

文章编号: 1000-8349(2009)04-0358-15



耀变体光学波段的微光变及能谱变化

潘凯琳, 付建宁

(北京师范大学 天文系, 北京 100875)

摘要: 耀变体在多个波段的微光变和能谱变化多年来是中外天文观测研究的热点课题。耀变体的微光变于 20 世纪 60 年代被发现, 20 世纪 80 年代以来发现很多源的微光变具有不同的特性, 目前对其物理机制的认识和理论、模型的研究还处于发展阶段。该文总结了 7 个目前观测最多的耀变体 (3C 66A, 3C 279, 3C 454.3, AO 0235+164, BL Lac, OJ 287, S5 0716+714) 在光学波段的微光变和能谱变化的观测历史和最新进展, 并对其理论模型作了简单介绍。

关键词: 活动星系; 耀变体; BL Lac

中图分类号: P157.6 **文献标识码:** A

1 引 言

耀变体 (blazar) 是活动星系核的一种特殊的次型, 其最大的特征是大幅度 and 快速的光变。一般认为其光变是在面向观测者的相对论性喷流里产生。耀变体的连续谱辐射非常平滑, 而且从射电到紫外波段在高频段慢慢变陡^[1]。其能谱很宽, 呈现两个峰值, 第一个峰位于红外至 X 射线波段, 第二个峰在伽玛射线能区。由于其射电至光学波段的高偏振, 其低频的辐射成分可以肯定是同步加速辐射, 高频则主要由逆康普顿散射引起。引起逆康普顿散射的, 可能是来自同步加速辐射的高能电子和光子碰撞 (同步自康普顿模型), 也可能来自喷流外部的高能电子 (外康普顿模型)。耀变体另一特征是其辐射的高度偏振性, 而且其偏振度及位置角度也是可变的。此外, 在几乎所有的耀变体中发现超光速运动现象。耀变体射电核心是半透明的, 所以射电观测通常不能探测到最接近中央部分的喷流。一般来说, 同步辐射的连续谱在亚毫米或者更短的波段变得光学薄^[2]。根据光谱中发射线的有无, 耀变体可分为平谱射电类星

收稿日期: 2008-10-15; **修回日期:** 2009-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10673001、10778601、10878007); 教育部新世纪优秀人才支持计划; 教育部留学回国人员科研启动基金资助

体及蝎虎座 BL 天体。前者有明显的发射线, 后者没有或者只有微弱的发射线。Padovani 和 Giommi^[3] 把蝎虎座 BL 天体分为高能峰值及低能峰值两种: 如果 a_{rx} (由 5 GHz~1 keV) 小于 0.75 则属于前者, 大于 0.75 则属于后者。平谱射电类星体的能谱分布大致跟低能峰值蝎虎座 BL 天体一致。由于具有极端的物理特性, 耀变体成为许多天文学家在多个波段的观测研究对象^[4]。

获取耀变体的光变时标一直是对这类天体进行观测的主要目标之一。知道了其光变时标, 就可以对天体的质量、半径及其他参数作出限制, 还可以用来探索物质转换成辐射能的效率及计算辐射区域的大小。从而可以对活动星系核本质的研究提供宝贵数据, 对理论模型作出限制^[5]。

耀变体的微光变性质是近年的研究热点。微光变覆盖整个电磁波段。其在光学波段部分也称为晚内光变 (intra-night optical variability, INOV), 是指其光变时标尺度在一晚之内, 由几 min 至几 h 不等。由于比起长期变化, 微光变的变幅较小 (大约 10%~20%), 因而称为微光变。通过对微光变的探讨开辟了对耀变体的研究的新途径, 能探索天体最内层的核结构, 尺度可小至微角秒^[6], 并能对源的大小及物理环境加以更多的限制。这方面的研究已经有一些有意义的结果^[7-11]。从文献数据中进行分析, 可以知道微光变的出现可以是: (1) 独立事件 (突然光度增加或减少); (2) 较长时标光变的一部分 (光度逐渐减弱或增加); (3) 叠加在较长光变上的独立事件。此外, 观测还发现微光变的变幅通常在大爆发期间较大^[12-14]。

Matthews 和 Sandage^[15] 在 20 世纪 60 年代初期最早发现了活动星系核的快速亮度变化。他们发现 3C 48 在 15 min 内变化了 0.04 mag(V 波段)。但该发现及随后的一些研究结果并没有得到认真看待, 因为这些变化被认为可能是由仪器误差所引起的。但是, 后来的 CCD 观测表明快速光变正是活动星系核的一种特性, 对于耀变体而言尤其如此。Heidt 和 Wagner^[16] 从完整的蝎虎座 BL 天体的观测样本^[17] 中, 发现其中有 80% 显示微光变。表明微光变是蝎虎座 BL 天体的一种特性。20 世纪 80 年代以后微光变已被广泛观测到^[18,7]。虽然微光变已经发现了几十年, 但其产生的原因至今还不清楚, 很多学者对此提出了不同的模型试图进行解释。有人认为微光变可能是由耀变体的最内部, 靠近位于天体核内的中央超大质量黑洞产生的^[18-20], 也有人认为可能是因为相对论激波和非均匀分布喷流的相互作用而在耀变体的喷流内产生的^[21-24]。另外还有其他的模型, 如考虑吸积盘的不稳定性及扰动^[25,26] 也可以解释部分微光变的现象; 激波内磁场受到压缩, 也可能导致局部发射率发生变化, 从而引起光变^[24,27]。虽然对于微光变的起因有很多不同解释, 要得到正确的解释, 还需要进行大量的观测, 以了解其辐射机制及辐射区域的结构。

探讨不同波段的相关性及时延是研究耀变体光变的重要手段之一, 它们可以用来限制辐射机制的可能范围。根据标准活动星系核吸积盘模型, 如果一个波段的连续谱流量是来自另一个波段经过再处理的连续谱辐射, 时延就会产生, 可以直接通过辐射或者间接通过等离子体的粘滞过程显示出来。因此, 连续谱和光变曲线的时延可以确定宽线系的大小^[28]。分析时延也可以用来研究活动星系核的几何、运动学及内部结构。研究射电及光学波段辐射相关性尤其重要, 因为两者皆由等离子体喷流内的相对论性电子的同步加速辐射产生。已有不少研究与此相关, 但是得到的结果不大一致。在短时标, 射电及光学波段有时候看似相关^[29-31]。在长时标, 可以找到两个波段的相关性, 同时也发现不同波段间有时延, 其中高频先发生光变

然后是低频^[32-34]。

耀变体在伽玛波段有很强发射,其光变有长期也有短期的,很多时候伴随着能谱变化^[35-39]。能谱的变化表明发射机制与不同波段的变化有密切关系。分析耀变体的能谱变化,可以对这些变化的物理过程加以限制。国内外已有不少针对较大样本耀变体的统计和比较研究。Gu 等人^[40]对 8 个耀变体进行了光学波段观测,当中 3 个为平谱射电类星体,其余为低频峰值蝎虎座 BL 天体。3 个平谱射电类星体当中有两个呈现越亮越红,而所有蝎虎座 BL 天体都越亮越蓝。D'Amicis 等人^[41]观测了 8 个蝎虎座 BL 天体,其中 4 个明显越蓝越亮,其余的没有明显颜色-亮度关系。Vagnetti 等人^[42]对 8 个蝎虎座 BL 天体作出 *BVRI* 波段 5 a 监测,全部显示越亮越蓝。总而言之,光谱型变化的观测结果可分为三种情况:(1)源随着光度增加而变蓝;(2)源随着光度增加而变红;(3)能谱不随光度增加而改变。对应于第一种情况,多为蝎虎座 BL 天体^[41,43],第二种情况一般为平谱射电类星体^[43],第三种则两者皆有^[44]。除了统计能谱变化外,Xie 等人^[45]在 1998—1999 年间针对 13 个 GeV 耀变体进行了光学波段观测,发现典型光学波段的光变时标大大长于 1 h。而伽玛波段的光变时标一般为几 h 至几 d。这暗示与光学波段发射比较,伽玛射线的发射产生于喷流离中心核区域更远的地方。Cheng 等人^[46]分析了 61 个伽玛耀变体的多波段数据,发现光学波段流量跟 X 射线及 *K* 波段的流量无论在源处于高能还是低能状态时都有很强的正相关。而伽玛波段跟光学波段的流量则可能有负相关。这可能是从红外波段到 X 射线波段的辐射由相同的光子经过同步加速辐射产生,而伽玛射线辐射很有可能由逆康普顿散射产生,其构成辐射的光子来自外部光子而不是同步加速辐射所产生的光子。另外,Fiorucci 等人^[47]分析了 37 个耀变体 10 a 光学波段类的同时观测 (*BVR_cI_c*) 数据,发现低能峰值蝎虎座 BL 天体谱指数约为 1.5,符合同步自康普顿模型。对于高能峰值蝎虎座 BL 天体及平谱射电类星体,谱指数并无确定的值,高能峰值蝎虎座 BL 天体的谱指数从 0.5~2.0 分布。这类天体及平谱射电类星体光学波段辐射很有可能被别的成分污染。同样,Hu 等人^[48]利用不同的数据,分析了 17 个耀变体在 19 a 的光学波段观测数据,得到同样的结论,低能峰值蝎虎座 BL 天体谱指数也是约为 1.5。而高能峰值蝎虎座 BL 天体及平谱射电类星体的能谱则被其他发射成分歪曲。

耀变体的光变可以由外在或内在原因引起。外在原因包括星际闪烁^[49,50],微引力透镜^[51,52],或者几何效应。由于这些外在原因都不能引起能谱的变化,一般认为是内在原因引起耀变体的光变。最主流模型为 shock-in-jet 模型。根据此模型,扭曲的带有磁湍流等离子体的相对论性喷流由中心黑洞喷出,如果喷流获取的能量有波动,就会产生沿着喷流传播的激波。当激波遇到粒子密度或磁场密度过高的区域时,光学波段的同步加速辐射就会加强。其变幅和光变时标取决于湍流的功率谱和激波的厚度。此模型能预言能谱随光度的变化。下文具体对 7 个目前观测最多的耀变体光学波段的微光变和能谱变化进行综述。

2 耀变体的微光变及能谱变化

2.1 3C 279

3C 279(平谱射电类星体)($z = 0.538$) 是一个很有代表性的耀变体。它是第一个被发现具有超

光速现象的类星体^[53,54]和第一个被康普顿伽玛射线天文台上的高能伽玛射线实验望远镜发现有伽玛波段辐射的源^[55],也是全天最亮的伽玛射线源之一^[56,57]。它在全波段都有光变,所以成为一些多波段观测计划的目标^[58-60]。光学波段光变方面,3C 279以不同时标显示出很大变化,由数年至1天以下不等。Hartman等人^[61]发现光学波段、X射线和伽玛射线活动有正相关,但是在不同波段间没找到一致的时延。在光学波段,Bottcher等人^[62]发现随着频率的增加,时延也增加,B波段比R波段落后达3d。这么大的时延可能是由于电子加速能谱的逐渐变硬而引起的。

总体来说,3C 279的微光变并不常见。当源处于活跃状态时,短时标光变较多。Miller和Noble^[63]在1989年观测发现源在3h内星等改变了0.15mag(V波段)。1996年5月,源处于活跃状态,多个波段显示了时标为1h的变幅。观测期内的光变曲线大致由快速、尖锐的爆发产生。1996年5月22日,观测发现重要大幅度快速光变,源在40min内V波段改变1.17mag^[10]。2001—2002年的爆发期间,B波段光度在5min以内上升0.57mag,然后在34min内下降0.7mag^[20,64]。Kartalpepe和Balonek^[65]也在此爆发期间观测到短时标变化,最极端的为0.1mag/h(R波段)。

能谱变化方面,长期观测显示光谱硬度和光度没有明显关系。但是,通过短期光变观测,发现光度下降伴随着光谱变硬($B-R$ 指数减少)及光度增加伴随光谱变软^[66]。

2.2 3C 454.3

3C 454.3($z = 0.859$)是一个平谱射电类星体,也是GeV伽玛射线源,是被康普顿成像望远镜发现的少数耀变体之一^[67]。分析历史观测资料,Villata等人^[68]发现其在射电及光学波段的表现很不同,2001年以前,其光度在光学波段只有中等大小变幅,而射电波段已经经历过显著及持续的大爆发。自此之后,光变在光学波段增加而在射电波段减弱。这表示其光学及射电波段的辐射来自两个不同区域。其后在2005年的观测,Villata等人^[69]发现射电波段及光学波段有明显时延,时间长至100多天。理论认为该时延是由于不均匀喷流内的扰动而产生的。

与本文中提及的其余6个耀变体相比,3C 454.3的微光变较少,光变时标以d为单位居多。Webb等人^[70]对源在1971至1985年B波段的观测数据进行了分析,发现它于1979年曾有爆发,当时B波段在63d内变化1.28mag。1986年11月—1987年1月期间,发现在R波段有快速光变,在2.6h内变幅达到0.27mag,而且在整个电磁波段里该源都有微光变^[7,71]。Villata等人^[68]研究过该源长期光学及射电波段光变曲线(1966—2005年),他们在进行多波段观测的WEBT(Whole Earth Blazar Telescope)计划时,发现在2004—2005年该源发生了前所未有的爆发,爆发持续了1a,于2005年春天结束。爆发期间R星等最高达12mag,是到目前为止观测到最亮的类星体状态。源在2007年夏天及秋天处于活跃阶段,当时快速光变很多,最显著的是在2007年12月12日,源在1.5h内于R波段增亮了1.1mag^[72]。

跟一般平谱射电类星体一样,3C 454.3在多次观测中显示越亮越红。分析 $V-I$ 色指数跟R波段的关系,Gu等人^[40]发现色指数越大时星等也越亮。Villata等人^[68]进行的2004—2005年WEBT多站联测也观测到以上情况。由于3C 454.3也是1颗类星体,这个现象可以理解成吸积盘的热发射作出的贡献。当喷流发射弱时,主要影响光学波段的较蓝区域。

换言之,光学波段包含两个成分:一个可变的成分来自喷流,另一个不一定可变的成分来自吸积盘。当喷流变亮时,其较红光谱为主导,反之亦然。但是,他们也发现 $B-R$ 趋势好像有“饱和”现象。爆发期间,当源很亮时 ($R \leq 14$ mag),越亮越红的趋势不见了。这很有可能是因为这时候非热喷流发射为主导,产生了常见的越亮越蓝情形,把越亮越红的趋势中和了。

2.3 3C 66A

蝎虎座 BL 天体 3C 66A ($z = 0.444$) 是第一个被发现在 UV 波段有同步加速辐射峰值可能的 TeV 伽玛射线源^[73]。它在偏振方面的变化幅度很大,是一个很活跃的天体,在长期及短期观测都有明显光变。Fan 和 Lin^[74] 分析了其历史上的光变曲线,发现其最大光变幅度 $\Delta V = 2.75$ mag。Bottcher 等人^[75] 在 2007—2008 年的观测,发现其在各个光学波段之间 ($UBVRI$) 并没有时延。

微光变方面, Xie 等人^[10,76-78] 对它进行过多次观测,均发现存在微光变。1985 年春天,源在 43 min 内下降 0.46 mag 并在 63 min 内增亮 0.45 mag (R 波段)。类似结果在后来的观测中也被发现。1988 年年底,观测发现 B 波段的星等在 27 min 内变暗 0.45 mag, 在 56 min 内增亮 0.48 mag。1989 年 11 月,它在 10 min 内 B 波段下降 0.52 mag。1996 年 10 月,观测发现 87 min 内 V 波段亮度下降 0.5 mag。

Sagar 等人^[79] 在 1998—2000 年的观测期间,也多次发现了 3C 66A 的微光变,其变幅为 2%~8% (R 波段)。Dai 等人^[80] 在 2000—2001 年也研究过 3C 66A 的微光变,发现其光变时标分别为 42 min 和 38 min, $\Delta B = 0.52$ mag 及 $\Delta V = 0.5$ mag。Ghosh 等人^[81] 及 Bottcher 等人^[82] 分别在 1997 年年底和 2003—2004 年在 B 波段及 R 波段发现该源的微光变。

对于能谱和光度的关系,观测显示在一般情况下该源越亮越蓝。Ghosh 等人^[83] 分析了 1997 年底 V 、 R 波段的观测数据,发现当源的亮度降低时, $V-R$ 色指数变红,显示色指数跟 R 星等有正相关,跟 Vagnetti 等人^[84] 在 1995—1999 年的观测结果相符。Vagnetti 等人^[84] 根据较少的数据,发现当该源在 B 波段变强时色指数变蓝,而此关系独立于真正的流量值,同样 Gu 等人^[40] 发现色指数跟 R 星等有正相关。然而, Bottcher 等人^[82] 观测到不同的结果。他们发现源的能谱和光度没有明显关系。当流量低时 ($R > 14$ mag),有不太明显的趋势显示越亮越蓝。但当流量变高时,能谱跟光度就没有明显关系,原因可能是 B/R 的比值只是在个别爆发时才达到峰值。

2.4 BL Lac

BL Lac 是蝎虎座 BL 天体的原型,在 1929 年被 Hoffmeister 发现,当时观测到它在一周内流量变化超过 50% 而把它归类成短周期变星。它在光学波段有超过一世纪的观测历史。在长达几百 d 的连续观测中,源在光学波段变化非常不规则。但是,在 B 波段可能存在大大长于 14 a 的周期^[85]。根据 Shen 和 Usher^[86] 对 BL Lac 的历史上的光变曲线的分析及 Webb 等人^[70] 的长期观测结果, BL Lac 在 B 波段光变范围为 12.4~17.2 mag。Villata 等人^[87] 在 1994—2003 年数据中发现了其在高频射电波段和光学波段的光变有较强的相关性,射电波段的时延约为 100 d。这现象表示引起光学波段爆发的机制同时也会影响低能波段的流量,暗示在有时延的射电波段的光变在频率越低时就越不明显。对于光学波段时延, Hu 等人^[88] 发现 e 跟 m 波段有可能有 11.6 min 的时延,这跟 Papadakis 等人^[89] 的结果很符合。Papadakis 等人在 2001 年 7 月 5 日的观测,发现 B 跟 I 波段有 0.23 h 的时延。

这两个结果比 Stalin 等人^[90] 分析 V 跟 R 波段的时延长了 3 min。但是必须注意到后者分析的波段跟前面两者都不一样。

BL Lac 的微光变及能谱变化一直是研究热点。尽管 0.1 mag/h(V 波段) 的快速变化^[91] 早被发现, 但直到 CCD 及多通道光度计出现, 其微光变才被决定性地证实^[18]。早在 1969 年, Racine^[91] 就发现了其 V 波段 0.35 mag/d 的光变, 观测结果跟 DuPuy 等人^[92] 的相符, 后者发现的速度为 0.3 mag/d(V 波段)。Miller 等人^[18] 发现 0.14 mag(V 波段) 的微光变。Xie 等人^[93] 在 1985 年及 1988 年观测到 40 min 内光度上升 0.56 mag(B 波段)。Corbett 等人^[94] 则发现 $\Delta V = 0.1$ mag 的变幅, 时间为 30 min。Carini 等人^[44] 报告了 17a 的光学监测, 发现了源的奇怪特性, 由 $(B - V) - V$ 星等图可看出, 亮度及颜色没有明显关系, 但越亮越蓝的趋势是可见的。Maesano 等人^[95] 报告了 1993—1995 年对 BL Lac 在 $BVRI$ 波段的测光, 证实了该源随着流量增加而光谱变平。

1997 年, BL Lac 的大爆发成为多个光学波段观测小组的目标^[32,95-101]。期间, 源多次被发现有不同的微光变, 而越亮越蓝的现象也多次出现。Matsumoto 等人^[101] 在 1997 年 8 月 2 日发现一个极快的光变, 源在 40 min 内 V 星等上升了 0.6 mag, 此结果被 Ghosh 等人^[14] 证实。在同一晚, Massaro 等人^[98] 及 Speziali 和 Natali^[35] 观测到源在爆发期间的减弱, 发现在 B 及 V 波段 2 h 内的改变超过 0.5 mag。

Webb 等人^[100] 在 BL Lac 的爆发期间进行了 $BVRI$ 观测, 发现当源变亮时, 光谱变平。这个特征后来被 Nesci 等人^[99] 确认。Fan 等人^[102] 在 1997—1999 年对 BL Lac 进行了 VRI 波段测光, 当时源相对较暗, 没有发现类似的快速光变, 但是源有很明显的随着波长增加而减少的微光变。Nikolashvili 等人^[103] 的结果与此一致。Clements 和 Carini^[104] 在 1997 年 7 月进行了 11 晚的 VR 波段测光, 发现了 0.1~0.6 mag 的微光变。他们也发现当源的亮度越高时, 颜色越蓝。关于这种颜色改变的本质, 他们认为可能是活动星系核本身引起的, 也可能是当活动星系核处于暗弱状态时, 由另一个背景星系影响了对源的颜色观测。但是, Papadakis 等人^[105] 认为随着光度增加, 光谱变硬很明显, 即使扣除了宿主星系的贡献, 也显示越蓝越亮, 所以他们认为是耀变体本身的特性。由 Villata 等人^[106] 对 BL Lac 进行的 $UBVRI$ 波段的独立观测, 也发现了同样情况。他们同时发现颜色 - 光度关系在长期光度变化中较不明显, 而几天的时标内, 几乎是无色差的。他们由此推论 BL Lac 的色指数包含两个部分: 长期的弱色差及短期内强色差的爆发。

Stalin 等人^[107] 及 Gu 等人^[40] 分别在 2001 年及 2003 年测到 BL Lac 的快速光变。一如既往的观测, 他们也发现了短期光变强色差、长期弱色差的现象。Hu 等人^[108] 观测 2005 年的爆发, 也发现同样的结果。

2.5 AO 0235+164

AO 0235+164($z=0.94$) 是一个致密源^[109,110], 被 Spinrad 和 Smith^[111] 归类为蝎虎座 BL 天体。它有超光速喷流, 表面速度甚至达到 30 倍光速^[112]。此天体在射电到 X 射线波段都得到广泛的观测, 而且在各个波段观测到的光变时标不一^[4,16,113-117], 是在整个电磁波谱变化多端的耀变体之一。Raiteri 等人^[116] 比较了 25 年中对该源的光学波段及射电波段观测数据, 发现某些时候光学及射电波段同时爆发, 有时候光学波段先爆发, 显示了存在不同的光变机制。长期的光变跟多普勒因子变化有关(可能是几何效应), 而快速爆发很有可能是内在原

因^[118]。2006年12月爆发期间, Hagen-Thorn等人^[119]对源作出光学及红外波段观测, 发现 B 波段光变领先 R 波段 0.5~1 h, 而 V 和 I 波段在 0.5 h 范围内同步。

AO 0235+164 在光学波段内的变化主要以快速和活跃的爆发为主^[120]。Xie 等人^[10]在 1994 年 12 月中两天的观测发现源在 10 min 内 V 波段减弱 0.52 mag, I 波段减弱 0.44 mag。Rabbette 等人^[121], Heidt 和 Wagner^[16] 及 Noble 和 Miller^[122] 均发现源在一晚内的快速光变, 变幅为几十分之一 mag (V 波段)。Sagar 等人^[79] 在 1998 年 11 月及 2000 年 10 月进行了 5 天观测, 发现源明显有微光变, 在 R 波段的变幅为 7.6%~12.8%。Xie 等人^[123] 观测到更短标时的微光变, 源在 21 min 内增亮 0.71 mag (R 波段, 1999 年 1 月); 在 16 min 内下降 0.52 mag (B 波段, 1998 年 9 月), 及在 7 min 内增亮 0.54 mag (R 波段, 1998 年 11 月)。Romero 等人^[4] 曾观测到源在 24 h 内 V 波段变化 1.2 mag (即流量改变 100%) 及在 6 h 内 V 及 R 波段改变 0.5 mag (1999 年 11 月)。这种极端变化比 1990 年及 1991 年的大爆发更强烈^[122], 当时发现晚内光变的变幅为 $\Delta V = 0.25$ mag。总的来说, Romero 等人^[4] 发现当源变亮时, 光谱变硬, 但是由于观测精度不高, 还不能就此作出结论。Papadakis 等人^[105] 及 Stalin 等人^[107] 对 BL Lac 及 S5 0716+714 也观测到同样结果, 这 2 个源也是变亮时, 光谱变硬。WEBT 在 2003 年年底曾对源进行过观测, 发现了明显的微光变。观测期间, 源处于暗弱状态。晚间变化, 最快的有 1~2 d, 其变幅 $\Delta R = 0.5$ mag。这个观测结果表示源在暗弱状态下也可以很活跃^[124]。Gupta 等人^[125] 在 2007 年年初共观测了 3 d, 其中两天在 R 波段发现有微光变, 最大变幅达到 13.7%。

跟大多数的耀变体不一样, AO 0235+164 的光度变化跟颜色没有显示出明确关系。Ghosh 等人^[14] 在 1997 年年底至 1998 年年初的观测, 发现 V 及 R 波段星等增亮, 但 $V-R$ 色指数不变。但是在观测后段, V 及 R 波段亮度减低, $V-R$ 色指数增加, 显示颜色变红。Romero 等人^[4] 曾在一晚之内观测到及 AO 0235+164 完整的爆发 (1999 年), 变幅 30% 而能谱没有变化。这与光变由薄的相对论激波的传播方向与视线方向夹角的改变而引起的观点一致^[126,127]。WEBT 在 2004—2005 年对该源进行了观测, 当时色指数显示大的弥散, 其变化范围由 1.27~2.07, 暗示存在重要的能谱变化。但是, 并没有发现亮度和颜色有任何简单的相关关系。特别是, 当考虑 1989—1991 年、1997—1998 年爆发期间的色指数时, 色指数并没有任何异常。因为当源处于较暗的状态时, 都有相似的 $B-R$ 值。所以, 源的长期表现基本上是无色差的, 其 $V-I$ 值证实了这个发现^[128]。Hagen-Thorn 等人^[129] 观测到该源 2006 年 12 月的爆发, 发现了几 h 的短标时的光变, 变化时标由光学到近红外波段随着波长的增加而增加。流量的增加同样为无色差。

2.6 OJ 287

OJ 287 ($z = 0.306$) 是经典的射电蝎虎座 BL 天体, 也是伽玛射线源^[130], 有超过 100 a 的观测历史, 被 Dickel 等人^[131] (在射电波段) 及 Thompson 等人^[132] (在光学波段) 观测发现。OJ 287 的光变覆盖由射电到伽玛射线的全波段。光学波段的偏振有很大的随机变化。Visvanathan 和 Elliott^[133] 及 Frohlich 等人^[134] 首先发现其在光学波段的变化, 而 Kinman 等人^[135] 及 Williams 等人^[136] 则首次观测到光学波段的线偏振现象。Dultzin-Hacyan 等人^[137] 在该源 1994 年爆发期间进行了 $BVRI$ 测光, 并没有发现有时延。有很多 OJ 287 在光学波段的光变观测。它在 1972 年光度达到极大值, 当时 $V \approx 12$ mag。它在 B 波段的变

幅高至 5.5 mag, $18.0 \text{ mag} \geq B \geq 12.5 \text{ mag}$ [138]。一些学者 [76,135,139,140] 发现其光变时标约为 8 d, 但偶尔也观测到 1 d 以内的光变。这些光变首先由 Folsom 等人 [141] 发现。Epstein 等人 [142] 和 Smith 等人 [143] 也发现过其他有关的快速光变。OJ 287 最小的变化时标短于 1 h [133,144]。Visvanathan 和 Elliot [133] 发现了周期为 39.2 min 的光变时标。这个周期后来被 Frolich [134] 证实, 但是 Kiplinger [145] 并没有发现此光变时标。Carrasco 等人 [144] 也发现了光学波段的光变, 周期为 23.0 min 及 40.0 min。Xie 等人 [10] 在 1994 年 3 月及 1995 年 3 月观测到该源重要的快速变化, 源在 B 波段亮度几 min 内的下降约 0.2 mag。在 25~35 min 内, R 波段的亮度变化范围达 0.27~0.59 mag。Xie 等人 [123] 在 1999 年 3 月 22 日也发现了该源重要的微光变, R 星等在 84 min 内变化了 0.79 mag。1994—1996 年该源爆发期间, 源处于活跃状态, 光变幅度 $\Delta V = 2.46 \text{ mag}$ (从 14.03 变为 16.49 mag), 并伴随有微光变 [146]。Sagar 等人 [79] 在 1998 年 12 月至 2001 年 2 月, 对该源进行了 4 d 观测, 均发现了微光变, 时标为 1.5~3 h。Zhang 等人 [146] 在 2002 年 1 月 6 日在 R 波段发现了多次微光变, 当时该源处于暗弱状态, 先在 31 min 内减弱 0.35 mag, 又在 39 min 内增亮 0.27 mag, 再在 80 min 内减少 0.32 mag, 随后又在 31 min 内增亮 0.35 mag。

对于 OJ 287 的颜色和亮度的关系, Carini 等人 [44] 在 1973—1990 年间作出观测。发现颜色与光度没有明显相关性, 只有不太明显的越亮越蓝的趋势。然而, Takalo 和 Sillanpaa [147] 在分析 $B - V$ 色指数与 V 星等的关系后, 却发现了明显的越亮越蓝的趋势。同样, Wu 等人 [38] 在 2005 年上半年的观测发现了类似的关系。观测期间, 源处于宁静状态, 变得越亮越蓝。色指数的快速变化可能表明该源由两个不同谱指数的非热成分组成。如果这两个成分中有一个剧烈改变, 就可以看到快速的颜色改变。当源处于光极小时, 可以在较弱及较陡的非热谱看见此成分 [147]。然而, Tosti 等人 [148] 提出宿主星系对总光度的贡献可能是辐射机制的内在特性。红化对其他有明显宿主星系的 BL Lac 天体是很普遍的现象, 一般认为它是由星系的热发射引起的。当活动星系核的同步连续辐射变得较弱时, 星系的光谱就发生明显变化, 使颜色变红 [148-150]。

OJ 287 在 1994—1996 年爆发期间, 颜色变化跟上述结果完全不同 [151]。当时源的颜色稳定, 在颜色上的两种不同表现暗示源在两个状态下的不同光变机制。比较 OJ-94 数据, 发现有两个成分对 OJ 287 光变有贡献。第一个成分是正常耀变体的变化。此成分的变幅跟宁静状态时的变幅差不多, 可能也有差不多的周期。第二个成分是对第一个成分的“低频修正”, 可能是由位于中心的双黑洞的相互作用引起的 [38]。

2.7 S5 0716+714

S5 0716+714 是 S5 强源巡天星表中的一个成员, 在 Bonn-NRAO 射电巡天中被发现 [152,153]。Biermann 等人 [154] 确认它为蝎虎 BL 天体, 并发现其光学波段光谱为无特征连续谱, 其红移至今尚未确定。根据 8 a 的光学观测及超过 20 a 的射电观测, Raiteri 等人 [34] 报告了其光学及射电波段的表现。他们在 1995 年年初 ($R \approx 12.75 \text{ mag}$)、1997 年底 ($R \approx 12.6 \text{ mag}$)、2000 年底 ($R \approx 12.54 \text{ mag}$) 及 2001 年秋天 ($R \approx 12.55 \text{ mag}$) 观测到 4 次主要的爆发。这 4 次爆发显示了一个可能约为 $(3.0 \pm 0.3) \text{ a}$ 的周期。Raiteri 等人 [37] 发现在长时间变化上射电及光学波段没有明显相关, 但中等的射电增强常同时伴随着的主要光学爆发, 暗示产生强光学波段流量的机制能够对射电波段产生些微影响。Quirrenbach 等人 [29] 曾对该源进行了为时 4 周的观

测,发现不管是在射电还是光学波段,光变曲线都从第一周的以约 1 天为一周期变至第二周开始约 7 天为一周期,暗示射电波段的光变很有可能是内在原因引起的。Stalin 等人^[39]在两晚的观测中发现了 V 波段的光变早于 R 波段,分别约早了 6 min 和 13 min。但是取样间隔跟时延差不多,还不能就此作出结论。Qian 等人^[155]通过一晚的观测也得到了差不多的结果,发现 V 及 I 波段之间差不多有 6 min 的时延。Villata 等人^[156]利用高频率取样的数据,发现 B 及 I 波段时延约为 10 min。

S5 0716+714 的晚内光变是著名的,使它成为很多监测计划的目标。Sagar 等人^[157]报告了 1994 年为时 4 周的观测,发现了 3 个重要快速光变,其光变幅度均大于 0.1 mag/h(R 波段)。Ghisellini 等人^[158]在 1994 年 11 月—1995 年 4 月对该源进行了 $BVRI$ 波段监测,发现在几 h 内 R 波段变幅约 5%。Stalin 等人^[107]在 1996 年 4 月观测期间的两个夜晚观测到速度约为 0.01 mag/h 的微光变(V 及 R 波段)。1999 年 2 月 WEBT 对该源进行的 72 h 连续观测中,Villata 等人^[159]发现 B 星等在 130 min 内增亮 0.15 mag,最快变化速度为 0.002 mag/min。Nesci 等人^[160]观测到源的典型变化速率为 0.02 mag/h(VRI 波段)。光度上升时, R 波段速度最高达到 0.16 mag/h。Qian 等人^[161]在 5.3 a 的监测计划中,观测到源在 9 min 内 V 波段增亮约 0.78 mag。Montagni 等人^[162]在 1996—2003 年的观测期间,发现当 $R < 13.4$ mag 时,最快星等变化速度为 0.1~0.12 mag/h,持续时间小于 2 h。同时,他们发现有趋势显示源越亮时,微光变时标越短。Gupta 等人^[125]在 2007 年 1—3 月的 5 d 内对 S5 0716+714 进行了 R 波段观测,发现源的亮度达到 $R = 12.58$ mag,与之前爆发时差不多。5 天的观测当中有两天存在微光变,变幅各为 6.3% 及 5.2%。

S5 0716+714 在光学波段的能谱变化尚没有一致的结果。很多学者^[37,40,106,158,163]研究过光学波段的能谱随光度的变化。大部分报告显示当源处于快速爆发时为越亮越蓝,但长期的变化则是无色差的。然而,Stalin 等人^[107]发现即使处于快速光变时,该源的颜色也没有随光度改变。Raiteri 等人^[37]在 1994—2001 年观测了该源不同时标的光变,发现了其具有不同的表现,有时候有越亮越蓝的趋势,有时候则相反,也有星等改变而颜色不变的情况。Nesci 等人^[160]在 1999 年 1—4 月的观测,显示星等跟微光变幅度没有明显关系。然而,当 $R < 13.5$ mag 时,观测到较大幅度的光变。Raiteri 等人^[37]只发现有不明朗的趋势显示持续时间越长变幅越大。Raiteri 等人^[37]推论可能有两种过程在控制光变。第一个过程是无色差的,它导致长期流量改变。第二个过程为有色差的,导致快速流量改变。第一个过程可以由能量注入一个大区域解释,该区域在最少几个月的时标内保持稳定。然而,有人提出了两个跟快速光变无关的解释:相对论性发射小斑点的弯曲轨道和快速电子注入及冷却过程。

3 分析及总结

耀变体的微变化及能谱变化是近 20 年该类天体的研究热点。这两类变化均在多个波段出现,对耀变体的本质和内部结构带来了新理解。表 1 列出了本文介绍的 7 个耀变体发生微光变时的状态。从表 1 可以看到,除了 3C 279 的微变主要在亮度较高的情况下发生外,其他源的微光变可以在任何情况(无论源处于亮还是暗弱状态)下发生。只是一般而

言, 当源较亮时, 发生微光变的概率较高。但是, 源并不是每次处于同一状态下都会发生微光变。到目前为止未发现发生微光变的普遍规律。一般认为, 微光变很有可能是随机过程。Montagni 等人^[162]发现当 S5 0716+714 处于较亮的状态时, 更有可能发生速度较快的微光变。但是他们的观测数据不足, 结果不能作为结论。耀变体的能谱变化更是变化多端(见表 2)。可以看到, 每个源都有自己的特性。能谱变化特性比较固定的有 3C 66A、BL Lac、AO 0235+164、3C 454.3。其中, 3C 66A 一般而言是越亮越蓝, BL Lac 则是在微光变时显得越亮越蓝, 长期光变则是弱色差, AO 0235+164 则没有显示色差关系, 平谱射电类星体 3C 454.3 跟一般蝎虎座 BL 天体相反, 呈越亮越红。另一平谱射电类星体 3C 279 没有明显色差关系, 只曾经在短期光变时发现光度下降时颜色变蓝, 上升时变红^[66]。OJ 287 在 1994 年及 2005 年的两次大爆发时分别显示两种截然不同的色差关系, 前者为无色差, 后者则是越蓝越亮。最后, 能谱变化最多样的是 S5 0716+714。观测显示: (1) 短期光变越亮越蓝, 长期光变无色差^[158,106]; (2) 短期、长期光变均为无色差^[107]; (3) 有时越亮越蓝, 有时越亮越红, 有时光度与颜色没关系^[37]。

耀变体微光变及能谱变化的研究还需要进一步的研究, 积累大量观测数据。同时, 可以期待多波段、高时间分辨率的观测对这方面研究带来新突破。

表 1 7 个耀变体曾经观测到发生微光变时的状态

源	发生微小变时的状态 /mag	近年 R 星等范围参考值 /mag
3C 279	较亮 (13.5~14.3) ^[65]	13.0~17.0 ¹⁾
3C 454.3	较亮 (14.0) ^[72]	12.3~16.3 ¹⁾
	较暗 (15.75~16.35) ^[125,164]	
3C 66A	较亮 (13.8) ^[83,75]	13.5~15.2 ³⁾
	较暗 (14.8) ^[74]	
BL Lac	较暗 (14.0) ^[102,106,107,116]	12.7~14.9 ³⁾
	暗弱 (14.6) ^[116,165]	
AO 0235+164	较亮 (15.0) ^[125]	14.2~19.5 ²⁾
	较暗 (17.5) ^[123,124]	
OJ 287	较亮 (14.7) ^[125,146]	13.1~15.9 ³⁾
	较暗 (15.2) ^[8,132,150]	
	暗弱 (15.9) ^[58]	
S5 0716+714	亮 (12.3) ^[162]	11.9~14.9 ²⁾
	较亮 (12.7) ^[72,125,162]	
	较暗 (13.9) ^[107]	

表中第 2 列括弧内为观测时估计的 R 星等值。

1) 取自芬兰 Tuorla 天文台 1.03 米望远镜及西班牙 KVA 天文台 35 cm 望远镜对源在 2004 年 1 月至 2008 年 1 月之观测数据 (<http://users.utu.fi/kani/1m/index.html>) ;

2) 取自芬兰 Tuorla 天文台 1.03 米望远镜及西班牙 KVA 天文台 35 cm 望远镜对源在 2003 年 7 月至 2008 年 7 月之观测数据 (<http://users.utu.fi/kani/1m/index.html>) ;

3) 取自芬兰 Tuorla 天文台 1.03 米望远镜及西班牙 KVA 天文台 35 公分望远镜对源在 2003 年 1 月至 2008 年 1 月之观测数据 (<http://users.utu.fi/kani/1m/index.html>) 。

表 2 7 个耀变体曾经观测到的光谱型变化情况

源	能谱变化		
	越亮越蓝	越亮越红	无色差
3C 279		✓	
3C 454.3		✓	
3C 66A	✓		✓
BL Lac	✓		✓
AO 0235+164		✓	
OJ 287	✓		✓
S5 0716+714	✓	✓	✓

参考文献:

- [1] Impey C D, Neugebauer G. AJ, 1988, 95: 307
- [2] Ulrich M, Maraschi L, Urry C M. ARA&A, 1997, 35:445
- [3] Padovani P, Giommi P. MNRAS, 1995, 277: 1477
- [4] Romero G E, Cellone S A, Combi J A. A&A, 2000, 360: L47
- [5] Blandford R D. ASPC. 1996, 110: 475
- [6] Zamorani G, Maccacaro T, Giommi P, et al. ApJ, 1984, 278: 28
- [7] Wagner S J, Witzel A. ARA&A, 1995, 33: 163
- [8] Urry C M, Treves A, Maraschi L, et al. ApJ, 1997, 486: 799
- [9] Villata ,M, Raiter C M, Ghisellini G, et al. A&A, 1997, 121: 119
- [10] Xie G Z, Li K. H, Zhang X, et al. ApJ, 1999, 522: 846
- [11] Xie G Z, Liang E W, Xie Z H, et al. AJ, 2002, 123: 2352
- [12] Jia, G B, Cen X F, Ma H Y, et al. A&AS, 1998, 129: 569
- [13] Matsumoto K, Tsuru T. PASJ, 1999, 51: 253
- [14] Ghosh K K, Ramsey B D, Sadun A C, et al. ApJ, 2000, 537: 638
- [15] Matthews T A, Sandage A R. ApJ, 1963, 138: 30
- [16] Heidt J, Wagner S J. A&A, 1996, 305: 42
- [17] Stickel M, Padovani P, Urry C M, et al. ApJ, 1991, 374: 431
- [18] Miller H R, Carini M T, Goodrich B D. Nature, 1989, 337:627
- [19] Abramowicz M A, Nobili L. Nature, 1982, 300: 506
- [20] Xie G Z, Liang E W, Zhou S B, et al. MNRAS, 2002, 334: 459
- [21] Maraschi L, Celotti, A, Treves A. ESASP, 1989, 296: 825
- [22] Qian S J, Quirrenbach A, Witzel A, et al. A&A, 1991, 241: 15
- [23] Marscher A P, Bloom S D. NASA Conf. Pub. 3137, 1992, 346: I21
- [24] Marscher A P. ASPC, 1996, 110: 248
- [25] Mangalam A V, Wiita P J. ApJ, 1993, 406: 420
- [26] Wiita P J. ASPC, 1996, 110: 42
- [27] Konigl A, Choudhuri A R. ApJ, 1985, 289: 188
- [28] Peterson B M , Meyers K A, Carpriotti E R, et al. ApJ, 1985, 292: 164
- [29] Quirrenbach A, Witzel A, Wagner S, et al. ApJ, 1991, 372: 71

- [30] Wagner S J, Witzel A, Heidt J, et al. *AJ*, 1996, 111: 2187
- [31] Kraus A, Quirrenbach A, Lobanov A P, et al. *A&A*, 1999, 344 : 807
- [32] Tornikoski M, Valtaoja E, Terasranta H, et al. *A&A*, 1994, 289: 673
- [33] Clements S D, Smith A G, Aller H D, et al. *AJ*, 1995, 110: 529
- [34] Raiteri C M, Villata M, Aller H D, et al. *A&A*, 2001, 377: 396
- [35] Speziali R, Natali G. *A&A*, 1998, 339: 382
- [36] Papadakis I E, Boumis P, Samaritakis V, et al. *A&A*, 2003, 397: 565
- [37] Raiteri C M, Villata M, Tosti G, et al. *A&A*, 2003, 402: 151
- [38] Wu J H, Zhou X, Wu X B, et al. *AJ*, 2006, 132: 1256
- [39] Stalin C, Gopal-Krishna, Sagar R, et al. *MNRAS*, 2006, 366: 1337
- [40] Gu M F, Lee C U, Pak S, et al. *A&A*, 2006, 450: 39
- [41] D'Amicis R, Nesci R, Massaro E, et al. *PASA*, 2002, 19: 111
- [42] Vagnetti F, Trevese D, Nesci R. *ApJ*, 2003, 590: 123
- [43] Ramirez A, de Diego J A, Dultzin-Hacyan D, et al. *A&A*, 2004, 421: 83
- [44] Carini M T, Miller H R, Noble J C, et al. *AJ*, 1992, 104: 15
- [45] Xie G Z, Li K H, Bai J M, et al. *ApJ*, 2001, 548: 200
- [46] Cheng K S, Zhang X, Zhang L. *ApJ*, 2000, 537: 80
- [47] Fiorucci M, Ciprini S, Tosti T. *A&A*, 2004, 419: 25
- [48] Hu S M, Zhao G, Guo H Y, et al. *MNRAS*, 2006, 371: 1243
- [49] Simonetti J H, Cordes J M, Heeschen D S. *ApJ*, 1985, 296: 46
- [50] Rickett B J, Quirrenbach A, Wegner R, et al. *A&A*, 1995, 293: 479
- [51] Nottale L. *A&A*, 1986, 157: 383
- [52] Schneider P, Weiss A. *A&A*, 1987, 171: 49
- [53] Whitney A R, Shapiro I I, Rogers A E E, et al. *Science*, 1971, 173: 225
- [54] Unwin S C, Biretta J A, Hodges M W, et al. *ApJ*, 1989, 340: 117
- [55] Hartman R C, Bertsch D L, Fichtel C E, et al. *ApJ*, 1992, 385: L1
- [56] Kniffen D A, Bertsch D L, Fichtel C E, et al. *ApJ*, 1993, 411: 133
- [57] Hartman R C, Webb J R, Marscher A P, et al. *ApJ*, 1996, 461: 698
- [58] Netzer H, Kazanas D, Wills B J, et al. *ApJ*, 1994, 430: 191
- [59] Grandi P, Urry C M, Maraschi L, et al. *ApJ*, 1996, 459: 73
- [60] Wehrle A E, Pian E, Urry C M, et al. *ApJ*, 1998, 497: 178
- [61] Hartman R C, Villata M, Balonek T J. *ApJ*, 2001, 558: 583
- [62] Bottcher M, Basu S, Joshi M, et al. *ApJ*, 2007, 670: 968
- [63] Miller H R, Noble J C. *ASPC*, 1996, 110: 17
- [64] Xie G Z, Zhou S B, Li K H, et al. *MNRAS*, 2004, 348: 831
- [65] Kartaltepe J S, Balonek T J. *ApJ*, 2007, 133: 2866
- [66] Bottcher M, Basu S, Joshi M, et al. *ApJ*, 2007, 670: 968
- [67] Blom J J, Bloemen H, Bennett K, et al. *A&A*, 1995, 295: 330
- [68] Villata M, Raiteri C M, Balonek T J, et al. *A&A*, 2006, 453: 817
- [69] Villata M, Raiteri C M, Aller M F, et al. *A&A*, 2007, 464: L5
- [70] Webb J R, Smith A G, Leacock R J, et al. *AJ*, 1988, 95: 374
- [71] Corso G J, Harris R, Ringwald F. *PASP*, 1988, 100: 70
- [72] Raiteri C M, Villata M, Chen W P, et al. *A&A*, 2008, 485: L17
- [73] Ghisellini G, Celotti A, Fossati G, et al. *MNRAS*, 1998, 301: 451
- [74] Fan J H, Lin R G. *ApJ*, 2000, 537: 101
- [75] Bottcher M, Fultz K, Aller H D, et al. 2008, preprint(astro-ph/0811.0501)
- [76] Xie G Z, Li K H, Cheng F Z, et al. *A&A*, 1990, 229: 329

- [77] Xie G Z, Liu F K, Zhu Y Y, et al. *A&AS*, 1991, 87: 461
- [78] Xie G Z, Li K H, Liu F K, et al. *ApJS*, 1992, 80: 683
- [79] Sagar R, Stalin C S, Gopal K, et al. *MNRAS*, 2004, 348: 176
- [80] Dai B Z, Xie G Z, Li K H, et al. *AJ*, 2001, 122: 2901
- [81] Ghosh K K, Kim C, Ramsey B D, et al. *JKAS*, 2001, 34: 9
- [82] Bottcher M, Harvey J, Joshi M, et al. *ApJ*, 2005, 631: 169
- [83] Ghosh K K, Ramsey B D, Sadun A C, et al. *ApJS*, 2000, 127: 11
- [84] Vagnetti F, Trevese D, Nesci R. *ApJ*, 2003, 590: 123
- [85] Fan J H, Xie G Z, Pecontal E, et al. *ApJ*, 1998, 507: 173
- [86] Shen B S P, Usher P D. *Nature*, 1970, 228: 1070
- [87] Villata M, Raiteri C M, Aller H D, et al. *A&A*, 2004, 424: 497
- [88] Hu S M, Wu J H, Zhao G, et al. *MNRAS*, 2006, 373: 209
- [89] Papadakis I E, Boumis P, Samarotalos V, et al. *A&A*, 2003, 397: 565
- [90] Stalin C, Gopal-Krishna, Sagar R, et al. *MNRAS*, 2006, 366: 1337
- [91] Racine R. *ApJ*, 1970, 159: 99L
- [92] DuPuy D, Schmitt J, McClure R, et al. *ApJL*, 1969, 156: L135
- [93] Xie G Z, Li K H, Zhou Y, et al. *AJ*, 1988, 96: 24
- [94] Corbett E A, Robinson A, Axon D J, et al. *MNRAS*, 1996, 281: 737
- [95] Maesano M, Montagni F, Massaro E, et al. *A&AS*, 1997, 122: 267
- [96] Ma Y, Barry D. *IAU Circ.*, 1997: 6703
- [97] Noble J C, Carini M T, Miller H R, et al. *IAU Circ.*, 1997: 6693
- [98] Massaro E, Nesci R, Maesano M, et al. *MNRAS*, 1998, 299: 47
- [99] Nesci R, Maesano M, Massaro E, et al. *A&A*, 1998, 332: L1
- [100] Webb J R, Freedman I, Howard E, et al. *AJ*, 1998, 115: 2244
- [101] Matsumoto K, Tsuru T G. *PASJ*, 1999, 51: 253
- [102] Fan J H, Qian B C, Tao J. *A&A*, 2001, 369: 758
- [103] Nikolashvili M G, Kurtanidze O M, Richter G M. *Proc. OJ-94 AnnualMeeting*, 1999: 33
- [104] Clements S D, Carini M T. *AJ*, 2001, 121: 90
- [105] Papadakis I E, Boumis P, Samarotalos V, et al. *A&A*, 2003, 397: 565
- [106] Villata M, Raiteri C M, Kurtanidze O M, et al. *A&A*, 2004, 421: 103
- [107] Stalin C, Gopal-Krishna, Sagar R, et al. *MNRAS*, 2006, 366: 1337
- [108] Hu S M, Wu J H, Zhao G, et al. *MNRAS*, 2006, 373: 209
- [109] Jones D L, Baath L B, Davis M M, et al. *ApJ*, 1984, 284: 60
- [110] Chu H S, Baath L B, Rantakyro F T, et al. *A&A*, 1996, 307: 15
- [111] Spinrad H, Smith H E. *ApJ*, 1975, 201: 275
- [112] Fan J H, Xie G Z, Wen S L. *A&AS*, 1996, 116: 409
- [113] Ghosh K K, Soundararajaperumal S. *ApJS*, 1995, 100: 37
- [114] Romero G E, Combi J A, Benaglia P, et al. 1997, *A&A*, 326: 77
- [115] Webb J R, Howard E, Benitez E, et al. *AJ*, 2000, 120: 41
- [116] Raiteri C M, Villata M, Aller H D, et al. *A&A*, 2001, 377: 396
- [117] Padovani P, Costamante L, Giommi P, et al. *MNRAS*, 2004, 347: 1282
- [118] Ostorero L, Villata M, Raiteri C M. *A&A*, 2004, 419: 913
- [119] Hagen-Thorn V A, Larionov V M, Jorstad S G. *ApJ*, 2008, 672: 40
- [120] Webb J R, Smith A G. *A&A*, 1989, 220: 65
- [121] Rabbette M, McBreen B, Steel S, et al. *A&A*, 1996, 310: 1
- [122] Noble J C, Miller H R. *ASP Conf. Ser.*, 1996, 110: 30
- [123] Xie G Z, Li K H, Bai J M, et al. *ApJ*, 2001, 548: 200

- [124] Raiteri C M, Villata M, Ibrahimov M A, et al. *A&A*, 2005, 438: 39
- [125] Gupta A C, Fan J H, Bai J M, et al. *AJ*, 2008, 135: 1384
- [126] Kraus A, Quirrenbach A, Lobanov A P, et al. *A&A*, 1999, 344: 807
- [127] Qian S J, Kraus A, Witzel A, et al. *A&A*, 2000, 357: 84
- [128] Raiteri C M, Villata M, Kadler M, et al. *A&A*, 2006, 459: 731
- [129] Hagen-Thorn V A, Larionov V M, Jorstad S G. *ApJ*, 2008, 672: 40
- [130] Hartman R C. *BAAS*, 1998, 30: 1311
- [131] Dickel J R, Yang K S, McVittie G C, et al. *AJ*, 1967, 72: 75
- [132] Thompson D J, Bertsch D L, Dingus B L, et al. *ApJS*, 1996, 107: 22
- [133] Visvanathan N, Elliot J L. *ApJ*, 1973, 179: 721
- [134] Frohlich A, Goldsmith S, Weistrop D. *MNRAS*, 1974, 168: 417
- [135] Kinman T D, Wardle J F C, Conklin E K, et al. *AJ*, 1974, 79: 349
- [136] Williams W L, Rich A, Kupferman P N, et al. *ApJ*, 1972, 174: L63
- [137] Dultzin-Hacyan D, Takalo L O, Benítez E, et al. *RMxAA*, 1997, 33: 17
- [138] Takalo L O. *Vistas Astron.*, 1994, 38: 77
- [139] Xie G Z, Li K.H, Bao M X, et al. *A&AS*, 1987, 67: 17
- [140] Xie G Z, Li K H, Zhang Y H, et al. *A&AS*, 1994, 106: 361
- [141] Folsom G H, Smith A G, Hackney R L, et al. *ApJ*, 1971, 169: L131
- [142] Epstein E E, Fogarty W G, Hackney K R, et al. *ApJ*, 1972, 178: L51
- [143] Smith, A G, Scott R L, Leacock R J, et al. *PASP*, 1975, 87: 149
- [144] Carrasco L, Dultzin-Hacyan D, Cruz-Gonzalez I. *Nature*, 1985, 314: 146
- [145] Kiplinger A L. *ApJ*, 1974, 191: L109
- [146] Zhang X, Zhao G, Zheng Y G, et al. *AJ*, 2007, 133: 1995
- [147] Takalo L O, Sillanpaa A. *A&A*, 1989, 218: 45
- [148] Tosti G, Fiorucci M, Luciani M, et al. *A&AS*, 1998, 130: 109
- [149] Hagen-Thorn, V A, Marchenko S G, Smehacheva R I, et al. *Astrofizika*, 1983, 19: 199
- [150] Sillanpaa A, Haarala S, Valtonen M J, et al. *ApJ*, 1988, 325: 628
- [151] Sillanpaa A, Takalo L O, Pursimo T, et al. *A&A*, 1996, 315: L13
- [152] Kuehr H, Witzel A, Pauliny-Toth I I K, et al. *A&AS*, 1981, 45: 367
- [153] Kuehr H, Johnston K. J, Odenwald S, et al. *A&AS*, 1987, 71: 493
- [154] Biermann P, Duerbeck H, Eckart A, et al., *ApJ*, 1981, 247: L53
- [155] Qian B, Tao J, Fan J. *PASJ*, 2000, 52: 1075
- [156] Villata M, Mattox J R, Massaro E, et al. *A&A*, 2000, 363: 108
- [157] Sagar R, Gopal-Krishna, Mohan V, et al. *A&ASS*, 1999, 134: 453
- [158] Ghisellini G, Villata M, Raiteri C M, et al. *A&A*, 1997, 327: 61
- [159] Villata M, Mattox J R, Massaro E, et al. *A&A*, 2000, 363: 108
- [160] Nesci R, Massaro E, Montagni F. *PASA*, 2002, 19: 143
- [161] Qian B C, Tao J, Fan J H. *AJ*, 2002, 123: 678
- [162] Montagni F, Maselli A, Massaro E, et al. *A&A*, 2006, 451: 435
- [163] Wu J, Peng B, Zhou X, et al. *AJ*, 2005, 129: 1818
- [164] Raiteri C M, Villata M, Larionov V M, et al. *A&A*, 2007, 473: 819
- [165] Bai J M, Xie G Z, Li K H, et al. *A&ASS*, 1999, 136: 455

Microvariability and Spectral Variability in the Optical Bands of Blazars

POON Helen, FU Jian-ning

(Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Microvariability across the whole electromagnetic spectrum in blazars was first discovered in 1960s. It began to get extensive attention in 1980s. After twenty years' investigation, the physical mechanism leading to microvariability has not been found. Several models exist in explaining this phenomenon in the literature. The most widely accepted one is the shock-in-jet model. In this model, shocks propagating along the relativistic jet and interacting with the hydrodynamically turbulent plasma and twisted magnetic field should be responsible for the microvariability.

Spectral variability is always found when a blazar shows variability in brightness in both short and long timescale. There are many different phenomena. Some blazars, generally flat spectrum radio quasars, become redder when brighter. Some (generally BL Lac objects) show the opposite trend-bluer when brighter. Some show no spectral variability at all. When blazars are in different states, they exhibit different behavior in spectral variability. As an example, in the outburst of OJ 287 in 1994, it showed no color change at all. However, in its 2005 outburst, it was observed to be bluer when brighter. Another example is S5 0716+714, it has been observed to be bluer when brighter, redder when brighter as well as show no spectral change with brightness.

This paper provides a comprehensive review of the historical study of microvariability as well as spectral variability of seven most extensively observed blazars, namely 3C 279, 3C 454.3, 3C 66A, AO 0235+164, BL Lac, OJ 287, S5 0716+714. Models for these blazars' variability are also simply introduced.

Key words: Astrophysics; active galaxies; individual blazars