

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2014.04.08

4C 21.35 的 γ 射线光变特征及其与射电光变的相关性

王钧陶^{1,2,3}, 白金明^{1,3}, 刘洪涛^{1,3}, 王 放^{1,2,3}, 廖能惠^{1,2,3}, 范绪亮^{1,2,3}

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

摘要: 利用从 2008 年 8 月 5 日到 2013 年 10 月 23 日 Fermi-LAT 的观测数据, 对 4C 21.35 的 100 MeV 到 300 GeV 的 γ 射线数据进行了分析, 总结了 1 天 bin 情况下的光变特征, 并在 3 小时 bin 的基础上详细研究了所选的 11 个大的爆发, 得到了 5.4 h 的最短光变时标。先用对射电光变曲线减去一个线性增长, 再通过相关分析得到 100 MeV $< E < 300$ GeV 的 γ 射线光变领先于 15 GHz 射电光变 $351.2^{+13.8}_{-38.0}$ d, 并用 γ 射线辐射区对于射电辐射是光学厚对其加以解释, 从而在辐射区匀速运动的假设下得到, 这样的时延对应着 γ 射线辐射区到射电光学薄区域的距离为 $\Delta r \approx 44.4$ pc。通过与 VLBA 观测得到的 15 GHz 射电核的半径相比较, 得到辐射区向外运动过程中可能存在减速的结论。

关 键 词: 活动星系核; 类星体; 4C 21.35; γ 射线; 射电; 光变

中图分类号: P157.6 **文献标识码:** A

1 引 言

活动星系核是一类中央核区活动性很强的河外星系的核。当射电噪 (射电 5 GHz 与光学 B 波段的能流比 $F_5/F_B \gtrsim 10^{[1]}$) 的活动星系核的相对论性喷流指向我们观测者^[2, 3] 时 (通常与视线夹角 $\theta \leq 10^\circ$ ^[4]), 在观测上形成一类特殊的活动星系, 被称为 Blazar。Blazar 的能谱分布呈现双峰结构^[5, 6]。其中, 低能峰主要处在红外到软 X 射线波段 (一般认为产生于喷流中的相对论性电子的同步辐射), 高能峰主要位于 MeV 到 GeV 能段。 γ 辐射 ($E > 0.1$ MeV) 为高能峰的主要成分, 同时也主导着一个典型的 Blazar 的辐射输出^[7]。但 γ 射线的辐射机制 (轻子模型^[8-11] 和强子模型^[12, 13]) 和辐射区位置 (宽线区内^[14-17] 和宽线区外^[18-21]) 至今

收稿日期: 2014-04-01; 修回日期: 2014-05-28

资助项目: 国家自然科学基金 (11133006, 11163006, 11173054); 中科院战略性先导科技专项 (XDB09000000)

通讯作者: 王钧陶, wjt@ynao.ac.cn

仍然存在很大的争议。光变的研究 (包括光变时标、光变曲线随时间的变化、光变过程中谱形的改变和多波段光变的相关性等) 则可能揭示出辐射区的位置; 辐射区内部物理条件和结构的变化, 也可能揭示辐射过程和机制的改变, 所以对 γ 射线的光变研究变得极其重要。VLBI (very-long-baseline interferometry) 观测是目前唯一能够在毫角秒尺度上分辨 Blazar 喷流的观测技术, 因此同时研究 γ 射线与射电波段的相关性有助于确定 γ 射线辐射区的位置。特别是 γ 射线与射电源的喷出或与射电光变的相关性已在多个 Blazar 中被发现, 例如 OJ 287^[22]、PKS 1510-089^[23]、Mrk 421^[24]、3C 454.3^[24] 等。但是前人的研究结果也存在争议, 比如说在 γ 射线与射电波段谁领先的问题上^[25, 26], 因此需要进一步的分析与研究。

根据光学波段发射线的等值宽度^[27, 28], Blazar 被细分为 BL Lac 天体 (等值宽度小于 5 \AA) 和平谱射电类星体 (flat spectrum radio quasar, 简称为 FSRQ, 等值宽度大于 5 \AA)。在 1LAC (the first LAT AGN catalog) 中, Abdo 等人根据宽波段连续谱的同步峰频 (synchrotron-peak frequency) 位置^[29] 又将 Blazar 分为低同步峰 Blazar (同步峰频 $\nu_{\text{peak}} < 10^{14} \text{ Hz}$), 中同步峰 Blazar ($10^{14} \text{ Hz} < \nu_{\text{peak}} < 10^{15} \text{ Hz}$) 和高同步峰 Blazar ($\nu_{\text{peak}} > 10^{15} \text{ Hz}$)。在 2LAC (the second LAT AGN catalog) 中, 几乎所有的 FSRQ 都是低同步峰源, 而大约一半的 BL Lac 天体是高同步峰源^[30]。

4C 21.35 又被称为 PKS 1222+216, 红移为 $0.432^{[31]}$, 寄居在一个高密度星系群中^[32], 是一个瓣主导的 FSRQ (射电核与射电延展结构在 GHz 的能流比约为 $1^{[33, 34]}$)。其大尺度射电结构约 $100 \text{ kpc}^{[32]}$, 具有宽角尾 (wide-angle-tailed) 的形态^[32], 且在 VLBI 成像中显现出明显的弯曲^[35]。在其喷流内区, 观测到射电成分具有视超光速运动 ($v \approx 20 c$), 且这些子成分具有非径向的运动和垂向的加速^[36]; 同时, 还观测到来自 X 射线波段的辐射^[37]。在 GeV 波段, 4C 21.35 光子谱谱型为对数抛物线^[38], 且谱较硬^[35]。早在 Energetic Gamma-Ray Experiment Telescope (EGRET) 时代, 4C 21.35 就被探测到具有 γ 射线辐射^[7], 且此后又被列入了 Fermi 1LAC^[39], 2LAC^[30] 和监测源表 (monitored source list^①) 中。2010 年 4 月和 6 月, Fermi 空间望远镜分别观测到 4C 21.35 两次大的 GeV γ 射线爆发^[40], 日平均能流均超过了 $10^{-5} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 紧接着在 6 月 17 日, MAGIC Cherenkov 望远镜观测到了其 70 GeV 到至少 400 GeV 的爆发^[41], 具有 2 倍光变时标, 约 10 min。这极大地挑战了当前的 Blazar 辐射模型, 同时也使 4C 21.35 成为第 3 个被探测且第二远的发射甚高能 γ 射线辐射 (大于 100 GeV) 的 FSRQ (另外 2 个分别是 3C 279 和 PKS 1510-089)。随后, Tavecchio 等人^[42] 用位于宽线区外的致密区 (具有较大的多普勒因子 $\delta \approx 75$, 产生甚高能辐射) 加上一个较延展的辐射区 (或位于宽线区内, 或位于宽线区外) 来解释这次爆发的整体能谱和快速的光变; 而 Dermer 等人^[43] 提出了不同的辐射模型, 认为这些甚高能辐射产生于 pc 尺度上的高度集束的相对论性轻子 (喷流内区被加速到极高能的正子与辐射场相互作用产生中性粒子, 这些中性粒子逃逸出宽线区并与尘埃环红外辐射相互作用, 从而产生相对论性的轻子) 的级联同步辐射。此外, 有观测暗示 4C 21.35 的 γ 射线耀可能与毫米波段的视超光速子源的喷出存在相关性^[44, 45]。虽然 4C 21.35 表现出诸多奇异的特征, 但至今尚没有学者对其长期 γ 射线光变

^①http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/mssl_lc/

特征及其与射电波段的相关性进行专门研究。

本文研究了从 2008 年 8 月 5 日到 2013 年 10 月 23 日共 5 年间 4C 21.35 的 GeV γ 射线光变特征, 并且分析了其与同时时间段的 15 GHz 射电光变的相关性。

2 数据处理

2.1 Fermi-LAT 的观测和数据处理

Fermi 空间望远镜发射于 2008 年 6 月 11 日, 并于 2008 年 8 月 4 日起正式收集数据。搭载在其上的大天区望远镜 (Large Area Telescope, 简称 LAT) 是一个正负电子对转换望远镜, 探测能量范围为 20 MeV 到超过 300 GeV。相比于前代 γ 射线望远镜 EGRET, LAT 具有更大的视场 (约 2.4 sr), 更大的有效面积 (对于大于 1 GeV 的轴上光子约 8000 cm²) 和更高的角分辨率 (对于 1 GeV 的 front 类光子 θ_{68} 约 0.6°), 且约每 3 h 就可以巡天一周^[40, 46]。

4C 21.35 的 γ 射线光变数据选自从 2008 年 8 月 5 日到 2013 年 10 月 23 日的 Fermi 巡天数据, 能段为 100 MeV 到 300 GeV, 并用 Fermi 科学工具集 (v9r32p5) 和 Enrico 数据处理工具^① (整合了许多处理 Fermi 数据的 Python 脚本) 进行了细致的分析。事件类型选择为“星系点源”, 感兴趣区域半径 (Regio of Interest, 简称 ROI) 选为 10°, 源区域半径 (Source Region) 选为 20°, 最大天顶角为 100°, 仪器响应函数为 P7REP_SOURCE_V15, 银河系弥散背景模型为 gllLiem_v05, 各向同性背景模型为 iso_source_v05。选择 1 d 为一个 bin, 用单一幂律谱拟合光子数据, 再通过不分 bin 的最大似然计算 (unbinned maximum likelihood analysis), 取所有 TS > 25 (约 5 σ) 的数据点, 从而得到光变曲线和对应的光子谱指数, 如图 1 所示。我们还分析了分波段 (100 < E < 300 MeV, 300 MeV < E < 1 GeV, 1 < E < 3 GeV, 3 < E < 10 GeV, 10 < E < 100 GeV, 100 < E < 300 GeV) 的光变曲线和这 5 年间的平均光子谱, 分别如图 2 和图 3 所示。

2.2 OVRO 的观测

4C 21.35 的射电数据取自 Owens Valley 射电天文台 (Owens Valley Radio Observatory^②, 简称 OVRO) 在 15 GHz 处从 2009 年 4 月 3 日至 2013 年 10 月 22 日的监测数据^[47], 光变曲线如图 4 所示。为了支持 Fermi 空间望远镜的多波段观测计划, OVRO 40 m 射电望远镜持续观测赤纬大于 20° 的 1500 个已经确定或者候选 γ 射线噪 Blazar^[47], 观测频率为每星期 2 次, 平均不确定度为 3% (最小为 4 mJy)。

^①<https://github.com/gammapy/enrico>

^②<http://www.astro.caltech.edu/ovroblazars/index.php?page=home>

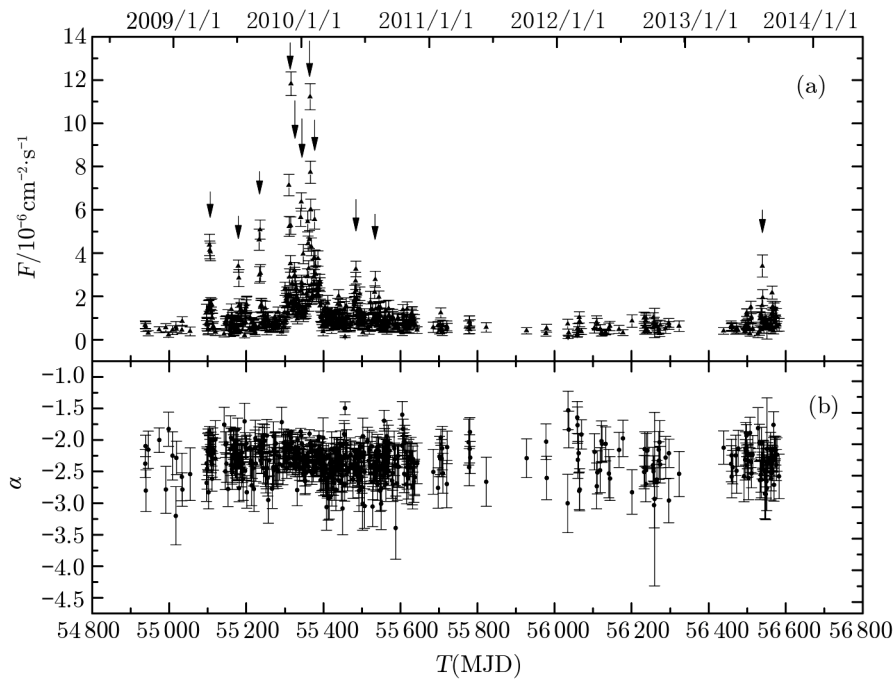


图 1 (a) 为 4C 21.35 的 $100 \text{ MeV} < E < 300 \text{ GeV}$ 的 γ 射线光变曲线; (b) 为对应的光子谱指数
箭头所示为所选的 11 次 γ 射线爆发。

3 光变分析

3.1 γ 射线光变特征

从图 2 中 4C 21.35 能量分段的光变曲线可以看出, 在所分析的 5 年间, 探测到的 100 MeV 到 300 GeV 的光子能流主要由 100 MeV 到 3 GeV 的光子贡献, 剩下波段的光子由于受到本征谱的变软和星际软光子的吸收, 明显减弱。从 $100 \text{ MeV} < E < 300 \text{ GeV}$ 的总 γ 射线光变曲线可以看出, 从 2008 年 8 月 5 日 (54 683) 到 2009 年 9 月 26 日 (55 100), 4C 21.35 一直处于能流低态; 从 2009 年 9 月 26 日起到 2011 年 2 月 8 日 (55 600), 4C 21.35 进入到一个活跃期, 其间伴随着至少 10 次显著的 γ 射线爆发; 从此以后 4C 21.35 又进入一个宁静期, 直到 2013 年 7 月 27 日 (56 500) 再次进入到较为活跃的状态。采用 2LAC 中 4C 21.35 光子谱的对数抛物线模型 ($dN/dE \propto (E/E_0)^{-\alpha-\beta \lg(E/E_0)}$, 参考能量固定为 $E_0 = 317.12 \text{ MeV}^{[23, 38]}$), 得到其在 $100 \text{ MeV} < E < 300 \text{ GeV}$ 的 γ 射线的 5 a 平均光子能流为 $(450.1 \pm 4.7) \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $\alpha = 2.21 \pm 0.01$, $\beta = 0.06 \pm 0.01$, $\text{TS} = 52\ 671$ 。此外, 为了更细致地描述其能谱, 我们还做出了其 5 年平均的能谱分布 (spectral energy distribution, 简称 SED), 并对其进行了对数抛物线拟合 (同样参考能量固定为 $E_0 = 317.12 \text{ MeV}^{[23, 38]}$), 如图 3 所示, 得到 $\alpha = 2.20 \pm 0.01$, $\beta = 0.15 \pm 0.01$, 约化 $\chi^2 = 1.23$ (对应于可能性概率约为 25%)。

从图 5 的光子能流与光子谱指数的相关图中可以看到, 在能流较低时, 光子谱较硬; 随着能流增大, 光子谱指数弥散度变大且整体有谱变软的趋势; 在能流大于 $10^{-6} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,

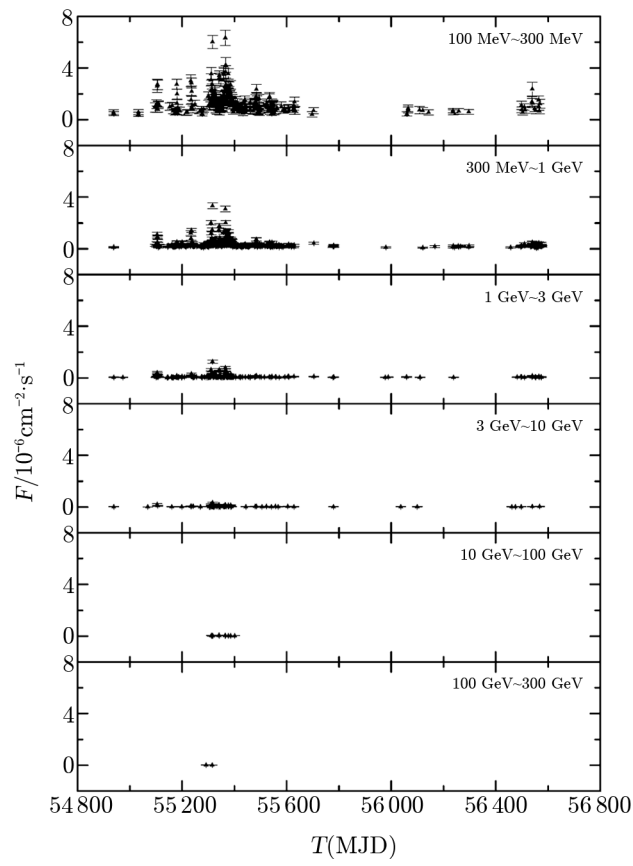


图 2 4C 21.35 的分 6 个波段的 γ 射线光变曲线

除 $100 < E < 300$ GeV 的前后 2 个数据点的 TS 分别为 13.2 和 21.3 外, 其他数据点的 TS 均大于 25。

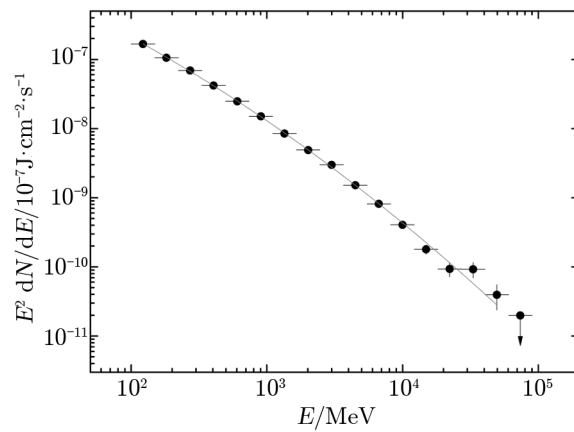


图 3 4C 21.35 的 5 年 γ 射线平均能谱分布 (SED)

箭头所示为 95% 的能流上限。红色曲线为用对数抛物线拟合的结果。

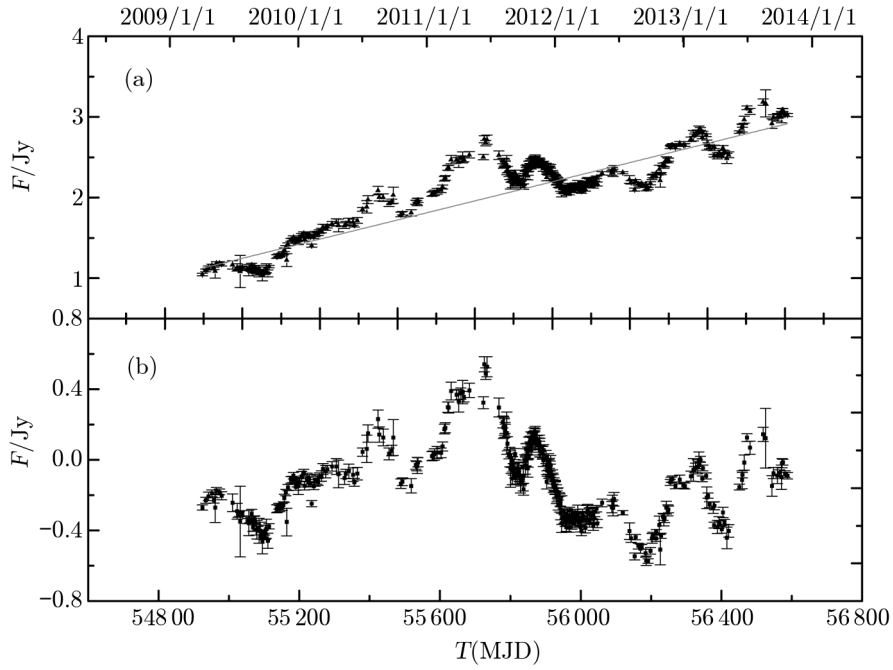


图 4 4C 21.35 的 15 GHz 射电光变曲线
(a) 真实射电光变曲线; (b) 减去线性增长后的射电光变曲线。直线为线性增长近似。

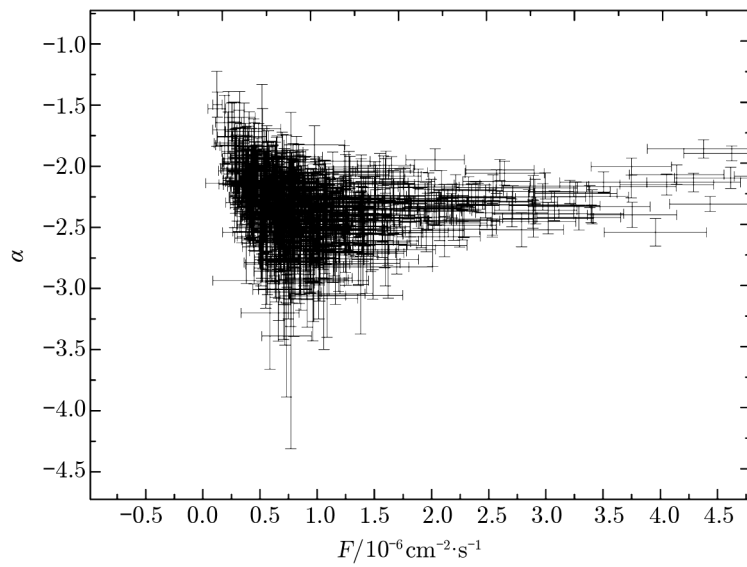


图 5 4C 21.35 的 γ 射线光子能流与光子谱指数的关系

光子谱指数弥散度逐渐减小且整体向 -2.25 附近靠近; 在能流大于 $4 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 光子谱指数的弥散度似乎又出现了先增大后减小的趋势且向 -2.0 附近靠近, 但由于此时数据点较少, 我们并不能肯定。总体来说, 光子能流较低和较大时, 光子谱较硬; 而光子能流居中时, 光子谱指数弥散较大, 可以变得很软。

我们还选择了 11 次较明显的 γ 射线爆发 (如图 1 (a) 中的箭头所示) 进行研究, 其峰值光子能流均超过了 $3 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 且大于附近宁静期光子能流的 2 倍。为了更细致地研究, 我们用 2.1 节中同样的方法处理了这 11 个爆发的 3 h 一个 bin 的光变曲线 ($100 \text{ MeV} < E < 300 \text{ GeV}$, TS 均大于 25), 并把它们与原 1 d 一个 bin 的光变曲线绘在一个图中进行对比, 如图 6 和图 7 所示。在 1 d 一个 bin 的情况下, 我们看到这些较明显的大爆发可能由 1 个孤立的爆发构成, 也可能由 2 个紧挨着的爆发所构成 (我们并不清楚这些紧挨着的爆发是否存在相关性, 只是因为它们时间上挨得太近, 甚至有些在时间上难以分开, 比如爆发 III, 我们暂且把它们画在一个图中, 名义上称作 1 次爆发)。这些爆发的上升时标在 1~3 d 之间, 主要集中在 2 d 左右; 下降时标在 1 到 5 d 之间, 主要集中在 3 d 左右。从对应的 3 h 一个 bin 的光变曲线可以看到, 以上那些天级的爆发其实一般是由多个更短时标的爆发所构成, 甚至许多在 1 d 一个 bin 的光变曲线中看似平滑的上升和下降也是由多个更短时标的爆发所构成, 比如爆发 III、IV、VII、VIII、XI。3 h 一个 bin 的光变曲线表现出复杂性 (尤其像爆发 V 和爆发 VIII), 且大部分的爆发数据点少、误差较大, 以至于我们无法用爆发函数 $(F(t) = a + \frac{b}{2^{-(t-t_0)/c} + 2^{(t-t_0)/d}})^{[48]}$ 做出可靠的拟合 (约化卡方值 $\chi_\nu \lesssim 1$)。尽管有些爆发数据点较好, 比如爆发 IV 中的第 1 个次级子爆发, 但用爆发函数所得的光变时标并不可靠^[49], 且少数的几个拟合也失去了统计意义, 况且这些爆发可能进一步由更短时标的爆发所构成^[49, 50]。对于 3 h 一个 bin 的光变数据, 我们还做出了光子能流与光子谱指数的相关图, 如图 8 所示。由于光子能流和光子谱指数误差棒较大, 我们无法得出可靠的结论, 但是从其 11 个分图中, 我们仍然看到了上面所提到的“两边硬, 中间弥散大”的分布趋势, 也就是说, 在爆发的上升或下降阶段可能存在着光子谱变软的现象。在图 6 和图 7 中箭头所指的 3 h 一个 bin 的爆发中, 最小光变时标发生在爆发 VII 中的第 7 个次级子爆发。根据公式 $F(t) = F(t_0) \cdot 2^{-(t-t_0)/\tau}$ ^[49] (其中 $F(t)$ 和 $F(t_0)$ 分别是时间 t 和 t_0 时的光子能流, τ 为 2 倍光变时标), 其上升 2 倍光变时标 $|\tau| < 5.4 \text{ h}$, 对应本征的上升 2 倍光变时标^[49] $|\tau_{\text{int}}| = |\tau|/(1+z) < 3.8 \text{ h}$ 。

3.2 γ 射线与射电光变的相关性

从 15 GHz 的射电光变曲线 (图 4 (a)) 可以看到, 4C 21.35 从 2009 年 4 月 3 日 (54924) 到 2013 年 10 月 22 日 (56587) 总的趋势是能流逐渐增长, 其间叠加有几次明显的射电爆发 (光变时标约 100 d)。其中, 长时标的总的增长趋势可能是由于喷流节点的运动方向靠近我们的观测视线 (导致多普勒因子增大) 所造成的。这种喷流节点运动方向的改变可能是由于 4C 21.35 处在一个富星系的环境中 (导致喷流与周围星系或与相对丰富的星系间物质的相互作用较强^[32]), 也可能是由于喷流与 4C 21.35 自身的致密云团相互作用造成的^[32]。为了研究 γ 射线与射电光变的相关性, 我们需要在射电光变曲线中去掉与 γ 射线无关的成分^[51], 这里即

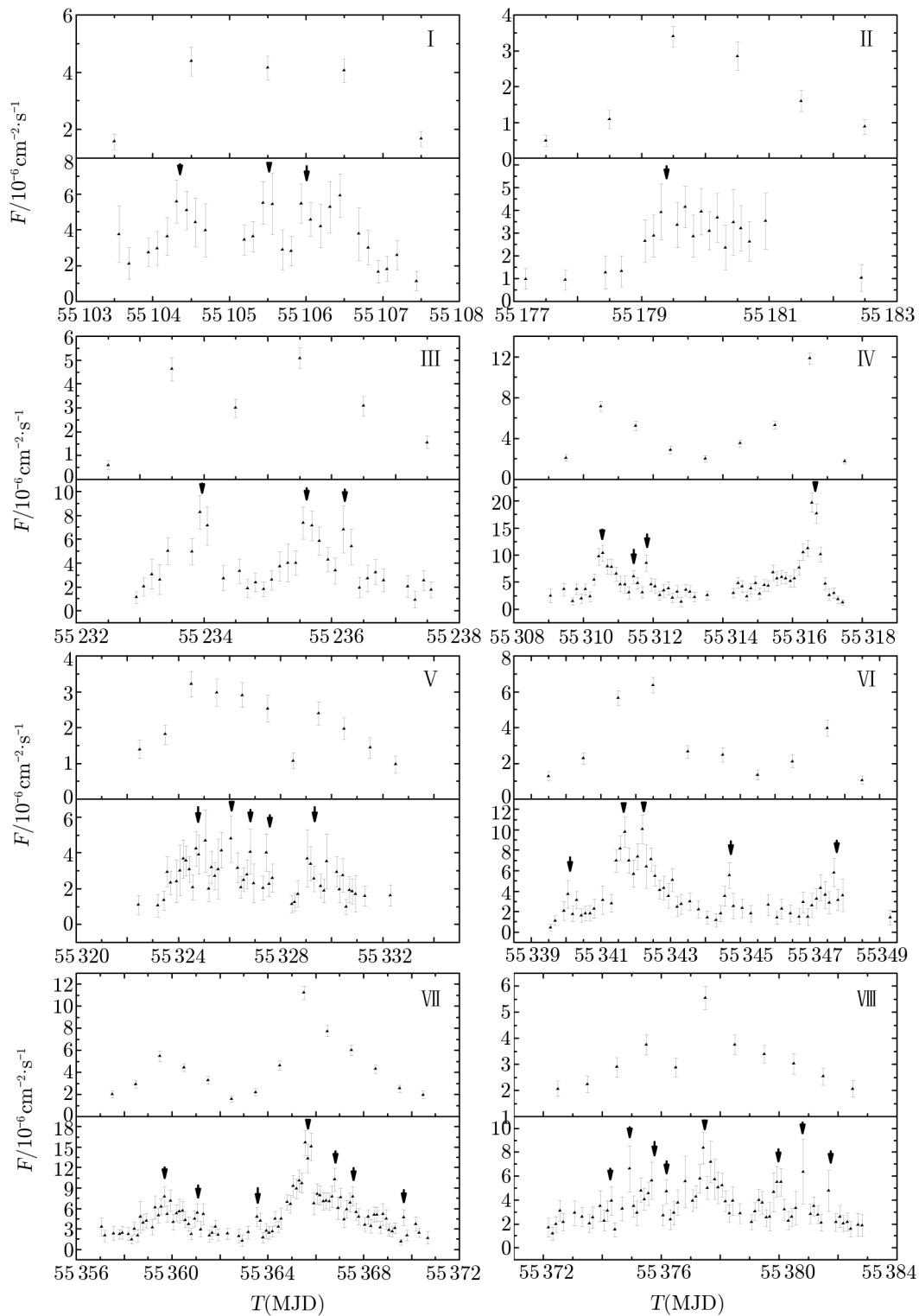


图 6 所选的 4C 21.35 的 11 次 γ 射线爆发的光变曲线

各图上半部分为 1 d 一个 bin 的光变曲线; 下半部分为对应的 3 h 一个 bin 的光变曲线。箭头所示为 3 h 一个 bin 的光变曲线中可能存在的爆发。右上角的罗马数字表示这些爆发的时间先后。

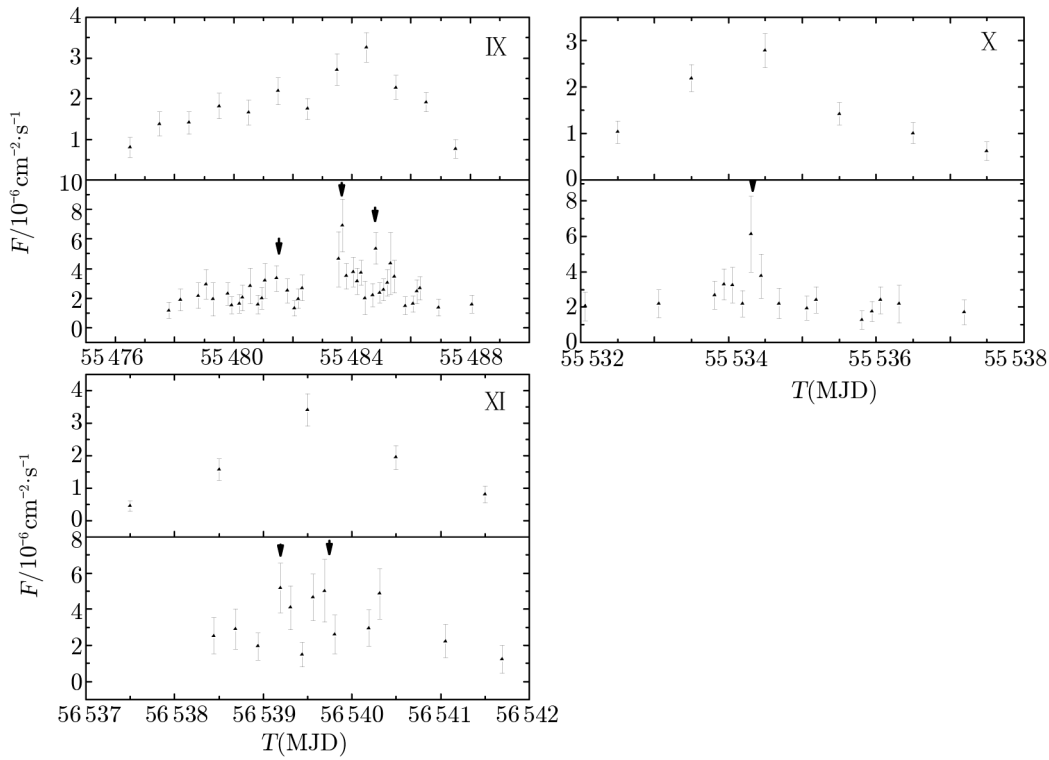


图 7 所选的 4C 21.35 的 11 次 γ 射线爆发的光变曲线 (续)

为上述可能与喷流节点运动方向相关的总的增长趋势。因为喷流中可能有多个节点的运动方向发生改变,我们暂且用一个线性增长函数(对原始射电光变曲线进行线性拟合所得,如图 4 (a) 中的红线所示)来近似描述由此造成的这 4 年多的总的增长趋势(从 MOJAVE 的 15 GHz 的观测数据^①中,我们得知这个总的增长趋势持续了至少 7 年。因为 MOJAVE 观测数据点较少,我们仍然使用 OVRO 的监测数据)。把原射电光变曲线减去这个线性的增长就得到我们将用于与 γ 射线做相关分析的光变曲线,如图 4 (b) 所示。

为了精确地得到 γ 射线光变与射电光变之间的时延,我们直接采用不依赖于模型的 FR/RSS (flux randomization/random subset selection)^[52] 方法进行 1000 次蒙特卡洛模拟,结果如图 9 所示。结果表明,4C 21.35 的 γ 射线辐射超前于射电辐射的时间为 $\tau_{\text{cent}}^{\text{FR/RSS}} = 351.2_{-38.0}^{+13.8}$ d (时延由 FR/RSS 方法计算出的 1000 次蒙特卡洛模拟的质心时延的中值确定,误差由这个中值附近 68.3% 的置信区间所确定,即 1σ 的置信区间)。为了直观比较,把图 4 (b) 中的射电光变曲线向左平移 351.2 d,并把其与 γ 射线光变曲线放在同一个图 10 中。考虑到我们只是用线性的近似来去掉可能与 γ 射线无关的射电光变,还有每次的 γ 射线爆发与相应的射电增长间的时延可能并不一致,如果能够更加精确模拟与 γ 射线无关的射电光变,比如说计算出多个喷流节点运动方向进入观测视线后所导致的射电光变的明确变

^①<http://www.physics.purdue.edu/astro/MOJAVE/sourcepages/1222+216.shtml>

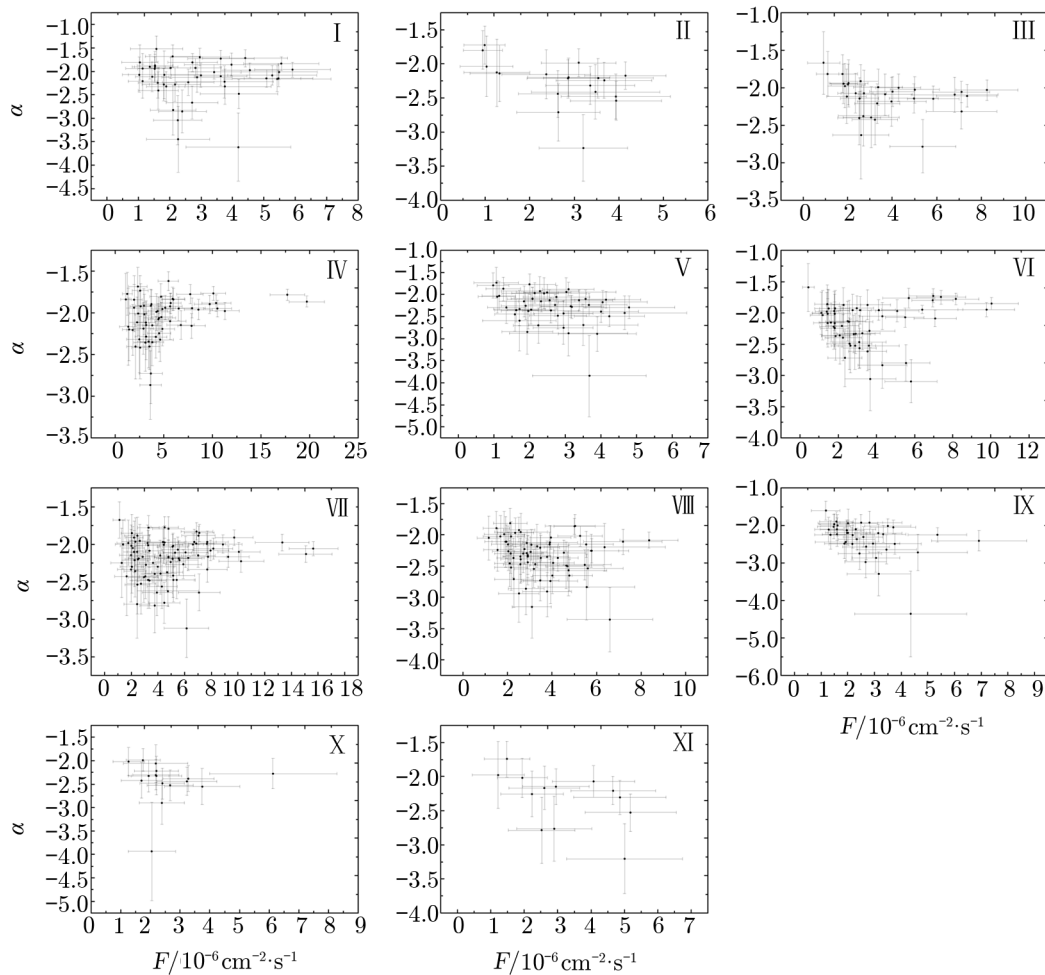


图 8 4C 21.35 的 11 次 γ 射线爆发的 3 h 一个 bin 的光子能流与光子谱指数相关图

右上角的罗马数字表示这些爆发的时间先后。

化, 有希望得到更好的结果。虽然如此, 从图 10 中我们已可以看出 γ 射线几次大的爆发与射电几次能流的增长大致能够对应上, 而在一些没有 γ 射线数据 (即 $TS < 25$) 的部分, 附近的射电辐射也相应地呈低态。由于射电光变数据的时间间隔一般大于 1 d, 我们无法得知在射电波段的每次大的爆发是否也是由多个更短时标的爆发所构成, 从而无法得知射电光变如果在每天采样的情况下是否会与 γ 射线光变曲线匹配得更好。

4 讨论与结论

我们处理并分析了 Fermi-LAT 从 2008 年 8 月 5 日到 2013 年 10 月 23 日对 4C 21.35 的 γ 射线观测数据, 总结了其 1 天 bin 情况下的光变的特征, 并在 3 小时 bin 的基础上详细研究了所挑选的 11 个大的爆发。总体来说, 4C 21.35 的 γ 射线光变显示出复杂性而没

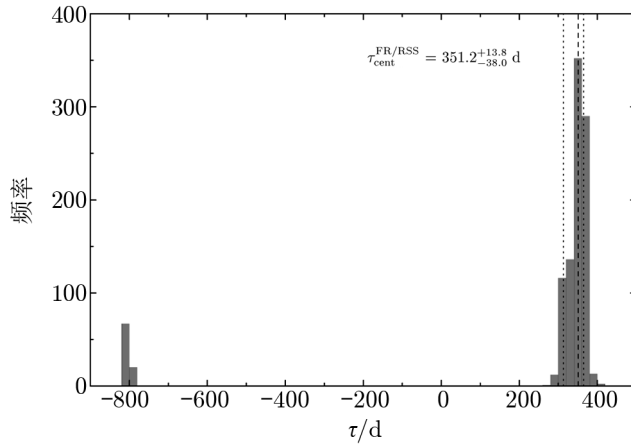


图 9 4C 21.35 的 γ 射线与减去线性增长后的射电光变的 FR/RSS 方法的蒙特卡洛模拟时延分布图
垂直虚线表示质心时延中值, 点线表示 68.3% 的置信区间。

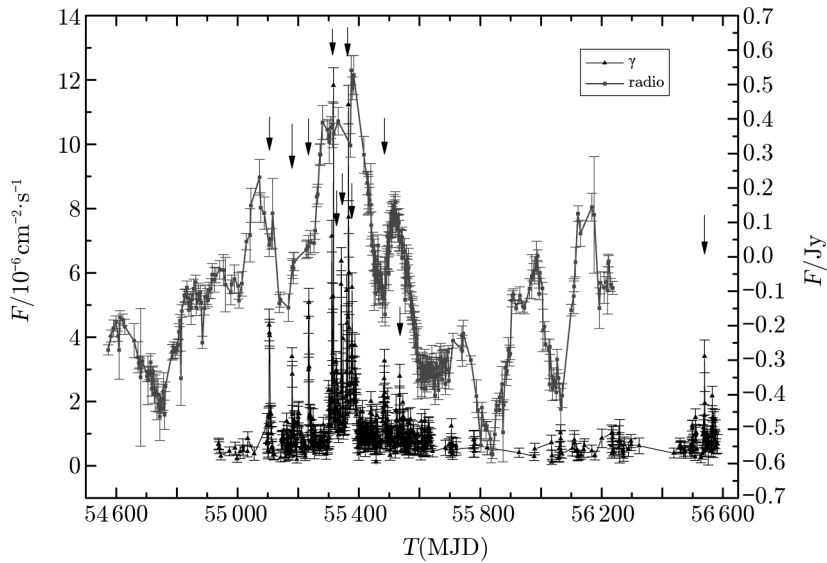


图 10 减去线性增长后的射电光变曲线向左平移 351.2 d 后与 γ 射线光变曲线的对比图
箭头所示为所选的 11 次 γ 射线爆发。

有可见的周期性, 天级的爆发一般是由多个小时级的爆发所构成。我们得到了 5.4 h 的最小光变时标, 这意味着 GeV γ 射线辐射区的尺度 $r < cd |\tau_{\text{int}}| \approx 5.9 \times 10^{15}$ cm (取洛伦兹因子 $\Gamma = 15$ ^[53], 喷流方向与观测者视线的夹角 $\theta = 4^\circ$ ^[53], 多普勒因子 $\delta = \frac{1}{\Gamma(1 - \beta \cos \theta)}$)。如果辐射区尺度与辐射区距黑洞的距离成正比, 即 $r \simeq \psi R$ (ψ 为喷流半张角, R 为辐射区距黑洞的距离), 则当 ψ 取较小的 0.1^[54] 时, $R \approx 5.9 \times 10^{16}$ cm, 仍然小于宽线区半径 $R_{\text{BLR}} \simeq 2 \times 10^{17}$ cm^[40]。Foschini 等人^[49] 采用了更短的时间 bin 对光变时标进行分析, 得

到了更小的光变时标, 约为 2.3 h。从而我们要问, 如果继续缩短时间 bin 的大小, 是否会有更短时标的爆发出? 而更短时标的光变将会对 γ 射线辐射区的大小和位置, 还有 γ 射线辐射机制提出更强的限制^[55]。我们还发现, 不论在 1 天 bin、3 小时 bin 还是在更短时间 bin^[49, 50] 的情况下, 爆发似乎是成群出现的。这些集中出现或接连出现的爆发是否在物理上具有相关性? 以上问题都需要灵敏度更高的 γ 射线探测器的投入以及更加细致的观测和研究。

我们还用对射电光变曲线减去一个线性增长的方法, 通过相关分析得到 $100 \text{ MeV} < E < 300 \text{ GeV}$ 的 γ 射线光变领先于 15 GHz 射电光变 $351.2_{-38.0}^{+13.8} \text{ d}$, 因此更加支持 γ 射线领先于射电的想法。 γ 射线辐射超前于射电辐射可以用 γ 射线辐射区对于射电辐射是光学厚来加以解释^[24, 56]: 随着辐射区域沿着喷流向外运动和膨胀, 射电光深逐渐减小, 直到射电光深 $\tau \simeq 1$, 我们才观测到射电波段的爆发。由此我们可以估计 γ 射线辐射区到射电光学薄区域的距离。根据公式 $\Delta r = \Gamma \delta \beta c \Delta t^{\text{obs}} / (1+z)$ ^[56], 其中 βc 为本征喷流速度, Δt^{obs} 为观测时延。对于 $\Gamma = 15$ ^[53], $\theta = 4^\circ$ ^[53], 得到 $\Delta t^{\text{obs}} \approx 351.2 \text{ d}$ 对应着 γ 射线辐射区到 15 GHz 射电光学薄区域的距离 $\Delta r \approx 44.4 \text{ pc}$ 。但是这里我们要注意, 计算时我们假设了辐射区是匀速运动的, 如果辐射区的运动存在加速^[57] 或者减速^[58], 那么所算得的 Δr 可能会明显大于或小于 44.4 pc。Pushkarev 等人^[59] 通过 VLBA (Very Long Baseline Array) 观测得到 15 GHz 射电核的半径为 23.41 pc, 因此, 如果我们通过相关分析所得到的时延是正确的, 那么可以得出辐射区在向外运动过程中可能存在着减速。但以上的假设和推论都需要进一步的观测事实来验证。

致谢

感谢 Fermi-LAT 和 OVRO 提供的数据支持, 感谢中国科学院云南天文台超算平台为本文的计算提供机时。

参考文献:

- [1] Kellermann K I, et al. *AJ*, 1989, 98: 1195
- [2] Blandford R D, Konigl A. *ApJ*, 1979, 232: 34
- [3] Blandford R D, Rees M J. *Physica Scripta*, 1978, 17: 265
- [4] Urry C M, Padovani P. *PASP*, 1995, 107: 803
- [5] Mukherjee R, et al. *ApJ*, 1997, 490: 116
- [6] Padovani P, Giommi P. *ApJ*, 1995, 444: 567
- [7] Hartman R C, et al. *ApJS*, 1999, 123: 79
- [8] Dermer C D, Schlickeiser R. *ApJ*, 1993, 416: 458
- [9] Ghisellini G, et al. *MNRAS*, 1998, 301: 451
- [10] Inoue S, Takahara F. *ApJ*, 1996, 463: 555
- [11] Sikora M, et al. *ApJ*, 1994, 421: 153
- [12] Mannheim K. *A&A*, 1993, 269: 67
- [13] Mucke A, Protheroe R J. *Aph*, 2001, 15: 121
- [14] Finke J D, Dermer C D. *ApJ*, 2010, 714: L303
- [15] Ghisellini G, et al. *MNRAS*, 2010, 402: 497

- [16] Poutanen J, Stern B. *ApJ*, 2010, 717: L118
- [17] Tavecchio F, et al. *MNRAS*, 2010, 405: L94
- [18] Marscher A P, et al. *ApJ*, 2010, 710: L126
- [19] Sikora M, et al. *ApJ*, 2009, 704: 38
- [20] Marscher A P, et al. *Nature*, 2008, 452: 966
- [21] Abdo A A, et al. *Nature*, 2010, 463: 919
- [22] Agudo I, et al. *ApJ*, 2011, 726: L13
- [23] Orienti M, et al. *MNRAS*, 2013, 428: 2418
- [24] 顾春霞, 周明, 王建成. *天文学进展*, 2013, 30: 4
- [25] León-Tavares J, et al. *A&A*, 2011, 532: 146
- [26] Fuhrmann L, et al. *arXiv:astro-ph/1403.4170v1*, 2014
- [27] Stickel M, et al. *ApJ*, 1991, 374: 431
- [28] Stocke J T, et al. *ApJS*, 1991, 76: 813
- [29] Abdo A A, et al. *ApJ*, 2010, 716: 30
- [30] Ackermann M, et al. *ApJ*, 2011, 743: 171
- [31] Osterbrock, et al. *ApJ*, 1987, 323: 108
- [32] Saikia D J, et al. *AJ*, 1993, 105: 1658
- [33] Kharb P, et al. *A&A*, 2004, 425: 825
- [34] Wang J, et al. *ApJ*, 2004, 615: L9
- [35] Stamerra A, et al. *arXiv:astro-ph/1111.0077*, 2011
- [36] Homan D C, et al. *ApJ*, 2001, 549: 840
- [37] Jorstad S G, Marscher A P. *Astron*, 2006, 327: 227
- [38] Nolan P L, et al. *ApJS*, 2012, 199: 31
- [39] Abdo A A, et al. *ApJS*, 2009, 183: 46
- [40] Tanaka Y T, et al. *ApJ*, 2011, 733: 19
- [41] ALEKSIĆ J, et al. *ApJL*, 2011, 730: L8
- [42] Tavecchio F, et al. *A&A*, 2011, 534: A86
- [43] Dermer C D, et al. *ApJ*, 2012, 755: 147
- [44] Jorstad S, et al. *xFermi meets Jansk. Boston: Boston University*, 2010
- [45] Jorstad S. *Parsec-Scale Jet Behavior of Blazars during High Gamma-Ray States*, 2011
- [46] Atwood W B, et al. *ApJ*, 2009, 697: 1071
- [47] Richards J L, et al. *ApJS*, 2011, 194: 29
- [48] Schweizer F W. 2004, Ph.D. thesis. Berne: Univ. Bern, 2004
- [49] Foschini L, et al. *A&A*, 2011, 530: A77
- [50] Foschini L, et al. *arXiv:astro-ph/1110.4471v2*, 2011
- [51] Liu H T, et al. *AJ*, 2014, 147: 17
- [52] Peterson B M, et al. *PASP*, 1998, 110: 660
- [53] Celotti A, Ghisellini G. *MNRAS*, 2008, 385: 283
- [54] Ghisellini G, et al. *MNRAS*, 2009, 397: 985
- [55] Nalewajko K, et al. *MNRAS*, 2012, 425: 2519
- [56] Pushkarev A B, et al. *ApJL*, 2010, 722: L7
- [57] Blandford R D, Rees M J. *MNRAS*, 1974, 169: 395
- [58] Marscher A P. *Astropart. Phys.*, 1999, 11: 19
- [59] Pushkarev A B, et al. *A&A*, 2012, 545: A113

γ -Ray Variability of 4C 21.35 and its Correlation with the Radio Variability

WANG Jun-tao^{1,2,3}, BAI Jin-ming^{1,3}, LIU Hong-tao^{1,3}, WANG Fang^{1,2,3},
LIAO Neng-hui^{1,2,3}, FAN Xu-liang^{1,2,3}

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

Abstract: Even though Blazars have been well studied at multiple wavelengths and much insight has been gained into the nature of these extreme objects, there are still numerous open issues remaining, such as the composition and formation of relativistic jets, the radiative mechanism of the high-energy part of the SED, the location of γ -ray emission region, etc. Variability studies, including the studies of variability time scale, light curve variation, spectral changes and multiwavelength correlation, could reveal the location of the emission region, the changes in the condition and structure in the emission region and the changes in the radiative processes and mechanisms. Therefore, it is essential to investigate the γ -ray variability. VLBI is the unique method to resolve Blazars on pc scale, thus the combination of γ -ray and radio studies would promote the localization of the γ -ray emission region and other research on jet properties. In particular, the connections between γ -ray flares and ejections of radio components have been found in a number of Blazars, for example, OJ 287, PKS 1510-089, Mrk 421, 3C 454.3, etc. However, there are also contradictions in previous studies, such as whether γ -ray or radio leads, so further analyses and research are required.

In this paper, the Fermi-LAT data from 5 August 2008 to 23 October 2013 has been used to investigate the γ -ray properties of 4C 21.35 between 100 MeV and 300 GeV. Specifically, the variability properties with 1-day time bins have been summarized, and 11 chosen marked bursts have been analysed in detail with 3-hour time bins. The shortest variability time scale we have got is 5.4 hours. We also use the method of subtracting a linear increase from the original radio light curve, and then correlation analysis concludes that the γ -ray variations lead the 15 GHz radio variations by $351.2^{+13.8}_{-38.0}$ days. The radio opacity in the γ -ray emission region is used to interpret the delay, and the distance between the γ -ray emission region and the region becoming transparent in radio band, $\Delta r \approx 44.4$ pc has been obtained provided that the emission region is in uniform motion. Then by comparing it with the radio core radius obtained by VLBA, a decelerating inner jet is likely to exist.

Key words: active galaxies; quasars; 4C 21.35; γ -rays; radio continuum; variability

《天文学进展》征稿启事

一、本刊刊登反映国内外天文学研究的最新进展和作者见解的述评、研究论文、前沿介绍、专题讲座、研究快报。反映新思路、新手段、新成果的短评优先发表。

二、来稿须包括：题名、作者署名、作者单位及所在地与邮政编码、摘要、关键词、正文、参考文献、英文摘要、英文关键词等。

三、来稿应论点明确、叙述精练、条理清晰、深入浅出，以利非本分支学科的读者阅读。

四、摘要应简明扼要地概括正文中的主要信息。采用第三人称的写法，不用“本文”、“作者”等作主语。稿件如果以中文发表，英文摘要应有近一页的篇幅。

五、关键词请尽可能参照 ApJ、MNRAS 和 A&A 共同采用的关键词表选用，可适当扩充。

六、稿件中引用论点、公式、图、表均需注明参考文献（按文中出现顺序编码，在右上角用小方括号标出）。正文后则按编码次序依本刊要求的编排格式列出相应的参考文献。

七、审定稿后需提供清稿样的电子文本。本刊采用中西文 Latex 系统软件排版，请从本刊网站 (<http://202.127.29.4/twxjz/index.htm>) 下载排版模版。

八、图、表务求精、简、规范，以配合文字阐明观点。公式务求精约，杜绝公式推导过程。

九、请勿一稿两投。来稿请通过 E-mail 发送至 twxjz@shao.ac.cn。

十、作者投稿至本编辑部时，就表示已把稿件的著作权转让给《天文学进展》编辑部。全体著作权人授权《天文学进展》编辑部根据实际需要独家代理申请上述作品的各种语言版本（包含各种介质）的版权登记事项。

十一、在论文中署名的每一位作者都应对文中内容负责。第一作者应保证每一位作者在投稿前都读过这篇文章，并同意署名。

《天文学进展》编辑部

2014年11月