolik 的计算^[28], 电子散射效应产生的弥漫电离辐射, 以及对谱线光子的散射光深, 极大地改善了 $Ly\alpha$ 轮廓的对称性, 并会造成谱线整体“移动”。该模型近年来还被许多文献引用来解释高电离线的蓝移现象^[23,29]。但笔者认为根据文献^[28] 的结论, 谱线移动现象主要对外流模型明显, 而且对高电离线 $Ly\alpha$ 和 C IV 是红移; 对内流模型 $Ly\alpha$ 和 C IV 谱线并无明显移动, 对该模型的进一步研究正在进行之中^[30]。

2.3.2 双峰谱线轮廓和转动盘模型

通常转动的气体盘会产生双峰谱线轮廓^[31-34]。于是产生了一个问题: 为何 AGN 的双峰谱线轮廓并不像 AGN 具有吸积盘那么普遍? 可能的解释有许多。例如认为窄线成份刚好填充了双峰之间的凹陷; 一个外半径有很大延伸的气体盘实际上也只能产生单峰轮廓等。所以 BLR 的速度场并不排除存在转动成分。双极喷流模型 (bipolar outflow)

也自然产生双峰谱线轮廓^[35]，但该模型不太可能作为 AGN 的普遍情形。此外，还有双黑洞模型，即具有两个 BLR，相互绕转造成双峰谱线轮廓，这些都有待进一步研究。

2.3.3 幂律谱形与轨道运动模型

Penston 等人^[26]曾证明，BLR 中按轨道运动的云团（主要指高偏心率的椭圆轨道和抛物线轨道），可以给出形如 $F_\nu \propto (\nu - \nu_1)^{-2}$ 的幂律谱线轮廓，用这种函数拟合观测轮廓甚至比对数函数更好。迄今，最完整的云团轨道运动模型及其详尽的动力学计算是 Kwan 和其学生 Carroll 提出并完成的^[36,37]。该模型的大致思想是：在 AGN 的发射线区以外，分布着一定数目的巨大气体云，在中心天体强引力作用下，巨云开始几乎沿径向下落；下落过程中巨云不断受到由核心区“吹”出的相对论性粒子风压的阻尼和瓦解作用，因此巨云是不稳定的；大致在 BLR 的特征距离处，巨云碎裂成一堆分立的云团块（即宽发射线云团）。由于不同云团相对于中心天体有一角动量分布，低于某个临界角动量的云团会被中心天体捕获，按照一定轨道绕中心天体运动，此部分云团即 BLR 中主要的谱线发射体；另有部分角动量较大的云团可能最终被“吹”出发射线区。Kwan 等人结合光电离模型，计算出一些谱线的实际轮廓，有许多定性特征与观测符合得很好。该模型的另一大优点是，提供了 BLR 和 NLR 相关联的机制，而目前几乎所有 AGN 的研究，常把 BLR 和 NLR 作为两种极端情况对待，实际上其间似乎应存在某种联系^[38]。

2.3.4 非对称谱线轮廓

任何一种 BLR 几何和运动学模型都应该解释谱线轮廓的不对称性，通常被考虑的机制如下：

(1) 发射线云团的各向异性辐射。

(2) 遮挡效应。尘埃在发射线区的分布或者核心区吸积盘对径向运动云团的辐射有遮挡作用，会引起谱线蓝端或者红端不对称。

(3) 质量损失机制。例如，在 Kwan 和 Carroll 的轨道模型中，谱线轮廓的非对称性是靠“损失”部分云团获得的。

(4) 相对论效应。如果谱线由非常靠近 AGN 核心的开普勒气体盘产生，那么引力红移会造成谱线轮廓红端增强；如果盘以相对论性速度转动，朝向观测者运动的一侧盘物质的辐射，则会由于多普勒集束效应而增强，结果是谱线轮廓的蓝端强度超过红端。

2.3.5 谱线轮廓的光变与速度场

高分辨率的光谱观测，能够分辨出个别谱线轮廓不同部分对连续谱的响应，近年来成为推断 BLR 速度场的一个有力方法。比如，若 BLR 是径向速度场，那么内流运动将预言谱线轮廓的红端对连续谱光变的响应比蓝端要快；外流的情形刚好相反；而转动模型则应预言谱线轮廓的核心部分较线翼部分响应要慢，红蓝两端则无响应差别。目前该方法还只能用于对几个近距 AGN 天体的分析，如 NGC451、NGC5548 和 Fairall 9。遗憾的是，不同的研究人员未得到一致的结论。例如，对 NGC5548：Clavel 等人^[5]对 C IV $\lambda 1549$ 轮廓核与线翼的交叉相关分析发现，线核滞后线翼，故其结论支持位力 (Virial) 化的转动速度场或无规速度场 ($v \propto r^{-1/2}$)；而 Crenshaw 和 Blackwell^[39]的分析结论是红端响应较蓝端明显要早，故支持径向下落速度场。对 NGC4151：Maoz 等人的工作^[14]对 Balmer 谱线的分析结论，倾向于排除 BLR 存在纯径向速度成分；但对

C IV $\lambda 1549$ 的分析, 却显示有明显的径向速度梯度, 总的结论是支持位力化的速度场。对 Fairall 9: Koratkar 和 Gaskell 对 C IV $\lambda 1549$ 的分析, 支持径向下落速度场^[40]。

需要指出, 目前所谓的径向速度场, 主要指分别由引力或辐射压主导的发射线云的内流或外流运动, 因而谱线轮廓红蓝两端是否存在对连续谱光变的响应差异, 是对速度场的可靠判据; 然而, Mathews 最近提出了“云团径向振荡”模型^[41], 即发射线云可能在所受引力与辐射压近似相等的平衡位置附近作径向振荡, 而 BLR 整体则表现为位力化的“无规”运动场, 所以, 根据目前的观测资料, 用谱线轮廓响应分析技术, 还不足以用来完全断定 BLR 的速度场, 但给人的感觉是, BLR 中很可能有多种速度成分。理论上需要研究更为复杂的 BLR 运动学。

总之, 过去对 BLR 几何结构及速场的推断是一种尽可能从一维观测抽取六维 (三维速度和三维几何) 信息的努力, 目前对谱线光变的研究显然是又增加了一维观测信息。我们期待获得更多高信噪比、高时间分辨率的观测结果, 为我们的研究工作注入新活力。

参 考 文 献

- [1] Kwan J. *Ann. NY Acad. Sci.*, 1984, 284: 164
- [2] Blandford R D, McKee C F. *Ap. J.*, 1982, 255: 419
- [3] Gaskell C M, Peterson B M. *Ap. J. Suppl.*, 1987, 65: 1
- [4] Edelson R A, Krolik J H. *Ap. J.*, 1988, 333: 646
- [5] Clavel J *et al.* *Ap. J.*, 1991, 366: 64
- [6] Peterson B M. In: Duschl W J *et al* eds. *Variability of active galaxies*. Berlin: Springer, 1991. 47
- [7] Maoz D *et al.* 1993, preprint
- [8] Dietrich M *et al.* 1993, preprint
- [9] Ferland G J *et al.* *Ap. J.*, 1992, 387: 95
- [10] Ferland G J, Persson S E. *Ap. J.*, 1989, 347: 656
- [11] Netzer H. In: Blandford R D *et al* eds. *Active galactic nuclei*. Berlin, Springer, 1990. 57
- [12] Horne K *et al.* *Ap. J., Lett.*, 1991, 367: L5
- [13] Krolik J H *et al.* *Ap. J.*, 1991, 371: 541
- [14] Maoz D *et al.* *Ap. J.*, 1991, 367: 493
- [15] O'Brien P T, Goad M R. 1993, preprint
- [16] Davidson K, Netzer H. *Rev. Mod. Phys.*, 1979, 51: 715
- [17] Osterbrock D E, Mathews W G. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1986, 24: 171
- [18] Osterbrock D E. *Reports on Progress in Physics*, 1991, 54: 579
- [19] Sulentic J W. *Ap. J.*, 1989, 343: 54
- [20] Crenshaw P M. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1986, 62: 821
- [21] Wilkes B J, *M.N.R.A.S.*, 1984, 207: 73
- [22] Shouder J M. *Ap. J.*, 1982, 259: 48
- [23] Carswell R F *et al.* *Ap. J.*, 1991, 381: L5
- [24] Blumenthal G R, Mathews W G. *Ap. J.*, 1975, 198: 517
- [25] Capriotti E *et al.* *Ap. J.*, 1980: 241: 903
- [26] Penston M V *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1990, 244: 357
- [27] 薛随建, 程福臻, Kwan J. *中国科学*, 1993, 23: 1198
- [28] Kallman T, Krolik J. *Ap. J.*, 1986, 308: 805
- [29] Corbin M R. *Ap. J.*, 1990, 357: 346

- [30] 薛随建, 程福臻, Kwan J. 待发表
[31] Mathews W G. *Ap. J.*, 1982, 258: 425
[32] Shields G A. In: Osterbrock D E, Miller J S eds. *Active galactic nuclei. Proc. of IAU symp. No.134, Santa Cruz, Calif., 1988, Dordrecht: Kluwer, 1989: 577*
[33] Chen K *et al.* *Ap. J.*, 1989, 339: 742
[34] Halpern J P. *Ap. J. Lett.*, 1990, 365: L51
[35] Zhen W *et al.* *Ap. J.*, 1991, 381: 418
[36] Kwan J, Carroll T J. *Ap. J.*, 1982, 261: 25
[37] Carroll T J, Kwan J. *Ap. J.*, 1985, 288: 73
[38] Osterbrock D E, *Ap. J.*, 1993, 404: 551
[39] Crenshaw D W, Blackwell J H. *Ap. J. Lett.*, 1990, 358: L37
[40] Koratkar A P, Gaskell C M. *Ap. J.*, 1989, 345: 637
[41] Mathews W G. *Ap. J. Lett.*, 1993, 412: L17

(责任编辑 刘金铭)

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

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 (II), our interests will centre on the size, geometrical structure and kinematics of the BLR.

Key words galaxies: active—galaxies: nuclei—quasars: emission lines—line: profiles