



# 几个活动星系核的测光反响映射研究

马芹春<sup>1,2</sup>, 吴学兵<sup>1,2\*</sup>

1. 北京大学物理学院天文学系, 北京 100871;

2. 北京大学物理天文与天体物理研究所, 北京 100871

\*联系人, E-mail: wuxb@pku.edu.cn

收稿日期: 2022-11-18; 接受日期: 2023-01-19; 网络出版日期: 2023-09-14

国家自然科学基金(编号: 11721303, 11927804, 12133001)和中国载人航天工程(编号: CMS-CSST-2021-A06)资助项目

**摘要** 活动星系核(Active Galactic Nuclei, AGN)宽发射线区的大小是计算中心黑洞质量的重要参数, 通常可基于光谱反响映射测量的宽发射线辐射相对于连续谱辐射的时间延迟来得到, 但需要花费中大型光学望远镜的很多时间. 本文采用测光反响映射的方法, 使用国家天文台兴隆观测站的60-cm望远镜观测了红移在0.03左右的六个AGN. 利用宽波段V来示踪AGN的连续谱, 用窄波段OIII去示踪AGN红移后的H $\beta$ 宽发射线. 利用改进的ICCF方法(ICCF-Cut)去除掉窄波段的连续谱成分, 试图得到与光谱反响映射接近的时间延迟结果. 同时, 我们也应用了JAVELIN方法计算H $\beta$ 的时间延迟. 从六个AGN中最终发现有两个源可得到较好的测光反响映射结果, Mrk 335和3C 120的H $\beta$ 的时间延迟为 $7.8^{+8.0}_{-11.4}$ 天和 $13.5^{+13.0}_{-8.8}$ 天. 应用阻尼随机行走模型去模拟AGN的光变曲线, 发现较小的观测间隔是测光反响映射能否成功的一个关键因素. 结合观测和模拟的结果, 发现对于测光反响映射, 虽然得到的结果误差很大, 如果观测间隔较小(1–3 d)而且AGN有足够大的光变起伏, 结合ICCF-Cut和JAVELIN方法仍然可以有效地得到AGN宽发射线的时间延迟.

**关键词** 活动星系核, 超大质量黑洞, 测光, 反响映射

**PACS:** 98.54.Aj, 98.62.Js, 98.54.Cm, 95.55.-n

## 1 引言

活动星系核(Active Galactic Nuclei, AGN)是非常明亮的活动星系的核心区域, 有着非常高的光度和短时标的光变. 其典型光度可达 $10^{43} \sim 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$ , 光学波段的光变时标从几个小时到几百天不等, 表明其核心尺寸在 $10^{-4} \sim 10 \text{ pc}$  (Hazard 等人<sup>[1]</sup>; Lynden-Bell<sup>[2]</sup>). AGN的能量来源于中心超大质量黑洞(Supermassive Black Hole, SMBH)的吸积过程. 在超大质量黑洞之

外, 是一个几何薄、光学厚的吸积盘, 能够产生大量的紫外光学连续谱辐射. 在吸积盘的外面, 则是宽线区(Broad Line Region, BLR), 能够产生半高全宽超过1000 km/s的宽发射线.

由于AGN距离我们太过遥远, 很难用直接的方法去观测其结构, 所以需要其他间接的手段. 反响映射(Reverberation Mapping, RM)<sup>[3]</sup>就是非常有效而且被广泛运用的研究AGN结构的方法. 其基本原理是从吸积盘产生的光学紫外光子在经过外面的宽线区

**引用格式:** 马芹春, 吴学兵. 几个活动星系核的测光反响映射研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 100013

Ma Q C, Wu X-B. Photometric reverberation mapping of several active galactic nuclei (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 100013, doi: 10.1360/SSPMA-2022-0451

时, 部分光子被气体吸收通过光致电离作用产生宽发射线. 由于光子从吸积盘传播到宽线区需要时间, 因此AGN的连续谱的光变和宽发射线的光变之间存在一个时间延迟 $\tau$ . 通过分析这个时间延迟就可以得到对应宽线区的大小 $R_{BLR} = \tau \cdot c$ , 其中 $c$ 是光速. 如果假设宽线区中的气体运动是由中心超大质量黑洞的引力所主导的, 那么就可以通过维里定理得到超大质量黑洞的质量(Peterson等人<sup>[4]</sup>):

$$M_{BH} = f \frac{R_{BLR} \cdot \sigma_v^2}{G}, \quad (1)$$

其中 $\sigma_v$ 是宽线区的速度弥散, 可以从光谱中对谱线的测量得到.  $G$ 是万有引力常数,  $f$ 是一个无量纲的因子, 其大小取决于宽线区的几何和动力学结构(例如, Onken等人<sup>[5]</sup>, Graham等人<sup>[6]</sup>), 可以由近邻AGN的 $M_{BH}-\sigma_*$ 关系独立得到黑洞质量, 再估计出 $f$ 的值(Grier等人<sup>[7]</sup>), 其中 $\sigma_*$ 是AGN寄主星系核球的恒星速度弥散.

反响映射建立了一个AGN光度和宽线区大小的经验关系 $R_{BLR} \propto L^\alpha$ . Netzer等人<sup>[8]</sup>用光致电离模型给出其理论预测为 $\alpha = 0.5$ . 早期的RM观测中得到 $\alpha \sim 0.7$  (Kaspi等人<sup>[9]</sup>). 之后Bentz等人<sup>[10]</sup>得到了更接近于理论预测的结果 $\alpha \sim 0.5$ , 其弥散为 $\sim 0.15$  dex. 近些年的研究表明, Fe II 与H $\beta$ 的强度比所代表的黑洞吸积率也对 $R-L$ 关系有很大的影响(Du和Wang<sup>[11]</sup>).  $R-L$ 关系对于估计AGN黑洞质量和研究AGN演化有着重要的作用, 为了减少 $R-L$ 关系中的弥散, 增加对 $R-L$ 关系进一步的了解, 需要更多关于AGN宽线区的反响映射研究. 由于宽线区的大小从几光天到几百光天不等, 再加上由于红移导致的时间膨胀系数 $1+z$ , 反响映射的观测所需时间从几个月到几年不等. 传统的光谱反响映射(Spectroscopic Reverberation Mapping, SRM)需要使用中型或者大型光学望远镜对数个AGN进行几个月到几年持续的光谱观测(例如, Grier等人<sup>[12]</sup>; Bao等人<sup>[13]</sup>). 虽然光谱反响映射能够得到较为精确的结果, 但观测的AGN数目较少, 需要耗费中型或者大型望远镜的大量观测时间, 因此还需要采用别的方法去扩展反响映射的AGN样本.

测光反响映射(Photometric Reverberation Mapping, PRM)采用测光的手段, 用一个宽波段去测量AGN的连续谱, 用一个合适的窄波段去测量AGN的宽发射线, 然后测量宽发射线与连续谱辐射之间的时间延

迟, 进而计算出宽线区的大小. 测光反响映射可以使用小的光学望远镜较为有效地长期监测AGN. 例如, Haas等人<sup>[14]</sup>用一个15-cm的望远镜VYSOS-6得到了PG0003+199和Ark 120的H $\beta$ 发射线的时间延迟, 其结果与光谱反响映射的结果一致, 证明了测光反响映射方法的可行性. 除了窄波段, Jiang等人<sup>[15]</sup>用中带滤光片测光的方法测量了13个AGN的H $\alpha$ 发射线的时间延迟, Kim等人<sup>[16]</sup>也用三个中带滤光片测量了5个AGN的H $\alpha$ 发射线的时间延迟, 其结果与光谱反响映射的结果符合得很好.

在过去几年里, 我们挑选了已有光谱反响映射的6个AGN进行了测光监测. 采用宽窄波段结合的测光反响映射方法, 用V宽波段去测量AGN的连续谱, 用一个窄波段OIII去测量AGN红移后的H $\beta$ 发射线, 其目的方面是通过比较测光反响映射得到的H $\beta$ 发射线的时间延迟与光谱反响映射的结果, 来进一步验证测光反响映射的可行性和结果的可靠性. 另一方面, 通过扣除窄波段中的连续谱贡献, 来衡量窄波段中连续谱对结果的影响. 通过对不同AGN测量结果的讨论, 来研究测光反响映射方法所需的必要条件和改进措施.

## 2 观测数据

我们使用了国家天文台兴隆观测站的60-cm反射望远镜来进行测光反响映射的研究. 60-cm望远镜视场为 $18' \times 18'$ , 配备了Andor DU934P-BEX2-DD相机和UBVRI宽带滤光片. 在2016年为了开展测光反响映射研究, 我们为此望远镜购买了FLI公司的OIII窄带滤光片, 中心波长为500 nm, 带宽为8 nm. 我们用B, V这两个宽波段去测量AGN的连续谱, 其中心波长分别为440和550 nm, 带宽为95和85 nm, 用窄波段OIII去测量AGN的H $\beta$ 发射线. 为了使H $\beta$ 发射线能够恰好落在窄波段OIII所覆盖的波长范围内, 我们限制AGN的红移约等于0.03 (图1). 同时, 由于望远镜口径较小, 为了保证测光的信噪比和精确度, AGN的B波段的星等范围被限制在14–18等之间. 另一方面, 为了验证结果的可靠性和方法的可行性, 这些AGN要有以前光谱反响映射研究的结果以便与我们的结果作比较和验证, 最终挑选出了6个AGN (表1).

从2016年9月到2018年6月, 排除掉由于天气原因和季节变化导致在几个月时间内只有零散的几次观测

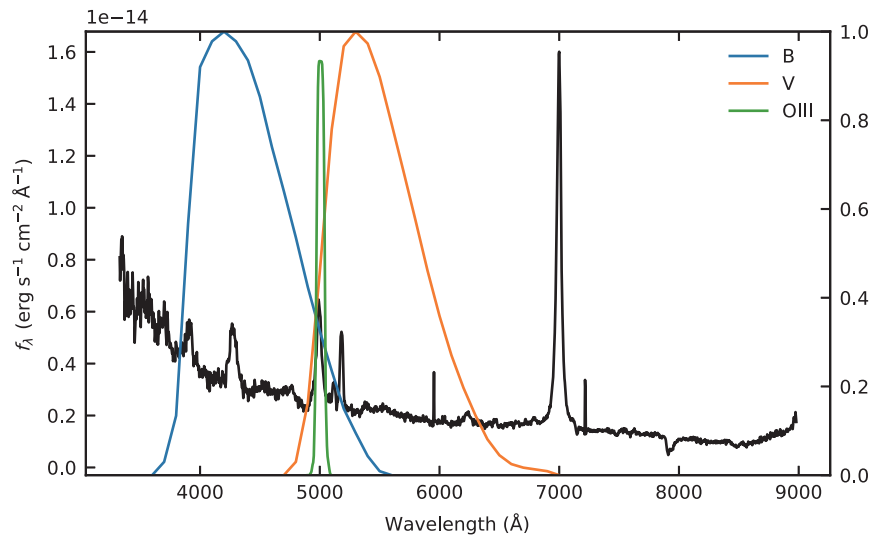


图 1 (网络版彩图) Mrk 335 的光谱以及宽波段 B, V 和窄波段 OIII 的滤光片响应曲线

Figure 1 (Color online) The spectrum of Mrk 335 and the transmission curves of the broad B, V bands and narrow OIII band.

的部分结果. 对于这 6 个 AGN, 只保留相对连续观测最多的一段光变曲线来减少由于过大的观测间隔所导致的误差. 我们采用 SExtractor 程序 (Bertin 和 Arnouts<sup>[17]</sup>), 使用与附近恒星较差测光 (Differential Photometry) 的方法, 得到这些 AGN 的 B, V 以及 OIII 波段的光变曲线. 在 2016 年 10 月我们还使用兴隆 2.16 m 望远镜拍摄对应源的光谱, 使用了 198 Å/mm 的 G4 光栅, 狭缝宽度为 1".8, 使用了 IRAF (Tody<sup>[18,19]</sup>) 标准程序进行数据处理.

### 3 计算时延的方法

为了计算 AGN 发射线与连续谱辐射之间的时间延迟, 我们首先使用的是被广泛应用于反响映射研究的 ICCF (The Interpolated Cross-Correlation Function, Gaskell 和 Sparke<sup>[20]</sup>) 方法. ICCF 使用线性插值去补全

光变曲线中的间隙, 然后计算不同延迟下两条光变曲线的相关系数, 通过分析相关系数的分布与最大值, 进而得到两条光变曲线之间的时间延迟.

为了衡量 ICCF 方法所得的时间延迟的误差与不确定度, 我们使用了 FR/RSS (Flux Randomization/Random Subset Selection, Peterson 等人<sup>[21]</sup>) 过程. FR 过程为光变曲线加入了一个以测量误差为中心的高斯分布的随机误差来衡量误差对时间延迟的影响, RSS 过程则是通过随机排除一部分光变曲线中的测量点来衡量不均匀采样所带来的不确定度. 对于每一个 AGN, 我们进行了 1000 次的蒙特卡罗 (MC) 模拟来得到其时间延迟的误差.

图 2 显示了我们用 ICCF 计算 Mrk 335 的 V 波段光变曲线与 OIII 波段光变曲线的结果, 图中的灰色阴影部分代表着经过 1000 次 FR/RSS 过程计算, 最后得到的 OIII 与 V 波段之间的时间延迟为  $3.4^{+4.1}_{-3.8}$  天. 相比光谱反响映射结果  $H\beta$  的时间延迟为  $14.3^{+4.6}_{-3.4}$  天 (Du 和 Wang<sup>[22]</sup>), 结果明显偏小. 这是因为 ICCF 直接计算了宽波段 V 与窄波段 OIII 之间的时间延迟, 但由于窄波段 OIII 内除了包含  $H\beta$  宽发射线的成分外, 也包含了一部分连续谱成分, 因而直接用 ICCF 计算得到的时间延迟相比光谱反响映射得到的结果要小.

为了去除连续谱在窄波段中的影响, 我们简单假设窄波段中的连续谱等于一个固定比例  $\alpha$  倍的宽波段连续谱. 在这种假设下, 我们用窄波段的光变曲线减去

表 1 6 个 AGN 的参数

Table 1 The properties of 6 AGNs

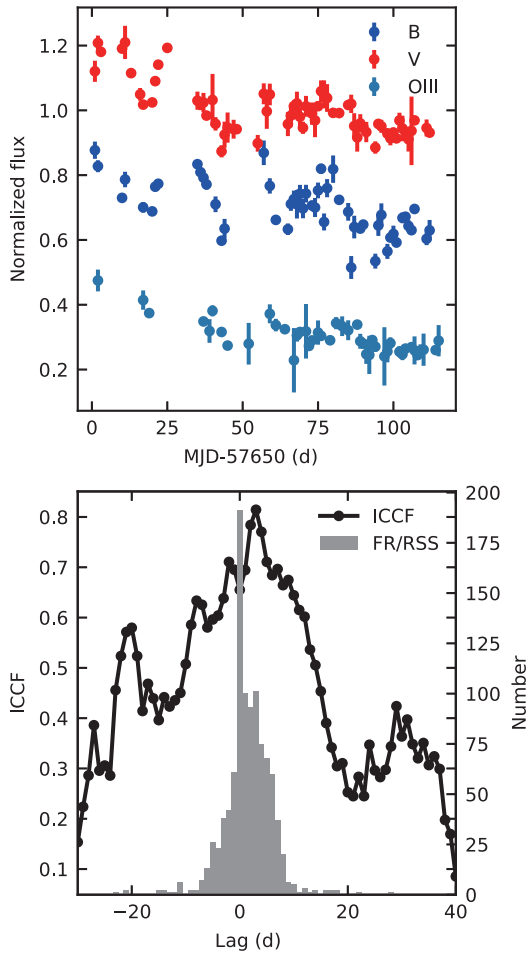
| 名称      | 红移    | B 波段星等 | 观测天数 |
|---------|-------|--------|------|
| 3C 120  | 0.034 | 15.8   | 45   |
| Ark 120 | 0.032 | 14.3   | 55   |
| Mrk 290 | 0.030 | 15.6   | 25   |
| Mrk 335 | 0.026 | 14.2   | 52   |
| Mrk 382 | 0.034 | 16.5   | 30   |
| Mrk 817 | 0.031 | 14.2   | 37   |

一个 $\alpha$ 倍的宽波段连续谱光变曲线, 来得到窄波段中的宽发射线的光变曲线(以下简称ICCF-Cut),

$$L_{H\beta}(t) = L_{\text{line}}(t) - \alpha L_{\text{cont}}(t), \quad (2)$$

其中 $L_{H\beta}(t)$ ,  $L_{\text{line}}(t)$ 和 $L_{\text{cont}}(t)$ 分别代表着 $H\beta$ 发射线、窄波段以及宽波段的光变曲线. 在实际计算过程中, 为了保证每个数据点在测光时间上的对应, 对原始数据采用线性插值的方式.

$\alpha$ 的值可以根据滤光片的响应曲线和AGN的单历



**图 2** (网络版彩图) Mrk 335的B, V和OIII波段经过归一化后的光变曲线以及V波段与OIII波段之间ICCF的结果. 上图为Mrk 335的光变曲线. 下图灰色阴影代表着1000次FR/RSS过程的时间延迟分布

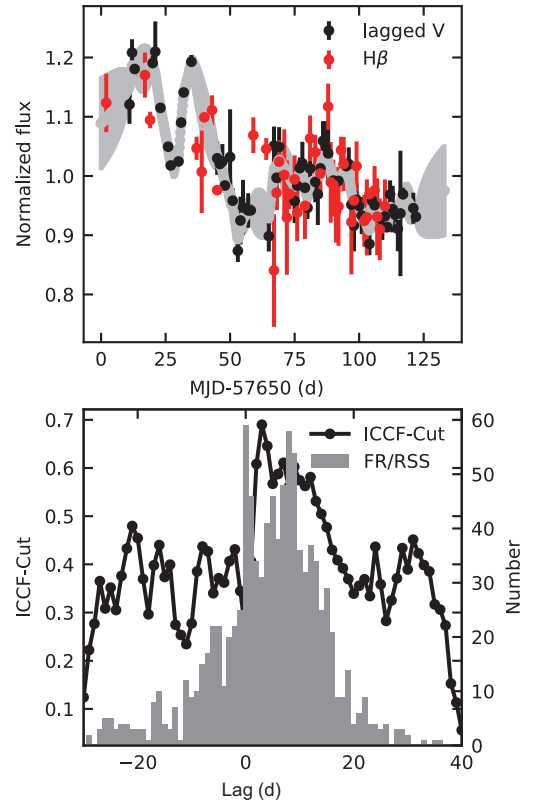
**Figure 2** (Color online) The normalized light curves of B, V and OIII bands for Mrk 335 and the ICCF results between the V and OIII bands. The top panel represents the light curves of the Mrk 335. The grey part of the bottom panel represents the lag distribution from the 1000 FR/RSS processes.

元光谱估算得到. 为了保证最后得到的每一个点都包含全部的 $H\beta$ 发射线在窄带中的贡献, 避免低估 $H\beta$ 流量, 我们采用以下公式来计算 $\alpha$ 的值,

$$\alpha = \min \left( \left( 1 - \frac{F_{H\beta}}{F_{\text{line}}} \right) \frac{L_{\text{line}}}{L_{\text{cont}}} \right). \quad (3)$$

其中 $F_{H\beta}$ 和 $F_{\text{line}}$ 代表着从单历元光谱卷积得到的 $H\beta$ 和OIII波段的流量. 对于ICCF-Cut, 我们同样采用FR/RSS过程来计算时间延迟的误差与不确定度.

我们使用ICCF-Cut得到了Mrk 335的 $H\beta$ 的光变曲线, 并计算了其于V波段的时间延迟为 $7.8^{+8.0}_{-11.4}$ 天, 见图3. 与图2的结果相比, 更接近光谱反映映射的结果. 同时, 也比较了 $H\beta$ 的光变曲线与加上相应时间延迟的V波段的光变曲线, 发现两者能够大致吻合, 进一步说明对于测光反映映射, 利用ICCF-Cut扣除掉窄波



**图 3** (网络版彩图)利用ICCF-Cut得到的Mrk 335的 $H\beta$ 光变曲线以及加上时间延迟后的V波段光变曲线比较. 上图灰色阴影代表着V波段流量不确定度的取值范围. 下图代表着 $H\beta$ 与V波段辐射之间时间延迟的分布

**Figure 3** (Color online) The light curves of ICCF-Cut  $H\beta$  and lagged V band for Mrk 335. The grey part of the top panel represents the range of uncertainty of the V band light curve. The bottom panel represents lag distribution of the  $H\beta$  and V band light curves.

段的连续谱贡献后是非常有效的.

除了ICCF和ICCF-Cut, 我们还采取了JAVELIN (The Just Another Vehicle for Estimating Lags In Nuclei, Zu 等人<sup>[23,24]</sup>)来计算两条光变曲线的时间延迟. JAVELIN假设AGN的光变曲线可由一个阻尼随机行走过程(Damped Random Walk, DRW, Kelly等人<sup>[25]</sup>)来描述, 然后用马尔科夫链蒙特卡罗模拟(Mrkov Chain Monte Carlo, MCMC)重新生成光变曲线, 进而得到两条光变曲线DRW参数的分布. JAVELIN提供了一个Pmap模式, 可以用来计算包含连续谱与发射线波段和单纯的连续谱波段之间的时间延迟. 我们用JAVELIN的Pmap模式来计算Mrk 335的光变曲线, 得到其H $\beta$ 的时间延迟的分布(图4). 我们用最大后验密度来计算这个分布所对应的时间延迟以及误差, 得到的H $\beta$ 时间延迟为 $7.1^{+21.3}_{-1.4}$ 天, 与ICCF-Cut的结果和光谱RM的结果相比要略微偏小.

除了Mrk 335, 对另一个源3C 120也能得到类似的结果. 图5显示了3C 120的光变曲线和时间延迟的分布. 其结果与光谱反响映射的H $\beta$ 延迟 $21.2^{+1.6}_{-1.0}$ 天(Hlabathe等人<sup>[26]</sup>)较为一致. Mrk 335和3C 120的时间延迟的详细结果见表2. 可以看到, 与光谱反响映射相比, 测光反响映射虽然大致与光谱反响映射的结果一致, 但误差范围要远大于光谱反响映射的结果.

我们的测光RM结果与光谱RM相比要整体略微偏小, 可能的原因是测光RM与光谱RM观测处于

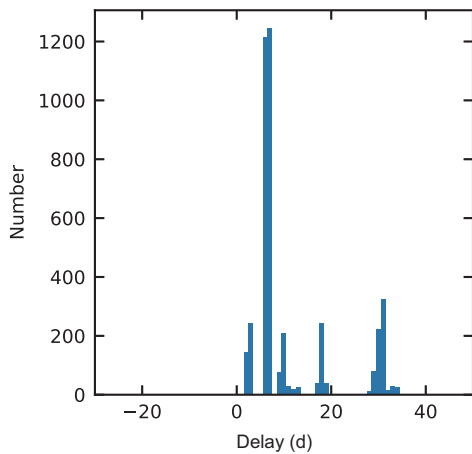


图4 (网络版彩图)利用JAVELIN得到的Mrk 335的H $\beta$ 与V波段之间的时间延迟分布

Figure 4 (Color online) The lag distribution between H $\beta$  and V band light curves for Mrk 335 obtained by JAVELIN.

不同的时期. 而对于同一个源来说, 光谱RM在不同时期都会有几天甚至几十天的差别. 例如, Mrk 335的光谱RM在2010年的结果为 $14.3^{+0.7}_{-0.7}$ 天(Grier等人<sup>[27]</sup>), 在2012年的结果为 $10.6^{+1.7}_{-2.9}$ 天(Pu等人<sup>[28]</sup>), 而我们的测光数据主要是在2016年获得的, 中间相隔几年可能是延迟不同的原因. 另一个原因是测光RM误差较大. 如果考虑到误差的范围, 测光RM和光谱RM结果之间的差别还是比较小的. Mrk 335和3C 120的结果表明, 对于测光反响映射来说, 结合比较ICCF-Cut和JAVELIN得到的结果, 可以有效地得到较为可靠的时间延迟.

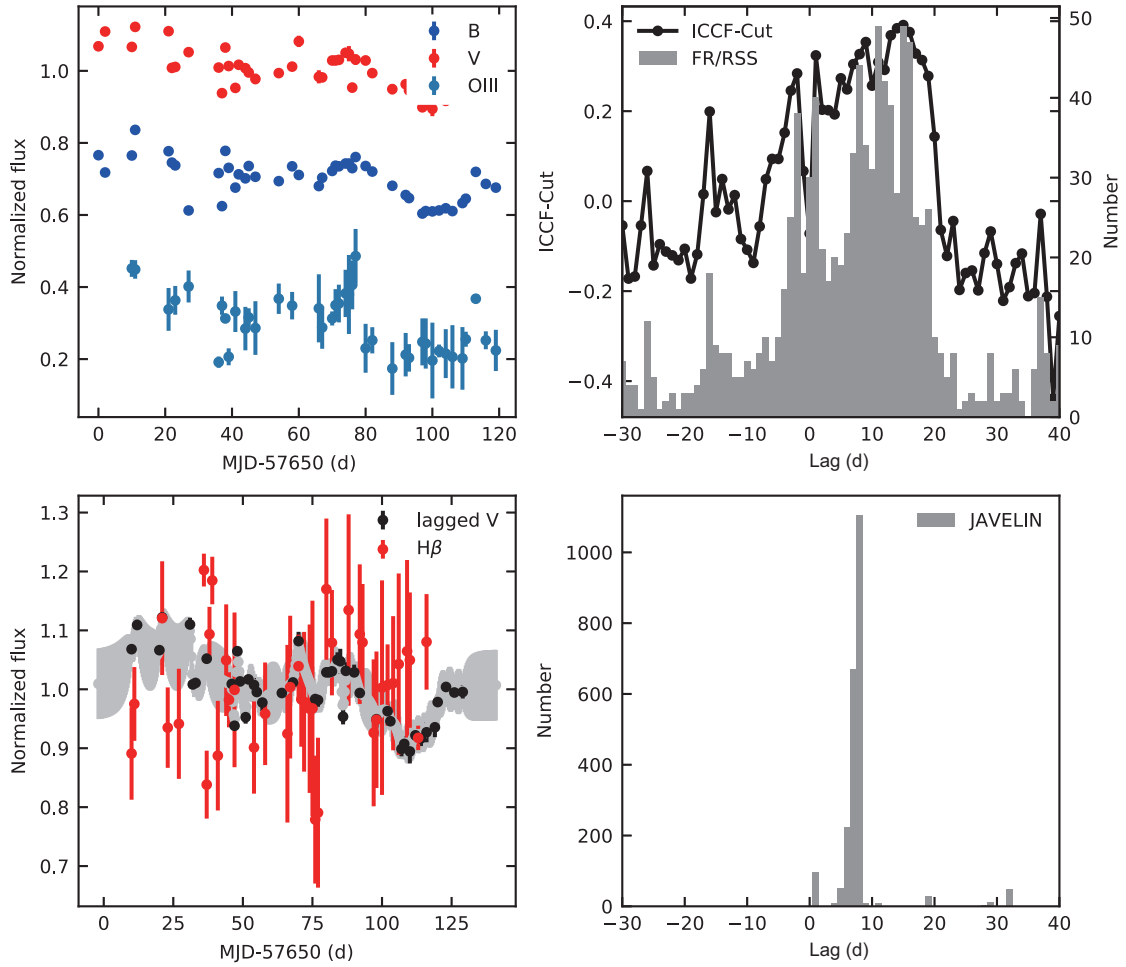
## 4 结果与讨论

在处理计算光变曲线的过程中, 考虑到B波段中包含更多的宽线区辐射的影响, 与V波段相比, 除了H $\beta$ 以外, 还包含H $\gamma$ , Balmer continuum等. 为了减少这方面的影响, 因而没有使用B波段的数据作为连续谱. 而对于V波段来说, H $\beta$ 处于边缘波长位置, 对于V波段的占比小于5%, 宽线区的影响较小, 基本可以当做是连续谱, 因而我们没有使用B波段的数据而只使用了V波段的数据作为连续谱.

利用对6个AGN开展的测光监测, 我们最终得到了2个AGN (Mrk 335和3C 120)的测光反响映射H $\beta$ 时间延迟, 与光谱反响映射的结果较为一致. 但对于其他4个AGN, 并没有得到较好的结果. 有的是由于观测数据点不够连续, 相比于时间延迟, 其观测间隔过大导致无法得到可信的结果, 如Mrk 290, Mrk 493和Mrk 817. 有的是由于在观测期间, 其光变呈现为单一性变化, 没有足够的起伏来计算出两条光变曲线之间的时间延迟. 例如Ark 120, 其光变曲线几乎是一条斜的直线, 导致计算得到的时间延迟远小于光谱反响映射的结果, 见图6.

为了进一步探究不同观测间隔对测光反响映射的影响, 我们采用模拟光变曲线的方式, 利用与实际观测相同的采样间隔, 计算在这种条件下光变曲线间的时间延迟. 我们使用DRW模型去模拟AGN的光变曲线, DRW过程可以用一个随机微分方程来描述(Kelly 等人<sup>[29]</sup>),

$$dc(t) = -\frac{1}{\tau}c(t)dt + \sigma \sqrt{dt}\epsilon(t) + br, \quad (4)$$



**图 5** (网络版彩图) 3C 120 的光变曲线和时间延迟的分布. 左上为 B、V 和 OIII 三个波段的光变曲线. 左下是利用 ICCF-Cut 得到的 H $\beta$  的光变曲线与延迟后的 V 波段的光变曲线的比较. 右上是利用 ICCF-Cut 得到的 H $\beta$  与 V 波段之间的时间延迟. 右下是利用 JAVELIN 计算得到的 H $\beta$  的时间延迟

**Figure 5** (Color online) The light curves and lag distributions for 3C 120. The upper left panel represents the light curves of B, V and OIII bands. The bottom left panel represents the H $\beta$  light curve obtained from ICCF-Cut and the lagged V band. The upper right panel represents the lag distribution of ICCF-Cut between H $\beta$  and V band light curves. The bottom right panel represents the lag distribution of JAVELIN.

其中  $c(t)$  是连续谱流量,  $\tau$  是连续谱光变的弛豫时标,  $\epsilon(t)$  是一个高斯白噪声. 连续谱的平均值是  $b\tau$ , 方差是  $\sigma\tau^2/2$ . 由连续谱光子光致电离产生的宽发射线则可以表示为

$$l(t) = \int \Psi(t - t') c(t') dt', \quad (5)$$

其中  $\Psi(t)$  是连续谱与宽发射线之间的传递函数, 我们用一个宽度为  $w$ , 强度为  $A$  的矩形函数来描述传递函数

$$\Psi(t) = \frac{A}{w} \quad \text{for} \quad \tau_d - \frac{w}{2} \leq t \leq \tau_d + \frac{w}{2}. \quad (6)$$

我们用 DRW 模型产生与观测 AGN 有着相同参数的纯连续谱和延迟了 20 d 的纯发射线的模拟光变曲线, 然后根据表 2 中 H $\beta$  在 OIII 波段的占比去组合纯连续谱和纯发射线来得到窄波段的光变曲线, 在生成模拟光变曲线的过程中, 加入了 5% 正态分布的误差来模拟测光误差. 接着, 对于每一组光变曲线, 分别采用与 Mrk 335 和 Mrk 493 一样的采样间隔, 然后用 ICCF-Cut 和 JAVELIN 计算其时间延迟. 进行 100 组模拟后得到了图 7 中的结果. 通过对比图 7 中的左右两图可以发现, 在有足够采样的情况下, 如 Mrk 335, 利用 ICCF-Cut 和 JAVELIN 可以得到正确的时间延迟. 但如果观测

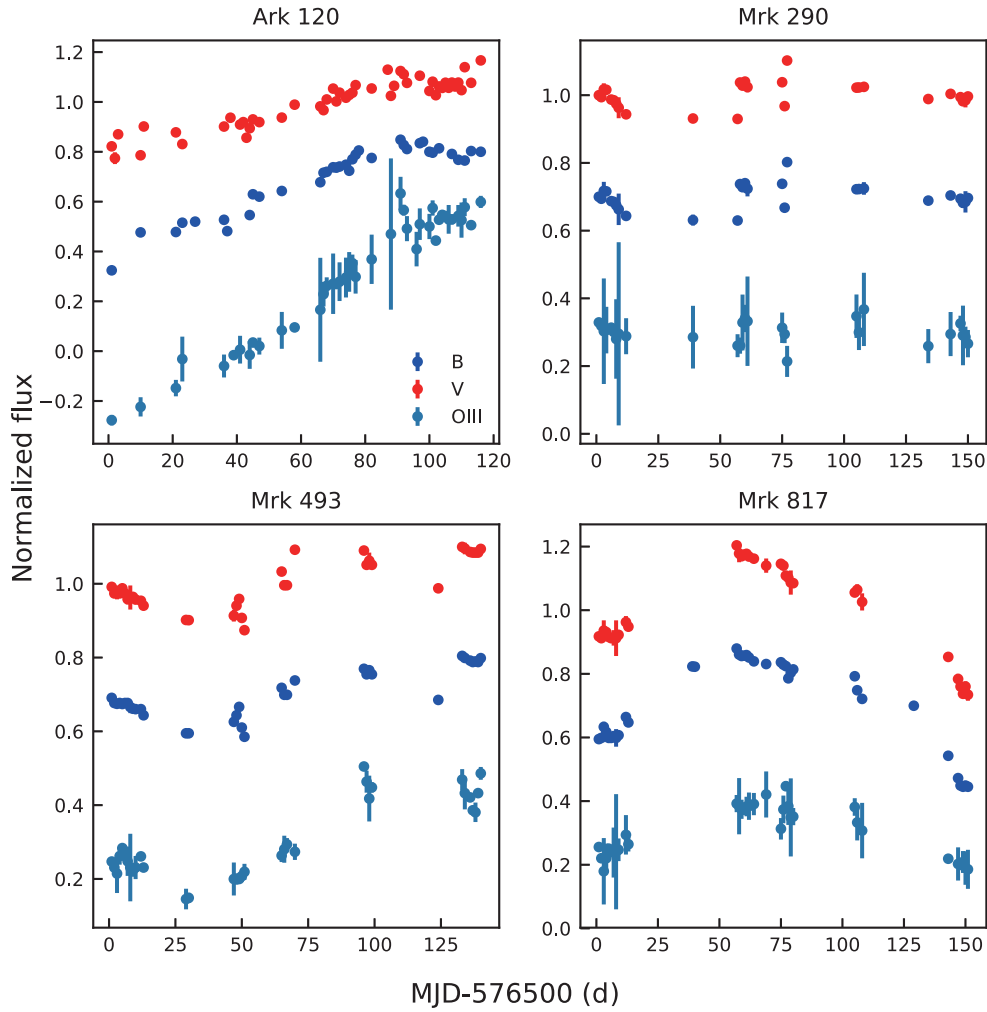


图 6 (网络版彩图) Ark 120, Mrk 290, Mrk 493 以及 Mrk 817 在 B, V 和 OIII 波段的光变曲线

Figure 6 (Color online) The B, V and OIII band light curves for Ark 120, Mrk 290, Mrk 493 and Mrk 817.

表 2 Mrk 335 和 3C 120 的  $H\beta$  在 OIII 波段所占比例、 $\alpha$  参数及时间延迟 (单位: d)

Table 2 The  $H\beta$  strength in OIII band,  $\alpha$  parameter and time lag (in days) of Mrk 335 and 3C 120

| 名称      | $H\beta$ 强度 (%) | $\alpha$ | ICCF                | ICCF-Cut              | JAVELIN              | 光谱反响映射               |
|---------|-----------------|----------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Mrk 335 | 47              | 0.066    | $3.4^{+4.1}_{-3.8}$ | $7.8^{+8.0}_{-11.4}$  | $7.1^{+21.3}_{-1.4}$ | $14.3^{+4.6}_{-3.4}$ |
| 3C 120  | 43              | 0.053    | $2.8^{+3.3}_{-1.7}$ | $13.5^{+13.0}_{-8.8}$ | $8.4^{+2.3}_{-1.5}$  | $21.2^{+1.6}_{-1.0}$ |

点的数目不够, 像 Mrk 493, 相比之下则很难得到可信度较高的时间延迟.

## 5 总结

为了尝试利用小型望远镜开展 AGN 的测光反响

映射研究, 我们使用国家天文台兴隆观测站的 60-cm 望远镜观测了红移在 0.03 附近的 6 个 AGN. 利用宽波段 V 去示踪 AGN 的连续谱, 用窄波段 OIII 去示踪红移后的  $H\beta$  宽发射线. 我们首先使用 ICCF 去计算 V 波段与 OIII 波段辐射之间的时间延迟, 发现其明显小于光谱反响映射的结果, 这表明在测光反响映射中, 连续

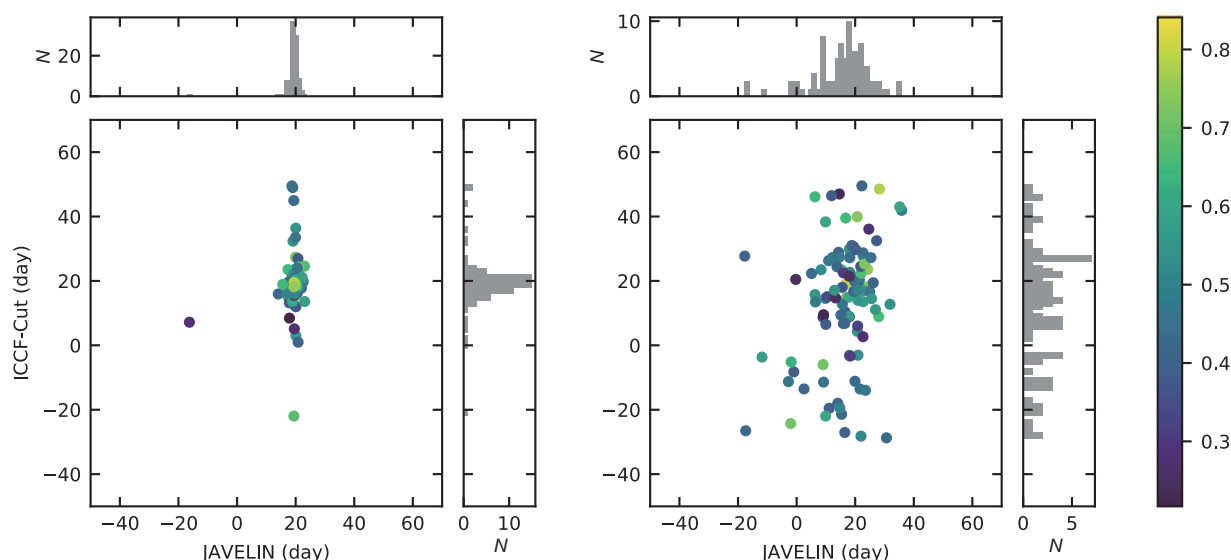


图 7 (网络版彩图)100次DRW模拟光变曲线的结果分布, 初始设定的时间延迟为20 d. 左图的采样间隔与Mrk 335一致, 右图的采样间隔与Mrk 493一致. 颜色代表着ICCF-Cut相关系数的大小

**Figure 7** (Color online) The results of JAVELIN and ICCF-Cut for 100 mock light curves with the initial  $H\beta$  time lag set as 20 d. The left and right panels are the simulations which have the same cadence as Mrk 335 and Mrk 493 respectively. The colors of points represent the peak values of the cross-correlation coefficient for ICCF-Cut.

谱在窄波段中的贡献也是明显存在且不能忽略的, 必须采取一些方法去除掉连续谱的影响, 才能准确获得窄带中发射线的流量. 我们假设窄带中的连续谱等于一个固定比例 $\alpha$ 倍的宽波段连续谱, 用修改后的ICCF-Cut方法对Mrk 335和3C 120进行测光反响映射计算, 得到了与光谱反响映射结果非常接近的 $H\beta$ 的时间延迟. 同时, 利用ICCF-Cut得到的 $H\beta$ 光变曲线也能较好地与延迟了的宽波段连续谱光变曲线保持基本一致. 此外, 我们也对这两个AGN使用了JAVELIN方法去计算其 $H\beta$ 发射线的时间延迟, 得到了与ICCF-Cut和光谱反响映射方法比较接近的结果, 在一定程度上进一步证明了这些方法的可行性和结果的可靠性. 但同时我们也注意到, 测光反响映射的结果具有比光谱反响映

射大得多的误差.

为了解释观测的6个AGN中只有2个AGN能够得到较好结果的原因, 我们采用了DRW模型去生成模拟的光变曲线, 然后比较不同采样间隔下模拟光变曲线的结果, 发现对于观测点过少的AGN, 是很难用测光反响映射得到较好的结果的. 结合比较观测的结果和模拟的结果, 我们发现如果能够有比较小的观测间隔(如1–3天)和足够大的AGN光变起伏, 对于测光反响映射来说, 仍然可以通过结合ICCF-Cut和JAVELIN方法比较有效地给出宽发射线时间延迟. 今后我们将利用合适的望远镜继续对一些AGN开展有较小观测间隔的宽窄带测光观测, 争取获得更多AGN的测光反响映射结果.

**致谢** 感谢兴隆60-cm望远镜全体工作人员的支持. 本文部分工作得到中国科学院光学天文重点实验室开放课题资助.

## 参考文献

- 1 Hazard C, Mackey M B, Shimmins A J. Investigation of the radio source 3C 273 by the method of lunar occultations. *Nature*, 1963, 197: 1037–1039
- 2 Lynden-Bell D. Galactic nuclei as collapsed old quasars. *Nature*, 1969, 223: 690–694
- 3 Blandford R D, McKee C F. Reverberation mapping of the emission line regions of Seyfert galaxies and quasars. *Astrophys J*, 1982, 255: 419–439

- 4 Peterson B M, Ferrarese L, Gilbert K M, et al. Central masses and broad-line region sizes of active galactic nuclei. II. A homogeneous analysis of a large reverberation-mapping database. *Astrophys J*, 2004, 613: 682–699
- 5 Onken C A, Ferrarese L, Merritt D, et al. Supermassive black holes in active galactic nuclei. II. Calibration of the black hole mass-velocity dispersion relationship for active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2004, 615: 645–651
- 6 Graham A W, Onken C A, Athanassoula E, et al. An expanded Mbh- $\sigma$  diagram, and a new calibration of active galactic nuclei masses. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 412: 2211–2228
- 7 Grier C J, Pancoast A, Barth A J, et al. The structure of the broad-line region in active galactic nuclei. II. Dynamical modeling of data from the AGN10 reverberation mapping campaign. *Astrophys J*, 2017, 849: 146–165
- 8 Netzer H. AGN emission lines. In: 20. Saas-Fee Advanced Course of the Swiss Society for Astrophysics and Astronomy: Active galactic nuclei. Swiss, 1990. 57–160
- 9 Kaspi S, Smith P S, Maoz D, et al. Measurement of the broad-line region size in two bright quasars. *Astrophys J*, 1996, 471: L75–L78
- 10 Bentz M C, Peterson B M, Pogge R W, et al. The radius-luminosity relationship for active galactic nuclei: The effect of host-galaxy starlight on luminosity measurements. *Astrophys J*, 2006, 644: 133–142
- 11 Du P, Wang J M. The radius-luminosity relationship depends on optical spectra in active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2019, 886: 42–60
- 12 Grier C J, Trump J R, Shen Y, et al. The sloan digital sky survey reverberation mapping project: H $\alpha$  and H $\beta$  reverberation measurements from first-year spectroscopy and photometry. *Astrophys J*, 2017, 851: 21–45
- 13 Bao D W, Brotherton M S, Du P, et al. Monitoring AGNs with H $\beta$  asymmetry. III. Long-term reverberation mapping results of 15 palomar-green quasars. *Astrophys J Suppl Ser*, 2022, 262: 14–49
- 14 Haas M, Chini R, Ramolla M, et al. Photometric AGN reverberation mapping—An efficient tool for BLR sizes, black hole masses, and host-subtracted AGN luminosities. *Astron Astrophys*, 2011, 535: A73
- 15 Jiang L, Shen Y, McGreer I D, et al. Reverberation mapping with intermediate-band photometry: Detection of broad-line H $\alpha$  time lags for quasars at  $0.2 < z < 0.4$ . *Astrophys J*, 2016, 818: 137–149
- 16 Kim J, Im M, Choi C, et al. Medium-band photometry reverberation mapping of nearby active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2019, 884: 103–115
- 17 Bertin E, Arnouts S. SExtractor: Software for source extraction. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1996, 117: 393–404
- 18 Tody D. The IRAF Data Reduction and Analysis System. In: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. Tucson, 1986. 733–749
- 19 Tody D. IRAF in the Nineties. In: Astronomical Data Analysis Software and Systems II, A.S.P. Conference Series. 1993, 52: 173–184
- 20 Gaskell C M, Sparke L S. Line variations in quasars and Seyfert galaxies. *Astrophys J*, 1986, 305: 175–186
- 21 Peterson B M, Wanders I, Bertram R, et al. Optical continuum and emission-line variability of seyfert 1 galaxies. *Astrophys J*, 1998, 501: 82–93
- 22 Du P, Wang J M. The Radius-luminosity relationship depends on optical spectra in active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2019, 886: 42–60
- 23 Zu Y, Kochanek C S, Peterson B M. An alternative approach to measuring reverberation lags in active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2011, 735: 80–96
- 24 Zu Y, Kochanek C S, Kozłowski S, et al. Application of stochastic modeling to analysis of photometric reverberation mapping data. *Astrophys J*, 2016, 819: 122–134
- 25 Kelly B C, Bechtold J, Siemiginowska A. Are the variations in quasar optical flux driven by thermal fluctuations? *Astrophys J*, 2009, 698: 895–910
- 26 Hlabathe M S, Starkey D A, Horne K, et al. Robotic reverberation mapping of the broad-line radio galaxy 3C 120. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 497: 2910–2929
- 27 Grier C J, Peterson B M, Pogge R W, et al. Reverberation mapping results for five seyfert 1 galaxies. *Astrophys J*, 2012, 755: 60–76
- 28 Du P, Hu C, Lu K X, et al. Supermassive black holes with high accretion rates in active galactic nuclei. I. First results from a new reverberation mapping campaign. *Astrophys J*, 2014, 782: 45–57
- 29 Kelly B C, Bechtold J, Siemiginowska A. Are the variations in quasar optical flux driven by thermal fluctuations? *Astrophys J*, 2009, 698: 895–910

# Photometric reverberation mapping of several active galactic nuclei

MA Qinchun<sup>1,2</sup> & WU Xue-Bing<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>*Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;*

<sup>2</sup>*Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics, Peking University, Beijing 100871, China*

The broad emission line region size of active galactic nuclei (AGN) is an important parameter for calculating the mass of the central black hole. Usually, the size is measured by spectral reverberation mapping to obtain the time lag between the broad emission line and continuum radiations, but measurement using intermediate or large optical telescopes is time-consuming. Here, we adopt another method to perform photometric reverberation mapping. We used a 60-cm telescope at the Xinglong station of the National Astronomical Observatories of China (NAOC) to observe six AGNs at redshift  $z \approx 0.3$ . We used the V broad band to trace the continuum and the narrow OIII band to trace the redshifted  $H\beta$  emission line. To eliminate the influence of the continuum in the OIII band, we assumed that the continuum flux in the narrow band is equal to a fixed fraction  $\alpha$  of the flux in the continuum band for each AGN. Under this assumption, we subtracted the continuum band flux with the ratio  $\alpha$  from the narrow-band flux and obtained the light curve of the  $H\beta$  line via the improved interpolated cross-correlation function (ICCF) method (ICCF-Cut). The extracted  $H\beta$  light curves were compared with the lagged continuum band light curves. We also used another method JAVELIN to calculate the  $H\beta$  time lags. The  $H\beta$  time lags obtained from the ICCF-Cut and JAVELIN were consistent with the results of spectroscopic reverberation mapping for two AGNs (Mrk 335 and 3C 120). The  $H\beta$  time lags obtained from ICCF-Cut were  $7.8^{+8.0}_{-11.4}$  and  $13.5^{+13.0}_{-8.8}$  d. To explain why only two of the six AGNs had good results, we used the damped random walk (DRW) model to simulate the light curves of AGNs and found that the photometric reverberation mapping required sufficient observations with high cadence. The observation and simulation results revealed that combining the ICCF-Cut and JAVELIN results may enable us to obtain reliable emission line lags for AGNs with large variability and high cadence, although the errors of lags are large.

**active galactic nuclei, supermassive black hole, photometry, reverberation mapping**

**PACS:** 98.54.Aj, 98.62.Js, 98.54.Cm, 95.55.-n

**doi:** [10.1360/SSPMA-2022-0451](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0451)