

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2017.01.07

射电星系 3C 288 中的尘埃环

胡京馥^{1,2}, 曹新伍¹, 陈 亮¹, 游 贝³

(1. 中国科学院 上海天文台 星系与宇宙学重点实验室, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. Nicolaus Copernicus Astronomical Center, Polish Academy of Sciences, Warsaw 00-716)

摘要: 射电星系根据射电形态可以分为 FR I 和 FR II 两类, 而根据其光学光谱特征可以分为低激发和高激发射电星系。它们在观测上表现出不同, 其原因并不清楚, 部分原因是喷流与周围介质的相互作用导致的, 也可能是因为 FR I 和 FR II 的中央引擎吸积模式不同导致的。为了检验这些源是否存在尘埃环, 用 CLOUDY 程序模拟 3C 288 射电源的光致电离模型, 发现理论得到的电离光度远大于实际观测到的光学核光度, 这说明在 3C 288 中确实存在遮挡效应。为了进一步检验这个结论, 又根据尘埃消光来验证高喷流射电功率星系中的遮挡效应是尘埃环造成的。

关 键 词: 活动星系核; 射电星系; 吸积模式; 尘埃环

中图分类号: P145.2 **文献标识码:** A

1 引 言

活动星系核是一类具有猛烈活动现象或剧烈物理过程的特殊星系。第一个活动星系核由 Carl Seyfert 于 1943 年发现^[1]。他得到了包括 NGC 1068 在内的 6 个有恒星状明亮核心星系的光谱, 光谱中有许多宽发射线, 线宽达几千 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Seyfert 认为这些星系可能是一类特别的星系。

目前, 我们所知道的活动星系核的种类有许多, 包括类星体、赛弗特星系、射电星系、耀变体、低电离发射线核区等。不同类型的活动星系核在观测上表现出不同的活动性, 但是根据活动星系核统一模型的观点, 不同类型的活动星系核之间并没有本质上的物理差别, 它们之间的区别只是由于观测视线与其喷流的夹角不同导致的。如果喷流的方向与视线方向夹角很小或者正对观测者, 那么我们观测到的就是耀变体 (Blazar); 反之, 如果夹角很大, 我们观测到的就是赛弗特星系或者射电星系。在活动星系核统一模型的框架下, 尘埃环是一个关键的基本结构。统一模型理论认为, 正是因为尘埃环的遮挡, 使得内禀性质相同的活动星

收稿日期: 2016-05-10; 修回日期: 2016-05-20

资助项目: 国家自然科学基金 (11233006)

通讯作者: 胡京馥, hujingfu@shao.ac.cn

系核在不同的观测方向表现出不同的观测性质。

射电星系根据形态的不同可以分为 FR I (边缘昏暗型) 和 FR II (边缘明亮型) 两类^[2]。FR II 的射电功率通常高于 FR I: FR I 的功率 P_{178} 小于 5×10^{25} W/Hz, 而 FR II 的功率 P_{178} 要大于 5×10^{25} W/Hz。Chiaberge 等人^[3]对一个 FR I 射电星系样本进行研究, 发现其中央致密核的光学流量与射电核流量成显著的线性相关, 这说明 FR I 射电星系的核光学辐射起源于同步辐射。而 Chiaberge 等人^[4]发现 FR II 射电星系比 FR I 有更明亮的光学核, 其光学核流量与射电核流量之间无明显相关, 这说明吸积盘辐射对 FR II 射电源的核光学辐射有很大贡献。根据统一模型的理论, FR I 射电星系的视角很大, 理论上其中央引擎以及宽发射线应该被一个光学厚的尘埃环遮挡^[5], 但是 Chiaberge 等人^[3]认为观测 3CR 星表中的 FR I 射电源, 大概有 85% 的概率观测到其中心有致密光学核, 这说明 FR I 射电源中不存在尘埃环遮挡。

Ledlow 和 Owen^[6]通过研究寄主星系的光学光度与总的射电光度之间的关系发现, FR I 和 FR II 可以通过这两个量之间的一条线性函数明显区分, 多数 FR II 源的射电光度位于这条分界线之上, 而 FR I 则位于分界线下方的区域, 这说明吸积率可能在 FR I 和 FR II 的分类中扮演重要角色。Ghisellini 和 Celotti^[7]利用光学光度估算射电星系中央黑洞的质量, 并根据射电光度得到其喷流功率, 他们认为喷流功率与黑洞质量的比值可以用来分类 FR I 和 FR II。这说明吸积模式的不同导致了 FR I 与 FR II 的不同。

射电星系的分类问题目前仍是未解之谜, 除了 FR 分类方法, Laing 等人^[8]认为可以根据射电星系的光学光谱特征将其分为低激发射电星系 (LEG) 和高激发射电星系 (HEG): 高激发射电星系具有更大的发射线比 ($[\text{O III}]/\text{H}\alpha > 0.2$) 以及更强的 $[\text{O III}]$ 发射线光度 ($[\text{O III}]$ 发射线的等值宽度 $EW > 3 \text{ \AA}$)。Buttiglione 等人^[9]对这两类高低激发星系的相同点和不同点进行了总结:

1) 所有的宽发射线源都在其光学光谱特征上表现为高激发特征, 而没有一个低激发射电星系中可以探测到宽发射线。

2) 所有的高激发射电星系在射电形态上都表现为 FR II 类型, 但是低激发射电星系中既有 FR I 型也有 FR II 型。

3) 高激发射电星系都有较明亮的射电源 ($\lg L_{178}[10^{-7}\text{J}\cdot\text{s}^{-1}] \geq 32.8$), 而低激发射电星系的射电功率则覆盖比较广的范围 ($30.7 \leq \lg L_{178}[10^{-7}\text{J}\cdot\text{s}^{-1}] \leq 35.4$)。

从这两类射电星系的寄主星系光度分布情况来看, 高激发射电星系和低激发射电星系的黑洞质量没有明显差别。据此我们可以看出, 射电星系的 FR 分类和光学光谱分类 (HEG 和 LEG) 并不是一致的, 不能简单认为高激发射电星系就是 FR II 类型而低激发星系就是 FR I 射电星系。因此, 我们需要对射电星系的物理本质进行全新的研究, 以弄清楚射电星系的不同观测性质是因为其中央引擎吸积模式的不同还是尘埃环的遮挡造成。

Cao 和 Rawlings^[10]选取了 3CR 星表中的 FR I 射电星系作为样本, 并对其光学和射电性质进行研究。他们发现, 如果 FR I 射电源的吸积模式是径流主导吸积模式 (ADAFs) 或绝热内流外流模式 (ADIOS), 那么对于其中大部分源的高射电光度无法用 Blandford-Znajek (BZ)

机制来解释^[11]。因此, 他们认为, 至少这些 FR I 射电源的吸积盘是标准吸积盘而非 ADAFs, 并且这些源的光学核被尘埃环遮挡了。这个结论可以很好地解释射电光度与窄发射线光度之间的线性关系, 以及在 FR I 射电星系 3C 386 中观测到的宽发射线。本文的目的就是验证 FR I 射电星系中是否存在尘埃环遮挡。为此, 我们选取了射电星系 3C 288 作为研究对象。

本文第二章介绍光致电离模型的计算结果与分析, 以及利用 [O III] 发射线的等值宽度验证射电星系 3C 288 中存在的遮挡问题; 第三章用尘埃吸收的方法检验 3C 288 源的遮挡是否来自尘埃环; 第四章是总结。

2 光致电离模型计算

普遍认为, 活动星系核 (AGN) 的发射线是通过光致电离过程产生的: 原子被入射的高频光子电离, 电离原子又与自由电子相结合, 在结合的过程中, 电子从高能态跃迁到低能态而产生谱线光子。光致电离模型的基本条件是必须有能使原子电离的电离辐射源, 在活动星系核中, 电离辐射源就是其中心能源引擎。利用光致电离模型可以计算中心能源照射到窄线区后的出射光谱。当然, 计算出射光谱是一个非常复杂的过程, 但是有些天文学家开发了专门计算光致电离模型的程序, 如 Gary Ferland 提供的 CLOUDY 程序^[12]。

Cao 和 Rawlings^[10]选取了 3CR 星表中的 33 个 FR I 射电星系, 并利用寄主星系 R 波段的绝对星等来估算这些源的黑洞质量:

$$\lg(M_{\text{bh}}/M_{\odot}) = (-0.50 \pm 0.02)M_{\text{R}} - (2.96 \pm 0.48) . \quad (1)$$

而对于喷流功率 Q_{jet} , 则是根据 151 MHz 处的射电光度估算^[13]:

$$Q_{\text{jet}} \simeq 3 \times 10^{38} f^{3/2} L_{151}^{6/7} \text{ W} , \quad (2)$$

其中 L_{151} 是 151 MHz 处的总射电光度, 单位是 $10^{28} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。对于一个吸积模式是径移主导 (ADAFs) 的活动星系核, 可以根据其黑洞质量 M_{bh} 和自旋 a 估算得到最大喷流功率 (见文献 [10] 中图 1)。从该图可以看出, 大约有一分之二样本源 (13 个) 的实际喷流功率大于理论计算出的最大喷流功率。这个结论说明, 如果产生喷流的机制是 Blandford-Znajek 机制^[11], 那么这些源无法产生这么高的喷流功率。对此, 他们认为合理的解释是这些源的吸积盘不是径移主导吸积模式, 而是吸积率比 ADAF 高的标准薄盘, 这样在黑洞质量和自旋不变的情况下, Blandford-Znajek 机制可以解释这些源的高喷流功率。但新的问题是, 如果这些高喷流功率的 FR I 射电源具有标准吸积盘, 为什么哈勃空间望远镜 (HST) 观测到这些源的光学核很弱, 甚至没有? Cao 和 Rawlings^[10]认为, 是由于这些 FR I 高喷流功率射电源的吸积盘辐射被尘埃环遮挡了, 而来自大尺度喷流的同步射电与光学辐射仍然可以被探测到。

为了验证 Cao 和 Rawlings^[10]的结论, 即这些高喷流功率的 FRI 射电源是否真的有尘埃环遮挡效应, 我们选取了其中一个高喷流功率 FR I 射电源 3C 288 作为研究对象。

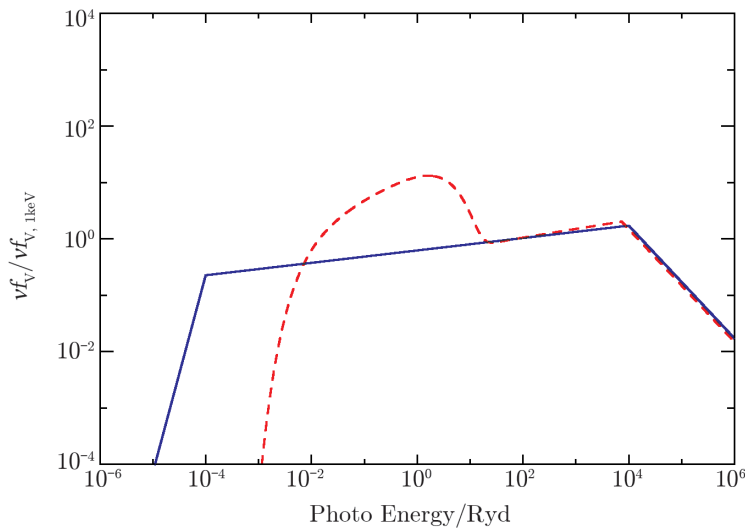
3C 288 射电星系是一个星等 $m_{\text{v}} = 18.3 \text{ mag}$ 的椭圆星系^[14], 其红移 $z = 0.246$ 。3C 288 的 FR 分类其实不是很明确, 根据其喷流的形态, 3C 288 应该处于 FR I/FR II 的临界状

态^[2]：一边是 FR I 型喷流，另一边则是 FR II 型射电瓣。3C 288 在 1.5 GHz 处的光度为 $2.5 \times 10^{31} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ，在 0.75~5.0 GHz 之间的谱指数为 -0.97 (即 $F_\nu \propto \nu^{-\alpha}$)^[15]。根据射电功率，3C 288 应该属于 FR II 射电星系；但是根据观测特征，特别是边缘昏暗型的射电瓣，它又有 FR I 的射电特征。

Buttiglione 等人^[16]已经测得 3C 288 射电源的 [O III] 发射线光度 $L_{[\text{O III}]} = 10^{33.65} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ ，光学核光度为 $L_{\text{c.opt}} = 10^{31.31} \text{ W}/\text{\AA}$ ，即有效波长 6910.33 Å 处的光度为 $10^{35.14} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[10]。为了验证尘埃环的存在，我们利用程序 CLOUDY version 10.00^[12] 对其进行了光致电离模型计算，根据观测到 [O III] 发射线的光度 (因为 [O III] 发射线是由窄线区产生的，其流量不受尘埃环的影响) 得到中心能源理论上的连续谱光度，并与实际观测到的核光学光度值进行比较。

在我们的 CLOUDY 模型计算中需要输入的参数如下。

(1) 入射的连续谱强度以及谱形。由于不同活动星系核的 SED 谱形有很大的差别，在计算发射线光谱时，一般采取某样本的平均光谱。对于 3C 288 射电源，我们选取了两种极端的典型 SED 谱形：具有明显大蓝包 (Big Blue Bump, BBB) 的典型 SED 和没有大蓝包的 SED^[17]，第一种模拟了标准吸积盘的能谱，而第二种则是典型 ADAF 盘的 SED (见图 1)。



注：实线为典型没有大蓝包的 SED，虚线为典型带有大蓝包的 SED。

图 1 CLOUDY 光致电离模型计算中使用的两种 SED 谱形

(2) 气体的密度。窄线区的氢密度范围是 $n_{\text{H}} = 10^2 \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ^[18]。对于射电源 3C 288，我们选取 $n_{\text{H}} = 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 作为其模型输入参数。

(3) 气体的化学组成。准确测定窄线区气体的化学组成是非常困难的，理论计算时一般取两倍的太阳丰度。

(4) 气体的几何模型。解辐射转移方程时，其逃逸概率与窄线云的几何形状有关，在理

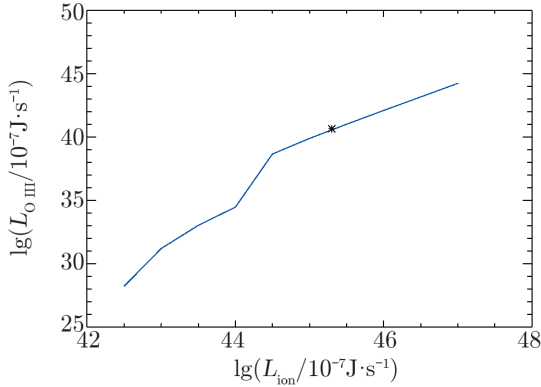
论计算时, 一般选择板块模型而非球形。

(5) 气体云的厚度。可以根据气体云的内半径和柱密度计算。在 3C 288 的模型计算中我们假设窄线区的柱密度最大值是 $N_{\text{H}} = 10^{21} \text{ cm}^{-2}$, 窄线区云块的典型柱密度并不是很明确, 只是知道小于宽线区的柱密度 $N_{\text{H}} = 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ^[19]。Liu 等人^[20]得到了窄线区的尺度与 [O III] 发射线的光度之间的关系式如下:

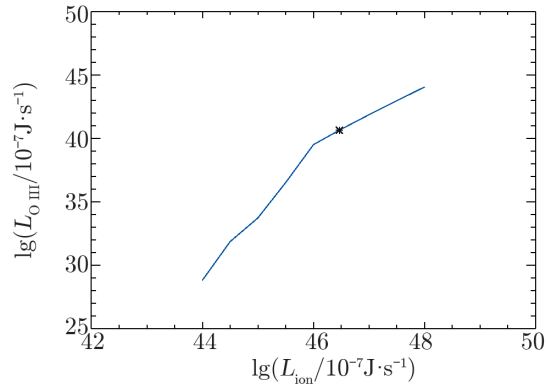
$$\lg(R_{\text{int}}/\text{pc}) = (0.250 + 0.018) \lg(L_{[\text{O III}]}/10^{35} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}) + (3.746 + 0.028) . \quad (3)$$

我们将此窄线区尺度随光度的变化关系运用到我们的模型计算中。

除了上述模型参数, 还需要输入中心电离源的入射谱电离光度。为了得到与观测相一致的 [O III] 发射线光度, 在输入一系列电离光度后, 得到了模型计算中中心电离源光度 L_{ion} 与 [O III] 光度 $L_{[\text{O III}]}$ 之间的关系 (见图 2 和图 3), 发现电离源的光度分别为 $L_{\text{ion}} = 10^{38.3} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ (有明显大蓝包的 SED 模型) 和 $L_{\text{ion}} = 10^{39.47} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ (没有大蓝包的 SED 模型) 时, 可以得到与观测相一致的 [O III] 发射线光度。两种 SED 模型在 6910.33 \AA 处的核光学光度分别为 $L_{\text{c}} = 10^{36.65} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $L_{\text{c}} = 10^{38.28} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$, 都明显高于实际观测到的 3C 288 核光学光度 $L_{\text{c}} = 10^{35.14} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ 。



注: 星号代表 3C 288 源的位置。



注: 星号代表 3C 288 源的位置。

图 2 有大蓝包的 SED 模型的 $L_{\text{ion}} - L_{[\text{O III}]}$ 关系 图 3 没大蓝包的 SED 模型的 $L_{\text{ion}} - L_{[\text{O III}]}$ 关系

考虑上述理论计算得到的核光学光度大于实际观测到的核光度, 我们认为 3C 288 射电源中存在遮挡效应, 遮挡物质可能是尘埃环, 因为尘埃环的存在遮挡了其中心源的辐射, 才导致实际观测到的核光度偏小。这一模型结果初步验证了 Cao 和 Rawlings^[10]的假说: 高喷流功率的 FR I 射电源中存在尘埃环遮挡效应。

3 尘埃消光

对于 3C 288 射电星系中是否存在尘埃环这个问题, 除了用 CLOUDY 光致电离模型计算来验证, 我们认为还可以根据消光关系来验证。天文学家在之前已经观测到, 在氢的柱密度

(N_{H}) 和光学消光值 (A_{V}) 之间存在线性关系, Güver 和 Özel^[21] 得到:

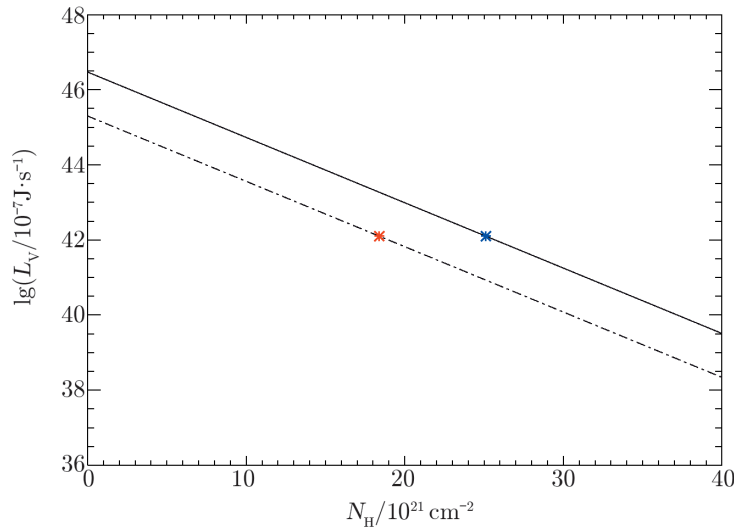
$$N_{\text{H}}(\text{cm}^{-2}) = (2.21 \pm 0.09) \times 10^{21} A_{\text{V}} , \quad (4)$$

其中光学消光值 A_{V} 的定义是 $A_{\text{V}} = -2.5 \lg(f_{\text{V}}/f_0) = -2.5 \lg(L_{\text{V}}/L_0)$ 。据此, 我们可以得到经过吸收后的光度 L_{V} 与氢的柱密度 N_{H} 之间的线性关系 (见图 4):

$$\lg L_{\text{V}} = -0.181 N_{\text{H}} \times 10^{-21} + \lg L_0 , \quad (5)$$

其中 L_0 是未经消光时的内禀光度。根据 3C 288 的 CLOUDY 光致电离模型计算, 对于一个中心黑洞质量 M_{bh} 约为 $10^9 M_{\odot}$ 的活动星系核, 我们取内禀 V 波段光度为 $\lg L_0 = 45.3$ (有大蓝包) 和 $\lg L_0 = 46.47$ (没有大蓝包) 两种情况。

根据公式 (5) 得到吸收后光度与氢柱密度之间的线性关系 (见图 4), 之后即可根据实际观测到的光学核光度计算氢的柱密度, 并与典型的尘埃环柱密度 $N_{\text{H}} \approx 10^{22} \sim 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ 相比较^[22]。



注: 虚线为带有大蓝包的 SED 模型结果, 实线为没有大蓝包的 SED 模型结果, 星号表征 3C 288。

图 4 吸收后的光度与氢柱密度之间的线性关系 $L_{\text{V}} - N_{\text{H}}$

对于 3C 288 射电源, 我们已有其实际观测到的光学核光度和理论上未经消光的内禀光度, 再根据吸收后光度与氢柱密度之间的线性关系式, 我们可以得到两种 SED 模型的消光柱密度 $N_{\text{H}} = 10^{22.3} \text{ cm}^{-2}$ 和 $N_{\text{H}} = 10^{22.4} \text{ cm}^{-2}$, 这与典型的活动星系核尘埃环柱密度相符合。

4 总 结

射电星系的分类问题目前仍是未解之谜, 天文学家们对其的分类方法有多种。目前, 最常见的是 Fanaroff 和 Riley^[2] 提出的根据射电形态以及射电强度将射电星系分为 FR I 和 FR II

两类。除了 FR 分类方法, Laing 等人^[8]认为可以根据射电星系的光学光谱特征将其分为低激发射电星系 (LEG) 和高激发射电星系 (HEG)。射电星系的 FR 分类和光学光谱分类 (HEG 和 LEG) 并不一致, 不能简单认为高激发射电星系就是 FR II 类型, 而低激发射电星系就是 FR I 射电星系。因此, 我们需要对射电星系的物理本质进行全新的研究, 以弄清楚射电星系的不同观测性质是因为其中央引擎吸积模式的不同还是因为尘埃环的遮挡造成。有的研究认为是吸积模型的不同导致 FR I 和 FR II 的观测特征不同, 即 FR I 射电源是 ADAF 吸积而 FR II 是标准薄盘^[7]; 有的则认为 FR I 的吸积模式也是标准薄盘, 之所以和 FR II 有不同的观测特征是因为存在尘埃环结构, 因为观测方向的原因, 宽线区以及中心电离源的辐射被尘埃环遮挡了^[10]。Cao 和 Rawlings^[10]提出, 至少在部分高喷流功率的 FR I 射电源中存在尘埃环遮挡效应, 因为 ADAF 吸积模型在 B-Z 机制下形成不了功率如此高的喷流。为了验证这一假说, 我们选取其中一个高喷流功率射电源 3C 288 作为研究对象, 利用 CLOUDY 模拟其中心电离源光致电离辐射的情形, 结果发现在这个源中确实存在遮挡效应, 并通过尘埃消光计算遮挡物质的柱密度: $N_{\text{H}} = 10^{22.3} \text{ cm}^{-2}$ 和 $N_{\text{H}} = 10^{22.4} \text{ cm}^{-2}$, 这与尘埃环的典型柱密度是相一致的。因此, 我们认为 3C 288 源中确实存在尘埃环。

参考文献:

- [1] Seyfert C K. ApJ, 1943, 97: 28
- [2] Fanaroff B L, Riley J M. MNRAS, 1974, 167: 31
- [3] Chiaberge M, Capetti A, Celotti A. A&A, 1999, 349: 77
- [4] Chiaberge M, Capetti A, Celotti A. A&A, 2002, 394: 791
- [5] Urry C M, Padovani P. PASP, 1995, 107: 803
- [6] Ledlow M J, Owen F N. AJ, 1996, 112: 9
- [7] Ghisellini G, Celotti A. A&A, 2001, 379: L1
- [8] Laing R A, Jenkins C R, Wall J V, et al. ASP Conference Series, 1994, 54: 201
- [9] Buttiglione S, Capetti A, Celotti A, et al. A&A, 2010, 509: 6
- [10] Cao X, Rawlings S. MNRAS, 2004, 349: 1419
- [11] Blandford R D, Znajek R L. MNRAS, 1977, 179: 433
- [12] Ferland G J, et al. PASP, 1998, 110: 761
- [13] Willott C J, et al. MNRAS, 1999, 309: 1017
- [14] Goodson R E, Palimaka J J, Bridle A H. AJ, 1979, 84: 1111
- [15] Laing R A, Peacock J A. MNRAS, 1980, 190: 903
- [16] Buttiglione S, Capetti A, Celotti A, et al. A&A, 2009, 495: 1033
- [17] Kawakatu N, Nagao T, Woo J H. ApJ, 2009, 693: 1686
- [18] Nagao T, Murayama T, Taniguchi Y. ApJ, 2001, 546: 744
- [19] Netzer H. ARA&A, 2015, 53: 365
- [20] Liu G, Zakamska N L, Greene J E, et al. MNRAS, 2013, 430: 2327
- [21] Güver T, Özel F. MNRAS, 2009, 400: 2050
- [22] Elitzur M, Shlosman I. ApJ, 2006, 648: 101

The AGN-obscuring Torus in Radio Galaxy 3C 288

HU Jing-fu^{1,2}, CAO Xin-wu¹, CHEN Liang¹, YOU Bei³

(1. Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Nicolaus Copernicus Astronomical Center, Polish Academy of Sciences, Warsaw 00-716, Poland)

Abstract: Radio galaxies are classified as FR I or FR II sources according to their radio morphology, but separated into high excitation galaxies (HEG) and low excitation galaxies (LEG) according to their spectroscopic properties. So far the origin of FR I/FR II classification is not clear. There are different interpretations for the FR dichotomy, such as, the interaction of the jet with the ambient medium or the intrinsic nuclei properties of accretion. Cao and Rawlings (2004) analyzed the optical and radio properties of a sample of 3CR FR I radio galaxies and found that the jet power for more than one-third of the sources in the sample is greater than the maximal jet power extracted from a rapid spinning black hole with ADAF accretion disk. They argued that a significant fraction, at least for the high-jet-power sources, of 3CR FR I radio galaxies have standard thin discs, but their optical core and broad line regions can be hidden by torus. In order to examine the existence of torus in the high-jet power sources, we carry out photoionization model calculations for the radio galaxy 3C 288 using CLOUDY. We find that the theoretical ionizing luminosity is more than the observed optical core luminosity, as well as the [O III] luminosity. We conclude that there is indeed obscuring torus in 3C 288.

Key words: AGN; radio galaxies; accretion mode; torus