

活动星系核的统一模式

洪晓瑜 万同山

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

本文评述活动星系核的统一模式理论研究, 这一研究的基础是活动星系核的相对论性射束效应和它周围各向异性气体的遮蔽效应。我们首先叙述几种统一模式, 并阐述其发展。然后讨论检验统一模式的统计检验进展, 特别是 R 参数的作用。本文还评述了多波段 (特别是光学和红外) 的统一模式统计检验问题。

1 引 言

活动星系核 (AGN) 就其观测特性来说, 种类繁多, 成为一个族。由于历史的原因, 观测波段的不同, 主要还是由于星系核的活动受诸多独立参数的制约, 对于 AGN 一直没有标准的分类, 有一定程度的混乱现象。Lawrence^[1] 所提出的 AGN 分类包括: Seyfert I 星系, Seyfert II 星系, LINERS (Low-Ionization Nuclear Emission-line Region), 射电星系, 类星体 (包括光学激变源 OVV, 高偏振类星体 HPQ), BL Lac 天体, 其中 OVV, HPQ 和 BL Lac 天体又被统称作 blazar。

1978 年, Blandford 和 Rees 第一次试图把 BL Lac 天体和射电星系两类观测特性不同的 AGN 联系起来^[2], 把它们统一起来, 归于同类的发射机制。这种“统一模式” (unified scheme) 的思想是基于 AGN 存在着取向 (orientation) 效应, 而这种取向效应, 在射电波段是由于相对论性射束效应 (relativistic beaming) 引起的, 而在光学波段主要表现为气体的遮蔽效应。随后, 许多研究者运用这一思想进行了工作, 发展了多种模式, 把 AGN 的研究引向更加深入。

2 统一模式理论的发展

在本节中我们列出几种主要的统一模式。

2.1 射电强 (radio-loud) 和射电宁静 (radio-quiet) 类星体的统一模式

1979 年 Scheuer 和 Readhead 提出的统一模式, 认为平谱射电类星体和射电宁静类

星体是同一类天体，如果致密射电类星体不成束 (unbeamed)，就表现为射电宁静类星体^[3]。后来证明，这个模式是不正确的。因为对平谱类星体周围的低亮亮度发射，现在已观测到它们的射电图像^[4,5]，致密射电电源有超过总流量 1% 的陡谱展源发射。由于展源发射不可能成束，而不成束的对应体仍为强射电电源，比射电宁静类星体亮。

2.2 blazar 统一模式

Blandford 和 Rees 在利用射束模型 (beaming model) 解释 BL Lac 天体的性质时，提出 blazar 是射电星系和类星体成束 (beamed) 的对应体，并取名为“blazar 统一模式”^[2]。这一理论预测，如果一个 blazar 天体在 $\leq 1/\gamma$ 的锥角内被观测，则 blazar 母星系 (parent population) 的空间密度将比 blazar 大 $\sim 4\gamma^2$ 倍，而 γ 是 Lorentz 因子。

这个模型的示意图如图 1，一种情况是发射区以相对论性射束向观测者运动，另一种情况是由于视线不在对称轴上，发射的光子必须穿过光学厚气体而到达观测者，在传输中经稳定、软化和消偏振。

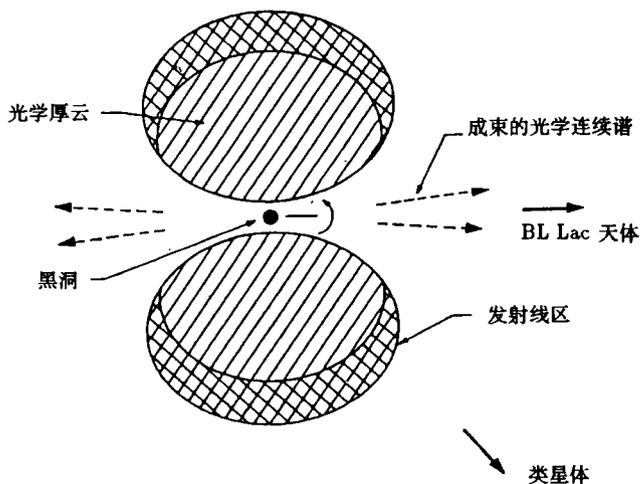


图 1 blazar 统一模式的示意图。若光学连续谱辐射在视线方向成束，从这个方向上观测时发射线就可能受抑制

这种模式的一个直接结果是，双源的展源结构和 BL Lac 现象是反相关的，而一些 BL Lac 天体沿着它的对称轴看过去应该呈现出对应于双源的晕发射 (halo emission)。已经观测到 blazar 核周围的展源发射。Antonucci^[6] 又把它分成两类：有亮宽线的如 AO023+164，其母星系是经典双源类星体；有窄线的如 BL Lac，其母星系是 FRI 射电星系。Murphy^[7] 认为 BL Lac 天体是“致密 VLBI 双源”，而不是类星体。

2.3 致密射电源的统一模式

Blandford 和 Konigl^[8] 提出了致密射电源的总模式。在这种模式中，源的射电辐射和非热高频成份，是由相对论性准直喷流产生的。而射电宁静类星体、射电强类星体、OVV、BL Lac 的不同，主要是由喷流的取向效应所致。

2. 4 核优势 (core-dominated) 和瓣优势 (lobe-dominated) 类星体的统一模式

Orr 和 Browne 提出了一种模式，以检验 Blandford 和 Konigl 模式，这种模式认为：平谱和陡谱类星体的不同观测特性，归因于核的相对论性发射效应和投影、取向效应的综合结果^[9]。他们预测，由于相对论性射束效应，核发射有很强的多普勒增强 (Doppler boosting)，而展源区最多只有轻微相对论性。因此，核发射与展源区的发射之比： $R = \text{核光度} / \text{展源区光度}$ ，它可以用来说明源的取向。 R 是一个很有用的参数，已被许多研究者作为统计量。

2. 5 BL Lac, OVV/HPQ 的统一模式

Murphy^[7] 提出证据认为，BL Lac 天体不是喷流取向接近视线的类星体。Browne 认为，由于 BL Lac 天体和 OVV, HPQ 类星体分布不同，所以需要两种统一模式来描述，经典 BL Lac 天体是从正面看 (seen end-on) 的低光度射电星系 (FRI)，因此还需要一种把陡谱类星体和核优势类星体 (包括 OVV, HPQ) 统一起来的模式^[10]。

2. 6 “大”统一模式 (“Grand” Unified Scheme)

Barthel 综合研究了射电强类星体，强红外星系和强射电星系的统一化问题。其基础仍是取向效应，相对论性效应和尘埃圆环面的遮蔽效应。他主要利用了分光偏振测量数据分析，提出如果取向近于视线，则 AGN 可归于 blazar，如中等角度可归于类星体或宽线射电星系，如近于天空平面可归于窄线射电星系。他认为所有类星体的射束是在和视线成 45° 角的范围内，见图 2^[11,12]。

3 统一模式的统计检验

如上所述，AGN 受到许多独立参数的影响，同样地也需要多种统计检验才能证实、约束或者否定统一模式和射束模型。

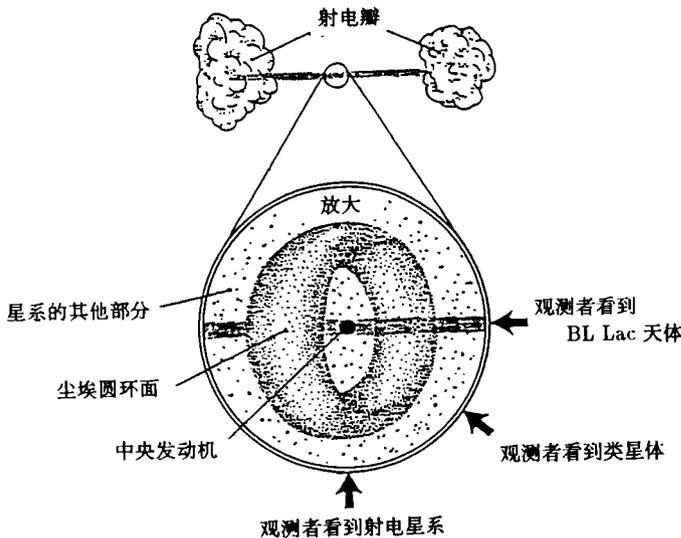


图 2 “大”统一模式示意图

首先, 作为统一模式基础的有三个参数, 即

(1) 尘埃不透明度: 可以局部或完全遮蔽光学、紫外、X 射线的连续辐射, 而增强了红外热辐射。

(2) 相对论性喷流的视角 (viewing angle): 它可以使观测的整个连续谱辐射呈现放大或占主导。

(3) 活动的占空度 (duty cycle of activity), 即活动所占的时间比。它应和中央成份和母星系的质量有关。

统一模式的统计检验应注意到: (1) 所考虑的样本数目往往很少; (2) 哈勃常数 H_0 和减速因子都是未知的; (3) 喷流弯曲的程度是未知的, 因而精确的消投影 (deprojection) 估计很困难; (4) 应考虑样本的选择效应和偏差性; (5) 在比较结构时观测的灵敏度应相近。下面我们分别阐述 blazar 统一模式和类星体统一模式 (Orr 和 Browne)^[9] 的检验。

3.1 blazar 统一模式检验

对这一模式最有力的检验是检测并分析 blazar 的展源发射的结构。其展源结构不可能成束, 可视作内禀性质, 所以应和母星系有相应的形状和投影线尺度。若考虑的母星系为经典射电双源, 正好是正面看, 则展源发射就应该呈现围绕致密核的晕。对这种展源发射做统一模式检验的有 Antonucci 和 Ulvestad^[13], 他们用 VLA 的观测数据进行研究。其结论是母星系应包括两种 FR 类天体。Wardle, Moore 和 Angel^[14] 利用 16 个 blazar 样本 (其中 12 个 BL Lac 天体, 4 个 OVV/HPQ), 其结果是 BL Lac 天体似为成束的 FRI 射电星系。这是目前广为讨论的一个热点问题。

其他的检验包括: 核优势和射电形态学的关系, 单边的展源发射占多数, Doppler 增强, 核优势和射电幅度变化以及时间尺度的关系。Antonucci 和 Ulvestad^[13] 证实了射电幅度变化与核优势度 (degree of core dominance) 相关, 而与时间尺度呈反相关。核优势和光学偏振的关系, Wardle, Moore 和 Angel^[14] 有结果表明, 较多的核优势天体呈现较大的偏振位置角变化性, 而只有较少的天体呈现某个偏向的位置角。但是 Antonucci 和 Ulvestad 的样本比较更大, 否定了这种相关性。

3.2 Orr 和 Browne 统一模式的检验

该模式预测核射电发射由于相对论性射束而增强, 而展源发射充其量有轻微的相对论性, 因此核发射对展源发射的比值 R 可用于表示源的取向。

(1) R 分布统计

Orr 和 Browne 考虑了两个方向相反的相对论性喷流

$$R_\theta = \frac{1}{2} R_\perp [(1 - \beta \cos \theta)^{-2} + (1 + \beta \cos \theta)^{-2}]$$

此式假定喷流的谱指数为零, 而展源的为 1。 R_\perp 是 R_θ 的横向分量。 R_\perp 难于估计, Orr 和 Browne 研究了 3C 星表的 R 分布, 取 $R_\perp = 0.024(5\text{GHz})$, $r=5$ ^[9]。

(2) 核优势和瓣优势类星体的线角尺度 (linear angular size)

不同的研究者都注意到超光速源周围的射电展源结构可能太大, 不可能产生于“正常”的射电展源母体^[15,16]。 Browne 的结论是超光速源的尺度比简单统一模式所预期

的大^[17]。Murphy 也证实了此点,他指出在 VLBI 喷流和大尺度喷流之间需要引入的弯曲尺度太大。解决这个问题的一种方法是在线性尺度和 Lorentz 因子之间引入一种假想的相关^[7]。本文作者之一^[18]证实了这种相关性,见图 3。

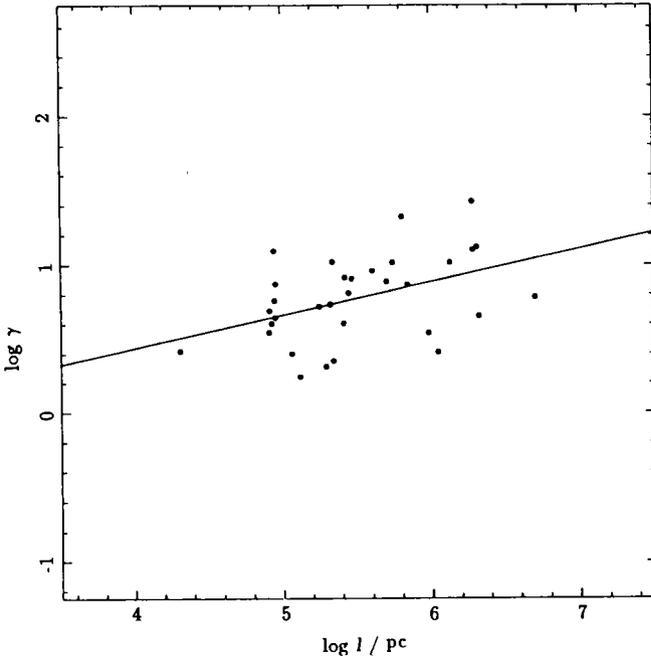


图 3 线性尺度和 Lorentz 因子的相关性

(3) 消偏振不对称性 (depolarization asymmetry) 和 R 的相关问题

预期高 R (核优势源) 应有较强的消偏振不对称性。有喷流的源比无喷流的源有更明显的消偏振不对称性,这和射束模型符合。Garrington^[19]提供数据支持消偏振不对称度 (degree of depolarization asymmetry) 和 R 无相关性。

(4) β_{app} 和 R 的相关性问题

根据简单射束模型,预期高 R 应有大 β_{app} ,即较大的核 Lorentz 因子对应于较强的喷流和较强的源。Browne^[17]发表了一些关于 17 个已知超光速源的展源结构的统计结果,如除去 3C395,与上述预期的相符。

(5) 不同成份的空间分布

按照 Orr 和 Browne 统一模式,应能看到核优势源的周围有弱的陡谱展源结构,而在瓣优势源中应有弱的平谱核^[9]。

(6) Doppler 因子 δ 和 R 的相关性

根据相对论性射束模型,预期高 R 有较大的 Doppler 效应。Ghislini 对 104 个具有喷流性质的源进行统计,发现 R 和 δ 有较明显的相关性^[20]。

(7) 线性投影尺度 d 和 R 的相关性

本文作者之一^[18]利用超光速源样本进行统计,发现 d 和 R 具有反相关性,如图 4

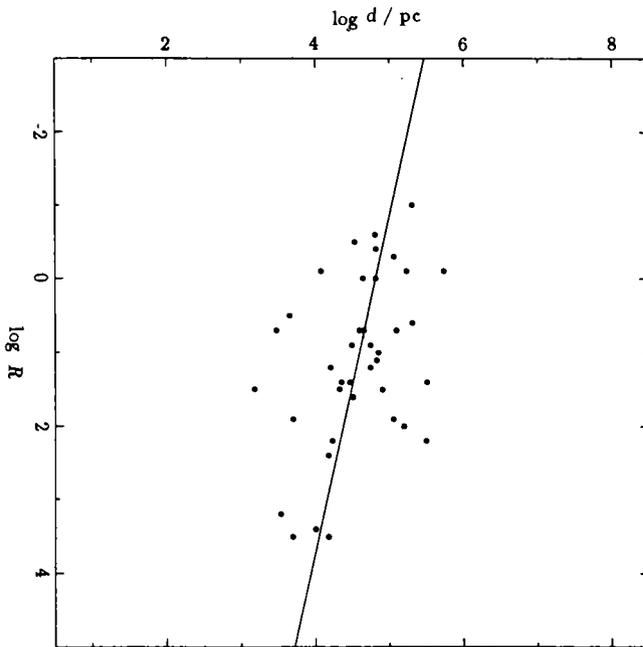


图4 线性投影尺度 d 和 R 的反相关

所示。这个结果和相对论性射束模型以及统一模式所预期的相符合。

4 统一模式在整个电磁波谱上的有效性

对于任何一种统一模式，一个重要的检验是它在整个电磁波谱上的有效性。源的内禀性质不可能相互有异，在一个波段上的预测和观测特性和别的波段不应该相互矛盾。

这方面的工作已不少。有些证据表明，X射线和光学射束发射与Orr和Browne的统一模式相一致^[9]，也有证据表明它们有内在的差别^[22,23]。问题在于气体盘的取向和相对论性射束对于观测的连续谱辐射都有某种影响，需要区分开。

Browne和Murphy^[21]提出了光学和X射线的两成份模型，一个成份是各向同性的，一个成份是相对论性成束的。Zamorani^[24]评述了类星体的X射线性质，并提出X射线辐射有2个成分组成。一个存在于所有类星体中，另一个仅存在于平谱致密类星体中，且可能是自康普顿机制。Malkan和Sargent^[25]和Malkan^[26]评价了波谱的红外—光学—紫外部分。他们同样发现双成分：有一个以幂律谱主导的红外辐射和一个紫外“包”（bump）成分，可能产生于“炽热”的吸积盘。还有一个是存在于核优势类星体中的强偏振成分（blazar）。支持这个代表射束辐射的有Moore和Stockman^[27]，Browne和Wright^[28]，Antonucci和Ulvestad等人^[13]。

Lawrence(1989)^[29]讨论了光学、红外波段关于统一类星体和星系的检验问题。首先

是样本的取向无偏性 (orientation-unbiased)。认为对于取向的统计研究而言, 不能用高频总流量或视光度来选取射电源样本, 因为在射电波段, 只有在低频段才是各向同性发射的, 这种情况下光学薄的等离子体发射占有的空间很大, 不可能有相对论性运动, 不会为尘埃所遮蔽, 比致密的、自吸收的射束发射更占优势。在光学证认或星等方面的选源准则, 也会使样本有偏差, 必须注意。在检验类星体和星系的统一模式方面有三个步骤: 第一是分光偏振测量。若大多数的星系在偏振光中有类星体的宽线和连续谱辐射, 这样光度范围的问题可以解决。目前的问题是没有足够的物质能散射核的辐射, 使之被检测到。遗憾的是, 在 Barthel^[11] 论述的支持统一模式的子样本中的 3CR 星系 ($0.5 < z < 1.0$) 大多数约为 $v = 21\text{mag}$, 即使现在建造中的新分光偏振测量仪也观测不到。第二项检验是测量第二个各向同性的成分, 确定星系和类星体之间有否什么系统的差别。几乎可以肯定, $60\mu\text{m}$ 辐射是第二个各向同性成分的最好选择, 它位于支配类星体能谱的热“包”(bump) 的峰值。可惜 $60\mu\text{m}$ 辐射地面无法观测, 只能改用 $10\mu\text{m}$ 。Lawrence 及其合作者已在 Palomar 测了 50 个 3CR 天体 ($0.5 < z < 1$), 尚未有明确的结果发表, 第三项检验是比较样本中天体的发射线光度和总电离光度。在类星体中, 一旦考虑了介入的吸收系统, 电离光度就明显大于发射线光度, 从而覆盖因子落在其他方法估计的范围内。对于低红移射电源和 Seyfert 星系, 缺乏电离光子的证据不充分。目前得到紫外谱的源很少。准确的答案有待于对高红移星系的电离连续谱观测。

5 讨 论

综上所述, 统一模式的理论是从假说开始, 根据观测事实和理论解释而发展。这使得一度混乱和互相矛盾的 AGN 分类变得明朗起来。AGN 可粗略分成两大类, 当连续谱发射中的热发射占优势时即为射电宁静 AGN, 而非热发射占优势时即为 blazar(包括 BL Lac, OVV, HPQ)。考虑到取向效应时, 所有的 AGN 可由射电宁静 AGN, blazar 和两者的结合所组成。

统一模式理论利用取向效应。所谓取向, 即指观测特征依赖于观测者视线方向。例如, 由于遮蔽圆环面的存在可使观测者看不到核区域。这种效应即使没有相对论性运动也是存在的。相对论性射束效应是取向效应的一个特例, 它导致沿运动方向的观测亮度得到增强。AGN 的观测特征提供了相对论性和非相对论性取向的两方面的证据。Orr 和 Browne^[9] 只是想将核优势射电强类星体和瓣优势类星射电源统一起来。Barthel^[11] 想使这个模式更加完善化, 把射电强类星体和强射电星系统一化。

(1) 在 AGN 这一类天体中, 已有证据表明同时存在着各向异性的发射和各向异性的遮蔽效应。统一模式理论是基于这些证据, 提出假说, 并进行观测的统计检验和理论分析而发展的。目前, 强射电星系是不是类星体的母星族, Seyfert 星系的统一化, 以及 BL Lac 天体是否是 FR II 星系, 都是有兴趣的研究课题。

(2) 统一模式理论要解决的问题是, 尽管 AGN 的观测特征是多种多样的, 但有可能找到它们共同的内在特征, 从而证实它们是同一种天体, 而由于观测取向不同才表现得多样化。尽管人们对 AGN 的中央发动机的物理性质仍停留在粗浅的认识阶段, 但统一

模式描绘出 AGN 较清晰的图像, 相对论性射束模型是统一化的一个关键。统一模式是上述思想的总提法, 但目前尚未有一种统一模式能够包罗所有的可能性。而且, 有些模式之间还有矛盾。因此, 对各种已提出的统一模式要分别地检验和研究。

(3) 大量的文献都集中到研究射电强天体。Scheuer 和 Readhead^[3] 企图把射电强和射电宁静类星体统一起来, 未获成功。Orr 和 Browne^[9] 缩小了范围, 只统一核优势射电强类星体和瓣优势类星射电源。只是由于观测结果的累积, 才有可能在近几年对该模式作适当的统计研究, 以验证它所预测的特征, 但样本数很有关系。Barthel^[11] 利用 3CR 样本建立了强射电星系和射电强类星体的统一, 他认为所有的类星体都是 FR II 射电星系中有喷流的样本。对这些模式做研究的有 Murphy^[30] 和 Kapahi^[31] 等人。Singal^[32,33] 提出了反对 Barthel 的射电星系和类星体的统一模式理论的论据, 因为他用了更大的样本, 其样本数为 669 个, 和 Barthel 的预言相反, 观测的类星体尺度的统计结果不是比射电星系小 (由于投影效应), 而是恰恰相反。这种相反的倾向, 尚无法用目前流行的单纯以取向效应为基础的统一模式来解释。

(4) 统一模式的检验, 利用统计方法, 要在整个电磁波谱上进行, 特别是在光学和射电波段。在射电波段, R 是一个很有用的参数, 为许多研究者所采用, 特别是用于超光速源。光学检验则涉及到分光偏振测量、发射线光度、电离光度等。现在, 统一模式已经使 AGN 的不同类型大为减少, 这是很大进展。但目前的统一模式仍处于比较简单的形式, 有些问题待进一步检验。例如类星体和射电星系是否存在内禀的差别, 是现有的统一模式尚未能排除的^[31], 见文献 [3]。

(5) Cygnus A 能否成为统一模式的直接证据? 大样本统计检验是研究统一模式的基本方法, 但是也存在对个别源直接检验的可能性。本文作者之一^[18] 提出 Cygnus A 的射电观测建议。如果我们能够测出 Cygnus A 的反向喷流, 就可能对取向效应有准确估计, 这是统一模式所需要验证的。

致谢 作者洪晓瑜感谢蒋栋荣老师给予的指导和帮助。

参 考 文 献

- [1] Lawrence A. Publ. Astron. Soc. Pacific, 1987, 99: 309
- [2] Blandford R D, Rees M J. In: Wolf A M ed. Pillshurgh conference on BL Lac objects. Pittsburgh:University of Pittsburgh, 1978. 328
- [3] Scheuer P A G, Readhead A C S. Nature, 1979, 277: 182
- [4] Perley R A et al. A. J., 1980, 85: 649
- [5] Browne I W A et al. M.N.R.A.S., 1982, 198: 673
- [6] Antonucci R R J. In: Kafatos M ed. Supermassive black hose. [s.l.]:[s.n.], 1987. 26
- [7] Murphy D W. PhD. thesis, Manchester: Victoria University of Manchester, 1988
- [8] Blandford R D, Konigl A. Ap.J., 1979, 232: 34
- [9] Orr M J L, Browne I W A. M.N.R.A.S., 1982, 200: 1067
- [10] Browne I W A. In: Maraschi L et al. BL Lac objects. Berlin: Springer-Verlag, 1989. 401
- [11] Barthel P D. Ap. J., 1989, 366: 606

- [12] Schilling G, Henbest N. *New Scientist*, 21 January 1989: 34
- [13] Antonucci R R J, Ulvested J S. *Ap. J.*, 1985, 294: 158
- [14] Wardle J F C, Moore R L, Angel J P R. *Ap. J.*, 1984, 279: 93
- [15] Schilizzi R T, de Bruyn A G. *Nature*, 1983, 303: 26
- [16] de Bruyn A G, Schilizzi R T. In: Swarup G, Kapahi V K eds. *Quasar, Proc. of IAU symp. No.119, Bangalore, 1985, Dordrecht: Reidel, 1986: 203*
- [17] Browne I W A. In: Zensus J A, Pearson T J ed. *Superluminal radio sources. Cambridge: Cambridge University, 1987. 129*
- [18] Hong Xiaoyu. PhD thesis, Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, 1993
- [19] Garrington S T. PhD thesis, Manchester: Victoria University of Manchester, 1988
- [20] Ghisellini G *et al.* *Ap. J.*, 1993, 407: 65
- [21] Browne I W A, Murphy D W. *M.N.R.A.S.*, 1987, 226: 601
- [22] Miller L. In: Fanti R, Kellermann K I, Setti G ed. *VLBI and compact radio sources, Proc. of IAU symp. No.110, Bologna, Italy, 1983, Dordrecht: Reidel, 1984: 189*
- [23] Boroson T A *et al.* *Ap. J.*, 1985, 283: 120
- [24] Zamorani G. In: Fanti R, Kellermann K I, Setti G ed. *VLBI and compact radio sources, Proc. of IAU symp. No.110, Bologna, Italy, 1983, Dordrecht: Reidel, 1984: 85*
- [25] Malkan M A, Sargent W L W. *Ap. J.*, 1982, 254: 22
- [26] Malkan M A. *Ap. J.*, 1984, 287: 555
- [27] Moore R L, Stockman H S. *Ap. J.*, 1984, 279: 465
- [28] Browne I W A, Wright A Z. *M.N.R.A.S.*, 1985, 213: 97
- [29] Lawrence C R. In: Zensus J A, Pearson T J ed. *Parsec-scale radio jets. Cambridge: Cambridge University, 1990. 250*
- [30] Murphy D W. In: Zensus J A, Pearson T J ed. *Parsec-scale radio jets. Cambridge: Cambridge University, 1990. 298*
- [31] Kapahi V K. In: Zensus J A, Pearson T J ed. *Parsec-scale radio jets. Cambridge: Cambridge University, 1990. 304*
- [32] Singal A K. Evidence against the unified scheme for powerful radio galaxies and quasars(to be published in *M.N.R.A.S. Letters*)
- [33] Singal A K. Cosmic evolution and luminosity dependence of the physical sizes of powerful radio galaxies and quasars(to be published in *M.N.R.A.S.*)

(责任编辑 刘金铭)

The Unified Schemes of AGN

Hong Xiaoyu Wan Tongshan

(Shanghai Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

We review the unified schemes of AGNs, which are based on relativistic beaming and obscuration of anisotropic gas surrounding the nucleus. We describe various unified schemes and their progress and outline the methods of statistic tests especially the role of R parameters. Also mentioned are the tests of unified schemes at multiple-wavebands.