

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.04.08

# Mrk 421 和 3C 454.3 的射电与 $\gamma$ 射线 波段的光变研究

顾春霞<sup>1,2,3</sup>, 周 明<sup>1,2</sup>, 王建成<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 云南天文台, 昆明 650011; 2. 中国科学院 天体结构与演化重点实验室, 昆明 650011; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 近期探测到 Mrk 421 和 3C 454.3 这两个耀变体 (Blazar) 在  $\gamma$  波段有强烈而显著的爆发, 利用  $\gamma$  波段 (GeV) 和射电 (15 GHz) 的流量数据对这两个源进行了详细分析, 结果表明  $\gamma$  波段的光变与射电波段具有较强的相关性, 且  $\gamma$  波段辐射光变超前于射电波段; 我们讨论了可能的解释。另外, 3C 454.3 的射电辐射在 2010 年后的将近 1 a 时间内持续处于爆发状态, 之后又出现一个较长时间的持续下降过程; 在此期间,  $\gamma$  波段流量极低, 表明其间喷流的活动性很弱, 基本上不存在粒子的加速过程。因此, 此持续下降过程可能表征辐射区的膨胀过程。

**关 键 词:** 耀变体; Mrk 421; 3C 454.3; 光变研究

**中图分类号:** P158      **文献标识码:** A

## 1 引 言

Blazar 是一类具有特殊观测现象的射电噪活动星系核, 在统一模型中认为其喷流方向与视线方向夹角很小 ( $\leq 10^\circ$ )<sup>[1]</sup>, 相对论喷流的聚束效应使得它们表现出剧烈的活动性<sup>[2,3]</sup>。Blazar 最显著的观测特征是在各个波段都具有快速、大幅而无规则的光变现象, 并存在多种时标的光变, 即微光变 (分钟到小时量级)、短时标光变 (天到月量级) 和长时标光变 (月到年量级)<sup>[4]</sup>。通常光变的性质主要包括光变时标、光变幅度、光变频度、光变曲线、谱型等随时间的变化以及不同波段之间光变的相关性等。它不仅能反映天体活动的剧烈程度, 而且能够进一步反映其辐射区域及其变化, 如内部的物理条件、结构的改变等。总之, 光变分析一直以来都是研究 Blazar 本质非常有效的手段之一。

Blazar 的辐射几乎涵盖了整个电磁波段, 从低能射电波段一直到甚高能  $\gamma$  射线波段, 辐射能谱很宽<sup>[5]</sup>。Blazar 的能谱分布 (spectral energy distribution, 简称 SED) 呈现出双峰结构<sup>[6,7]</sup>,

收稿日期: 2013-05-10; 修回日期: 2013-06-21

资助项目: 国家自然科学基金 (11133006, 11173054); 973 项目 (2009CB824800); 中国科学院政策研究项目 (KJ CX2-YW-T24)

低能峰主要位于红外到软 X 射线能段, 高能峰主要位于 MeV 到 GeV 能段, 它们分别对应着不同的辐射机制<sup>[8]</sup>。一般认为低能峰由喷流中相对论电子的同步辐射产生; 而高能峰的起源还存在较大的争议, 主要有轻子模型和强子模型两种解释模型: 轻子模型认为高能峰是由相对论电子的逆康普顿散射产生<sup>[9-12]</sup>, 强子模型认为高能峰是由高能质子的级联过程或者同步辐射过程产生<sup>[13,14]</sup>。其中轻子模型按照逆康普顿散射的种子光子是否来源于喷流内部, 又可以进一步分为同步自康普顿模型<sup>[15,16]</sup> 和外康普顿模型<sup>[12,17]</sup>。按照是否具有明显的光学发射线, Blazar 一般可以分为平谱射电类星体和 BL Lac 天体。后来按照低能峰(同步峰)位置的不同, Abdo 等人又将 Blazar 分为低同步峰频 Blazar (对应同步峰频率  $\nu_{\text{peak}} < 10^{14}$  Hz)、中同步峰频 Blazar ( $10^{14} \leq \nu_{\text{peak}} \leq 10^{15}$  Hz) 和高同步峰频 Blazar ( $\nu_{\text{peak}} > 10^{15}$  Hz)<sup>[18]</sup>。

费米望远镜上搭载的大天区望远镜 (large area telescope, LAT) 是一个宽视场 ( $\approx 2.4$  sr)、成像型的  $\gamma$  射线望远镜, 具有很高的能量和空间分辨率<sup>[19]</sup>, 它的问世及正常的科学运行为 GeV  $\gamma$  能段的天文观测揭开了一个新的篇章。其主要任务是在 20 MeV ~ 300 GeV 的  $\gamma$  能段上, 进行长时间、高灵敏度的  $\gamma$  射线波段的巡天观测, 约每 3 h 就能巡天一周<sup>[19]</sup>。费米望远镜首次在  $\gamma$  波段给出长时间、高灵敏度的监测数据, 对于变源的光变研究非常重要。在费米望远镜执行期间, 几乎每个 Blazar 的光变都可以通过费米的观测给出基本上相同灵敏度的观测数据, 其公开的观测数据资源比较丰富, 已公布在官方网站——FSSC 上<sup>①</sup>, 为我们提供了很大的便利。

在  $\gamma$  射线源中, Blazar 占据了 Fermi-LAT 两年源表中相关点源很大的比例 (约 67%), 对于本身比较亮而且光变明显的 Blazar, 费米团组专门提供了一个流量监测源列表, 公布在官方网站上<sup>②</sup>。因费米望远镜具有 GeV 能段上长时间监测数据这一优势, 引起了很多学者对 Blazar 光变的关注, 当前主要以多波段的光变研究为主, 通过相关性分析、时间延迟分析等, 试图对个别源的光变性质给予更全面的描述, 对物理量、辐射过程、辐射区域等给出更好的限制, 从而阐明中心引擎和相对论喷流及其相互作用、喷流的成分和 AGN 的内部结构等<sup>[20]</sup>。然而, 到目前为止, 多波段光变性质分析所得到的统一结果尚较少。

虽然大量的研究工作都表明,  $\gamma$  射线和射电流量之间有着很好的相关性<sup>[21-24]</sup>, 但是在有关  $\gamma$  射线的多波段研究中很少将射电波段考虑进来<sup>[25,26]</sup>。其主要原因是, 在一般情况下认为  $\gamma$  射线来自于致密区域。由于电子的同步自吸收作用, 在这样的区域内对于射电辐射却是光学厚的。然而,  $\gamma$  与射电波段之间的相关关系对理解 Blazar 的辐射机制却有着至关重要的意义。首先, 两个波段都主要由喷流所贡献, 而其它波段的辐射则有着多种多样的起源; 其次, 在辐射区域由内向外传播过程中, 其逐步由对射电光学厚转为光学薄, 此过程将携带辐射区膨胀过程的信息。

<sup>①</sup><http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/>

<sup>②</sup><http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/msl.lc/>

## 2 研究对象、数据和研究方法

### 2.1 研究对象

本文选择两个近期活动比较剧烈的 Blazar 源 Mrk 421 和 3C 454.3, 两者分别属于 BL Lac 天体和平谱射电类星体 (flat spectrum radio quasar, 简称 FSRQ), 是研究 Blazar 活动特性很典型的两个天体。同时它们在  $\gamma$  波段都有非常显著的爆发, 因此可以很容易地比较与其他波段对应的光变信息。

Mrk 421 是一个很典型的 BL Lac 天体, 红移  $z = 0.031$ , 是最亮的 Blazar 之一, 康普顿伽马射线天文台上搭载的 EGRET 曾在 GeV 能段探测到 Mrk 421<sup>[27, 28]</sup>, 同时它是第一个在大于 500 GeV 甚高能  $\gamma$  能段被探测到的河外源<sup>[29]</sup>。由于 Mrk 421 的同步峰频高于 0.1 KeV, 它属于高同步峰频 (high synchrotron peaked, HSP) Blazar。Mrk 421 在光学波段表现出剧烈的光变现象<sup>[30]</sup>, 曾经在 2.5 h 内变化 1.4 mag, 光变非常迅速<sup>[31]</sup>。后来分别在红外、X 射线、TeV  $\gamma$  射线波段都观测到 Mrk 421 的快速而大幅的光变, 甚至是大幅度的爆发现象<sup>[4, 32, 33]</sup>。可以看到, Mrk 421 几乎一直处于很活跃的状态。

3C 454.3 (红移  $z = 0.859$ ) 是最著名的 FSRQ 之一, 在多个波段都观测到光变现象, 例如在射电<sup>[34]</sup>、微波<sup>[35]</sup>、光学<sup>[36]</sup>、X 射线<sup>[37]</sup>、低能  $\gamma$  射线<sup>[38]</sup> 和高能  $\gamma$  射线<sup>[39, 40]</sup> 等波段。尤其从 2000 年它开始进入了更加明亮的状态, 相比之前, 活动性也更加剧烈<sup>[41-43]</sup>。按照另一种分类标准, 3C 454.3 属于低同步峰频 (low synchrotron peaked, LSP) Blazar。

### 2.2 数据介绍与分析

$\gamma$  波段的数据选自费米望远镜上的大天区望远镜 (LAT) 的观测数据。选择自费米望远镜运行以来 Mrk 421 和 3C 454.3 的全部观测数据, 我们应用费米团组提供的标准分析程序——费米科学工具集, 进行了详细的数据处理。选择中心天体周围感兴趣区域半径 (ROI) 为  $10^\circ$ , 能段选自 100 MeV ~ 300 GeV 范围, 仪器响应函数 P7source\_v6, 银河系弥散背景模型 gal\_2yearp7v6\_v0, 各向同性背景模型 iso\_p7v6source; 为了排除 ROI 靠近地球临边 (the earth's limb) 时所对应的数据<sup>①</sup>, 最大天顶距的选择与两年源表中相同, 选作  $100^\circ$ , 以避免绝大多数来自于地球大气  $\gamma$  光子的污染。应用官方网站上提供的一个模型产生工具 “make2FGLxml.py” 得到被研究源的模型, 再通过不分 bin 的最大似然计算 (unbinned maximum likelihood analysis) 获得最佳的拟合模型, 并由此模型和费米团组提供的一个名为 python\_light\_curve.py 的脚本文件 (按照具体情况进行修改) 获得光变曲线。在作光变曲线时, 我们选择一周为一个 bin, 由于本文主要研究射电与  $\gamma$  波段大幅光变之间的关系, 因此也没有必要取更短的时间 bin。

在射电波段, 我们直接使用网站上公布的数据资料, 采用欧文斯谷射电天文台 (the Owens Valley Radio Observatory, OVRO) 的 40 m 望远镜在 15 GHz 射电波段的长时间监测数据<sup>②</sup>。

<sup>①</sup>地球临边位于天顶距小于  $113^\circ$  处

<sup>②</sup>[http://www.astro.caltech.edu/ovroblazars/data/data.php?page=data\\_query](http://www.astro.caltech.edu/ovroblazars/data/data.php?page=data_query)

## 2.3 研究方法

离散相关函数是在研究光变相关性及时间延迟中常用到的一种方法<sup>[44,45]</sup>，也有人用离散相关函数法来研究光变周期<sup>[46]</sup>。

离散相关函数方法的定义<sup>[44,47]</sup>为：对任意两个离散数据序列  $a_i$  和  $b_j$  中任意的一对数据  $(a_i, b_j)$ ,

$$UDCF(t_{ij}) = \frac{(a_i - \bar{a})(b_j - \bar{b})}{\sigma_a \times \sigma_b}, \quad (1)$$

其中,  $t_{ij} = t_j - t_i$  为时间延迟,  $\bar{a}$  和  $\bar{b}$  分别为两数据列的平均值,  $\sigma_a$  和  $\sigma_b$  分别是它们的标准偏差, 通常情况下, 对于有噪的数据,  $\sigma_a \times \sigma_b$  取作  $\sqrt{(\sigma_a^2 - e_a^2)(\sigma_b^2 - e_b^2)}$ , 其中,  $e_a$  和  $e_b$  为测量误差。

若对应  $\tau$  时间段内, 有  $M$  对数据点, 则离散相关函数:

$$DCF(\tau) = \frac{1}{M} \sum UDCF(t_{ij}) . \quad (2)$$

对应标准偏差:

$$\sigma_{DCF} = \frac{1}{M-1} \left\{ \sum [UDCF(t_{ij}) - DCF(\tau)]^2 \right\}^{1/2} . \quad (3)$$

在离散相关函数分析图上, 峰值 ( $DCF_{\text{peak}}$ ) 处对应的时间为时间延迟值<sup>[48-50]</sup>, 正、负则分别表示  $a$  滞后或超前于  $b$ 。

由于天文观测数据经常是不均匀的, 在具体操作过程中, 通常采用的做法是对离散相关函数峰值附近的数据点求质心来确定时间延迟。计算表达式为:

$$DCF_{\text{centroid}} = \frac{\sum \tau DCF(\tau)}{\sum DCF(\tau)} . \quad (4)$$

计算时, 我们可以选择对大于  $0.5 DCF_{\text{peak}}$  或者  $0.8 DCF_{\text{peak}}$  等某一参考值的全部数据点求质心。

## 3 光变分析

### 3.1 光变曲线

本文中主要用到射电和  $\gamma$  两个波段的流量数据, 即 15 GHz 射电数据和 100 MeV~300 GeV  $\gamma$  能段的流量数据, 其光变曲线如图 1 所示。我们看到, 这两个源在  $\gamma$  射线和射电波段光变都有很显著的爆发; 且两者光变具有一定的相关性。

为了更好地比较  $\gamma$  和射电波段光变之间的相关关系, 我们把两个源在两波段的光变曲线分别画在同一个图上, 如图 2、3 所示, 可以明显地看到两个波段爆发之间的对应关系。

对于 Mrk 421, 在开始的很长时间内,  $\gamma$  波段和射电波段流量均只有小幅度的波动; 直到后来, 两个波段均出现一个大幅度的流量爆发, 且  $\gamma$  波段的流量爆发超前于射电波段。

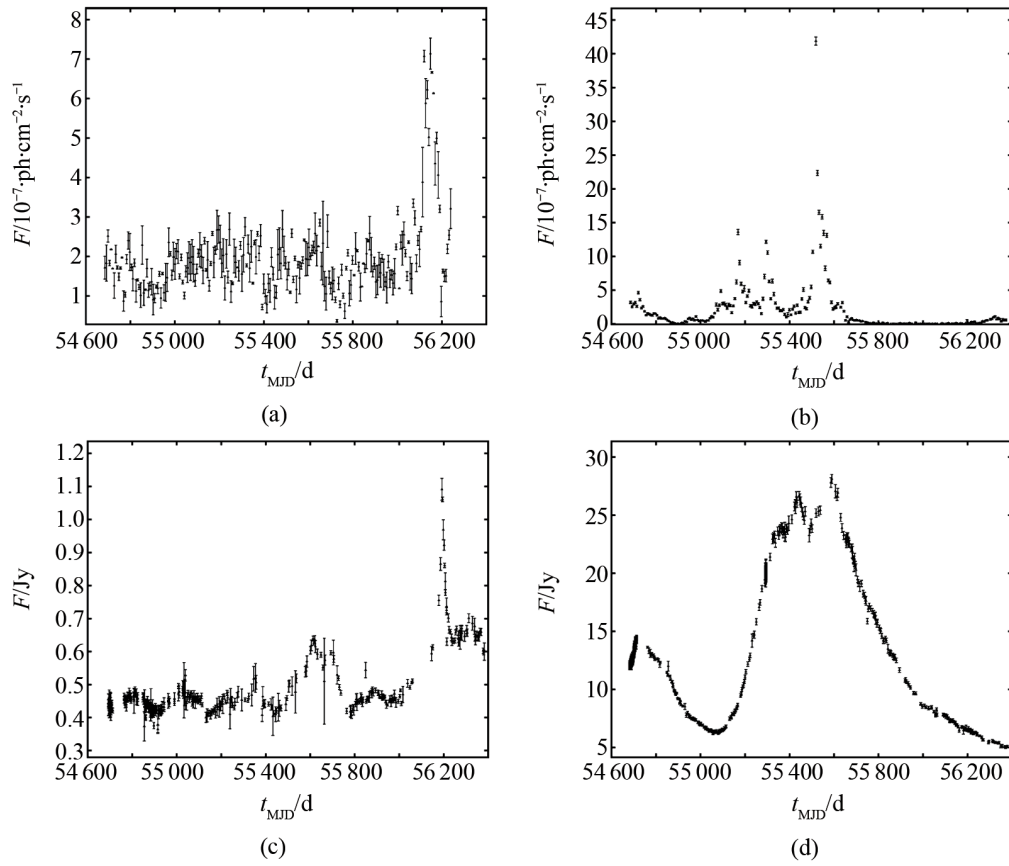


图1 Mrk 421 和 3C454.3 在各个波段的光变曲线图

(a) Mrk 421 在 100 MeV ~ 300 GeV  $\gamma$  波段的光变曲线图; (b) 3C 454.3 在 100 MeV ~ 300 GeV  $\gamma$  波段的光变曲线图; (c) Mrk 421 在 15 GHz 射电波段的光变曲线图; (d) 3C 454.3 在 15 GHz 射电波段的光变曲线图。

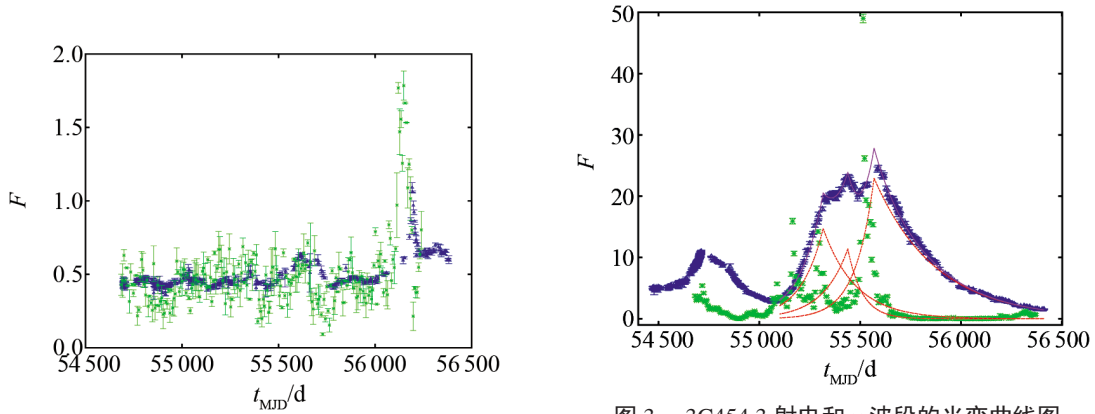


图2 Mrk 421 射电和  $\gamma$  波段的光变曲线图  
绿星号表示  $\gamma$  波段光变曲线; 蓝三角表示射电波段。

图3 3C454.3 射电和  $\gamma$  波段的光变曲线图  
绿星号表示  $\gamma$  波段光变曲线; 蓝三角表示射电波段光变曲线; 红色虚线表示 3 个射电爆发 (幂律上升随即幂律下降) 的光变曲线; 品红色实线为 3 个爆发的合成的光变曲线图。为了便于比较, 我们将射电总流量减去一个常数。

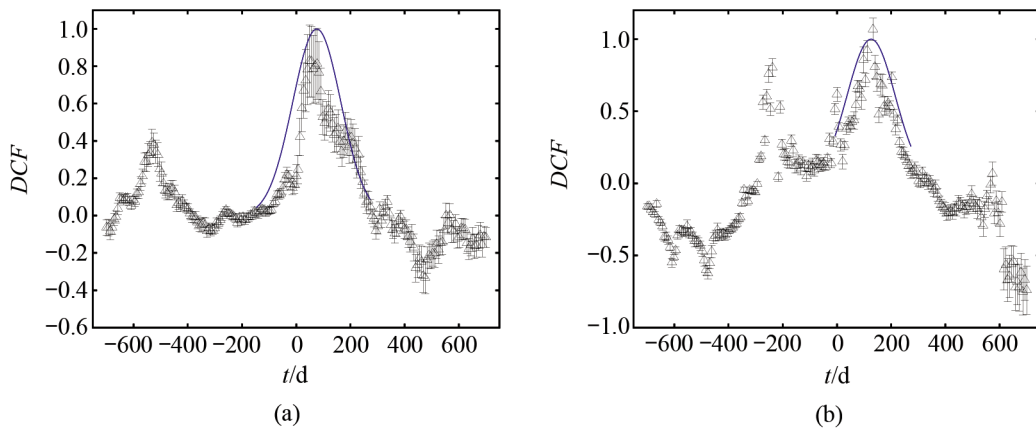
对于 3C 454.3, 射电波段流量在 2008 年 8 月 22 日 ( $t_{\text{MJD}} = 54\,700$  d) 出现了一个小幅度的爆发过程, 同时在  $\gamma$  波段的光变曲线起始点对应着一个下降过程, 这事实上对应着  $\gamma$  波段的一个爆发过程的下降端<sup>[51]</sup>。之后, 在射电波段又出现一个很长时标的爆发过程, 从 2010 年 5 月 9 日 ( $t_{\text{MJD}} = 55\,325$  d) 之后的将近 1 年时间内, 射电流量持续处于高态。几乎与此同时, 在  $\gamma$  波段有 3 个较短时标的剧烈的爆发过程。 $\gamma$  波段的 3 个较短时标光变的持续时间与射电流量处于高态的时间长度相当, 表明两波段光变相对应。射电波段长时间处于高态很可能是个光变过程叠加的结果。仔细观察可以看出,  $\gamma$  爆发超前于射电爆发, 即当  $\gamma$  流量开始增加甚至有小幅爆发时, 射电流量依然处于低态, 随后随着  $\gamma$  爆发的持续, 射电流量持续增加, 直至在  $\gamma$  波段的 3 次爆发结束后, 射电的流量才缓慢地降下来。

由于 3C 454.3 的射电流量大幅增加和持续下降阶段大致呈现幂律上升和下降, 因此我们把射电高态分解为 3 个幂律上升随即幂律下降的爆发。调整参数使合成光变曲线和实际光变曲线相符, 则可以完成分解。分解结果如图 3 中的红色虚线所示, 品红色实线为 3 个成分的合成光变曲线图, 与观测得到的光变曲线图吻合得很好, 可见射电持续高态可以认为是 3 次爆发叠加的结果。其它组参数同样可以给出较好的拟合, 但是考虑到射电辐射很可能存在其它成分, 我们认为并不能通过单纯的数学方法 (例如卡方最小等) 判断哪一组参数更合理, 可能需要结合具体物理模型进行取舍, 这超出本文讨论范围, 我们将在以后的工作中进一步研究。由于本工作中射电光变曲线中有明显的峰, 因此拟合中各个爆发峰值位置可以较准确地给出。其中射电波段长时标的爆发分解得到的 3 个爆发峰所在位置对应 MJD 时间分别为: 55 316, 55 438, 55 568, 而  $\gamma$  波段的 3 个短时标的爆发过程峰值对应时间分别为: 55 168, 55 294, 55 518, 两波段的爆发的时延分别为: 148, 144, 50 d。可见, 3 次射电波段子爆发与  $\gamma$  爆发峰值之间的时延并不相同, 表明 3 次爆发的性质不完全相同。这可能是辐射区域膨胀速度不同造成的, 详见下文的讨论。

### 3.2 离散相关分析

为了进一步的两个波段流量的时延进行定量分析, 我们对其进行离散相关分析。离散相关函数表明, 这两个源的  $\gamma$  和射电辐射光变具有显著的相关性 (如图 4 所示)。为了更加准确地给出时延, 我们对  $DCF_{\text{peak}}$  附近数据点计算质心值。对于 Mrk 421,  $\gamma$  波段光变超前射电波段约 67.7 d。然而, 对于 3C 454.3, 离散相关函数类似于 Rani 等人在图 15 中的情况<sup>[52]</sup>, 出现了两个明显的峰, 我们需要做出取舍。结合光变曲线所反映的情形, 右边的峰才应该是真实情况的反映, 根据质心估算结果,  $\gamma$  波段光变超前于射电波段, 时延约 125.1 d。对于射电高态, 离散相关函数将之视为 1 次爆发, 不能看成 3 次爆发的叠加结果, 因此得到的时延仅是一种平均结果。

为了进一步进行验证并得到误差, 我们按照 Peterson 等人给出的方法进行蒙特卡罗模拟<sup>[53]</sup>, 结果如图 5 所示。结果表明, 两个源  $\gamma$  辐射超前于射电辐射的时间分别为:  $(67.7 \pm 4.7)$  d、 $(125.1 \pm 0.2)$  d (误差为 68% 概率误差)。

图4 Mrk 421 和 3C 454.3  $\gamma$  与射电流量的离散相关函数图

(a) Mrk 421  $\gamma$  与射电流量的离散相关函数图; (b) 3C 454.3  $\gamma$  与射电流量的离散相关函数图。蓝色实线表示高斯拟合的结果。

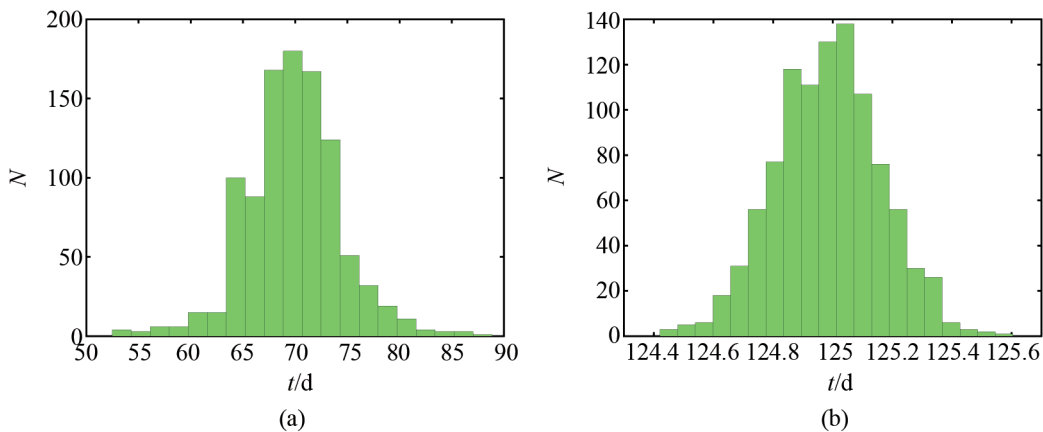


图5 Mrk 421 和 3C 454.3 1000 次蒙特卡罗模拟时延分布图

(a) Mrk 421 蒙特卡罗模拟时延分布图; (b) 3C 454.3 蒙特卡罗模拟时延分布图。

## 4 结果分析与讨论

通过光变分析可以发现,  $\gamma$  射线与射电波段光变具有很好的对应关系,  $\gamma$  波段光变超前于射电波段。而且, 3C 454.3 在射电波段呈现出非常特殊的光变特征。

人们经常用喷流中的激波模型<sup>[16, 54]</sup>解释多波段的光变性质。该模型认为, 天体中心引擎的活动会触发激波, 激波又会把电子加速至相对论性。相对论性的电子可以通过同步辐射、逆康普顿辐射等产生各个波段的辐射。前人的研究表明, 在  $\gamma$  射线波段的光变时标可以达到天的量级<sup>[55]</sup>, 表明  $\gamma$  辐射发生在很小的区域内, 而且多波段的观测又表明红外、光学、软 X 射线光变和  $\gamma$  射线光变几乎同步<sup>[56]</sup>; 但是本研究中发现射电波段光变具有明显的滞后。我们认为这是由于对于射电波段激波发生区域相是光学厚的, 因此观测不到同时性的射电光变, 随着辐射区域的向外运行和膨胀, 它逐步变为光学薄的, 此时我们才能观测到射电流量的爆

发。每次爆发时,  $\gamma$  辐射流量快速上升可能表征高能粒子的加速或注入, 而快速下降则表征高能粒子的快速辐射损失; 但射电辐射流量下降较慢, 是由于产生射电辐射的粒子能量较低, 其辐射损失时间较长。每个射电爆发结束后, 流量缓慢下降, 相互叠加, 形成持续流量高态; 因此射电辐射长时间处于高态可能是 3 个爆发过程 (图 3 中的虚线) 叠加的结果。需要注意的是, 文中分解得到的 3 个射电爆发与对应  $\gamma$  爆发之间的时延并不相同, 表明喷流团块初始密度、磁场强度, 或者其后的膨胀速度不同, 因此到达光学薄所用时间也就不同。

通过射电爆发相对  $\gamma$  爆发的时间延迟, 我们可以估计辐射区域由对射电光学厚膨胀到光学薄所用时间, 以及射电辐射达到光学薄的位置。观测到的时间延迟为  $\Delta t^{\text{obs}}$ , 根据多普勒原理, 对应于辐射区参考系的时间为:  $\Delta t \approx \delta \Delta t^{\text{obs}} / (1 + z)$ ; 根据相对论原理, 这段时间辐射区运行距离  $R \approx \Gamma \delta \Delta t^{\text{obs}} \beta c / (1 + z)^{[24]}$ , 其中,  $\delta$  为多普勒因子,  $\Gamma$  为洛伦兹因子,  $\beta c$  为喷流速度。选取  $\delta = \Gamma = 20^{[57, 58]}$ , 则对于 Mrk 421,  $\Delta t \approx 1300 \text{ d}$ ,  $R \approx 22.5 \text{ pc}$  ( $\Delta t^{\text{obs}} \approx 67.7 \text{ d}$ ,  $z = 0.031$ ); 对于 3C 454.3,  $\Delta t \approx 1350 \text{ d}$ ,  $R \approx 23.4 \text{ pc}$  ( $\Delta t^{\text{obs}} \approx 125.1 \text{ d}$ ,  $z = 0.859$ )。可以看到, 这两个量都灵敏地依赖于  $\delta$ ,  $\Gamma$  的取值, 但目前从观测上还很难限定它们, 特别是在非常靠近黑洞处的地方。另外, 虽然两个天体分别为 BL Lac 天体和 FSRQ, 且一般认为两者有不同的光变特征, 但是我们却发现两者具有非常类似的光变特征, 即在大的  $\gamma$  爆发之后出现大的射电爆发, 且本征时延接近; 这意味着大的  $\gamma$  耀可能在两类天体中有着相同的起源。

$\gamma$  与射电光变相关的另一个可能的解释是: 该时间段内喷流处于活跃阶段, 而期间  $\gamma$  耀发说明在此基础上又产生了更为剧烈的粒子加速和爆发过程。3C 454.3 的辐射环境复杂, 周围存在的宽/窄线区以及尘埃环等, 可以使高能粒子更快速地冷却, 而这些产生高能  $\gamma$  的粒子可能相对于产生射电高态的粒子团并不占优; 因此, 没有在射电高态上叠加出明显的额外超出。但是, 由于  $\gamma$  射线流量开始增加时射电流量依旧很低, 表明喷流处于高态更可能是几次大的激波加速过程的结果, 而这几次加速过程都导致了  $\gamma$  耀。

3C454.3 射电辐射最后出现的一个较长时间的持续下降过程, 可能表征辐射区的膨胀。在爆发结束之后很长时间内, 即便是相对于爆发前的相对宁静阶段,  $\gamma$  射线波段流量也变得非常低, 这同样表明在此时间段内粒子加速活动很弱, 几乎可以忽略。假设辐射区为一个等离子体团块 (blob), 以速度  $V$  匀速膨胀, 其尺度  $R = Vt + R_0$ ; 由磁通量守恒, 可以推算辐射区的磁场  $B \propto R^{-2}$ ; 若相对论电子分布的谱指数为  $n$ , 它们的同步辐射系数为  $j \propto B^{(n+1)/2}$ , 因此, 辐射流量  $F \propto jR^3 \approx R^{-n+2} \approx (t + t_0)^{-n+2}$ ; 相对论电子由激波加速, 其谱指数  $n > 2$ , 即  $-n + 2 < 0$ , 这样辐射流量随时间幂律下降, 可以解释射电辐射的下降过程。通过拟合射电辐射流量的下降曲线, 可以确定  $n \approx 4$ 。Pacciani 等人曾给出了 3C 454.3 光学红外波段的能谱, 确定出的电子谱指数范围是  $n = 4.25 \sim 4.40^{[59]}$ , 与我们得到的结果非常接近。

下一步工作, 我们准备搜集更多的多波段观测数据, 特别是射电数据, 通过不同频率射电辐射之间的流量变化的相互关系, 进一步对辐射区域由射电光学厚变为光学薄以及其后的膨胀过程进行详尽的研究。

## 致谢

感谢 Fermi/LAT 和欧文斯谷射电天文台的数据支持, 衷心感谢审稿老师们提出的非常有



价值的意见和建议!

### 参考文献:

- [1] Urry C M, Padovani P. *PASP*, 1995, 107: 803
- [2] Blandford R D, Konigl A. *ApJ*, 1979, 232: 34
- [3] Blandford R D, Rees M J. *Physica Scripta*, 1978, 17: 265
- [4] Gupta A C, Banerjee D P K, Ashok N M, Joshi U C. *A&A*, 2004, 422: 505
- [5] Ledden J E, Odell S L. *ApJ*, 1985, 298: 630
- [6] Mukherjee R, Bertseh D L, Bloom S D, et al. *ApJ*, 1997, 490: 116
- [7] Padovani P, Giommi P. *ApJ*, 1995, 444: 567
- [8] Catanese M, Weekes R M. *PASP*, 1999, 111: 1193
- [9] Ghisellini G, Celotti A, et al. *MNRAS*, 1998, 301: 451
- [10] Dermer C D, Schlickeiser R. *ApJ*, 1993, 416: 458
- [11] Inoue S, Takahara F. *ApJ*, 1996, 463: 555
- [12] Sikora M, Begelman M C, Rees M J. *ApJ*, 1994, 421: 153
- [13] Mucke A, Protheroe R J. *Aph*, 2001, 15: 121
- [14] Mannheim K. *A&A*, 1993, 269: 67
- [15] Maraschi L, Ghisellini G, Celotti A. *ApJ*, 1992, 397: L5
- [16] Marscher A P, Gear W K. *ApJ*, 1985, 298: 114
- [17] Dermer C D, Schlickeiser R, Mastichiadis A. *A&A*, 1992, 256: L27
- [18] Abdo A A, et al. *ApJ*, 2010, 716: 30
- [19] Atwood W B, Abdo A A, et al. *ApJ*, 2009, 697: 1071
- [20] Gaur H, Gupta A, Wiita P. *ApJ*, 2012, 143: 23
- [21] Valtaoja E, Teraesranta H. *A&AS*, 1996, 120: 491
- [22] Mattox J R, Schachter J, Molnar L, Hartman R C, Patnaik A R. *ApJ*, 1997, 481: 95
- [23] Zhou Y Y, Lu Y J, Wang T G, et al. *ApJ*, 1997, 484: 47
- [24] Pushkarev A B, Kovalev Y Y, Lister M L. *ApJL*, 2010, 722: L7
- [25] Bonning E W, Bailyn C, et al. *ASPC*, 2010, 427: 265B
- [26] Chatterjee R, Bailyn C, et al. *ApJ*, 2012, 749: 191
- [27] Michelson P F, Lin Y C, Nolan P L, et al. *IAU Circ*, 1992, 5470: 2
- [28] Lin Y C, Bertsch D L, Chang J, et al. *ApJ*, 1992, 401: L61
- [29] Punch M, Akerlof C W, Cawley M F, et al. *Nature*, 1992, 358: 477
- [30] Liu F K, Liu B F, Xie G Z. *A&AS*, 1997, 123: 569
- [31] Xie G Z, Lu R W, Zhou Y, et al. *A&AS*, 1988, 72: 163
- [32] Isobe N, Sugimori K, Kawai N, et al. *PASJ*, 2010, 62: L55
- [33] Aielli G, Bacci C, Bartoli B, et al. *ApJ*, 2010, 714: L208
- [34] Bennett A S. *MNRAS*, 1962, 68: 163
- [35] Bennett C L, Hill R S, Hinshaw G, et al. *ApJS*, 2003, 148: 97
- [36] Raiteri C M, Ghisellini G, Villata M, et al. *A&AS*, 1998, 127: 445
- [37] Tavecchio F, Maraschi L, Ghisellini G, et al. *ApJ*, 2002, 575: 137
- [38] Zhang S, Collmar W, Schönfelder V. *A&A*, 2005, 444: 767
- [39] Hartman R C, Bertsch D L, Bloom S D, et al. *ApJS*, 1999, 123: 79
- [40] Hartman R C, Bertsch D L, Dingus B L, et al. *ApJ*, 1993, 407: L41
- [41] Fuhrmann L, Cucchiara A, Marchili N, et al. *A&A*, 2006, 445: L1
- [42] Raiteri C M, Villata M, Chen W P, et al. *A&A*, 2008, 485: L17
- [43] Raiteri C M, Villata M, Larionov V M, et al. *A&A*, 2007, 473: 819

- [44] White R J, Peterson B M. *PASP*, 1994, 106: 879
- [45] Rebillot p F, Badran H M, Blaylock G, et al. *ApJ*, 2006, 641: 740R
- [46] Fan J H, Lin R G. *A&A*, 2000, 355: 880F
- [47] Edelson R A, Krolik J H. *ApJ*, 1988, 333: 646
- [48] 王兴华, 张雄. *云南师范大学学报*, 2010, 30: 6
- [49] Soldi S, Türler M, et al. *A&A*, 2008, 486: 411
- [50] 王洪涛, 潘艳平. *天文学报*, 2012, 53: 4
- [51] Abdo A A, Ackermann M, et al. *ApJ*, 2009, 699: 817
- [52] Rani B, Krichbaum T P, et al. *A&A*, 2013, 552: A11
- [53] Peterson B M, et al. *PASP*, 1998, 110: 660
- [54] Wagner S J, Witzel A. *ARA&A*, 1995, 33: 163
- [55] Tavecchio F, Ghisellini G, Bonnoli G, Ghirlanda G. *MNRAS*, 2010, 405: L94
- [56] Raiteri C M, Villata M, et al. *A&A*, 2011, 534: 87
- [57] Donnarumma I, Vittorini V, et al. *ApJ*, 2009, 691: L13
- [58] Sikora M, Moderski R, Madejski G M. *ApJ*, 2008, 675: 71
- [59] Pacciani L, et al. *ApJ*, 2010, 716: L170

## The Variability Analysis of Radio and $\gamma$ -Ray Fluxes for Mrk 421 and 3C 454.3

GU Chun-xia<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Ming<sup>1,2</sup>, WANG Jian-cheng<sup>1,2</sup>

*(1. Yunnan Astronomical Observatory, Kunming 650011, China; 2. Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** In this paper, the variabilities of Mrk 421 and 3C 454.3 are analyzed in detail. We collect the data in  $\gamma$ -ray (100 MeV~300 GeV) and radio (15 GHz) bands, and construct their light curves. Through analysis, we find that there is a strong correlation between  $\gamma$ -ray and radio fluxes, in which the variation in the  $\gamma$ -ray band leads that in radio band for two sources. The most likely explanation of the observed time lag is synchrotron opacity in the radiation region which could be optically thick to radio emission when the flares occur. Caused by the same perturbation, the radio and  $\gamma$ -ray flares at their peaks are not observed simultaneously due to the opacity effect. The radio flare is observed only when the emission region becomes optically thin. We also find a long time fall in the light curve of 3C 454.3 in radio band after a big outburst. In the same time, the  $\gamma$ -ray flux is very faint, indicating the weakness of the activity of the jet. We consider that the fall could correspond to an expanding process of the radiation region.

**Key words:** Blazar; Mrk 421; 3C 454.3; variability