

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2018.04.04

射电宁静类星体紫外/光学光变的混合模型 研究 II: 来自 SDSS DR7 的数据支持

刘 慧^{1,2}, 李双良^{1,2}, 顾敏峰¹

(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)

摘要: 到目前为止射电宁静类星体的光变起源还不清楚, 其中一个可能的机制是吸积盘-再辐射模型。通过对斯隆数字巡天第 7 次释放数据 (Sloan Digital Sky Survey data release 7, SDSS DR7) 中 789 个经过多历元观测并且表现出变亮变蓝现象的射电宁静类星体进行分析, 发现黑洞质量较小类星体的综合相对光变谱 (残余谱/综合谱) 的变亮变蓝幅度更大; 其次, 对于比较长的光变时标, 尤其是在紫外波段, 类星体变亮变蓝的幅度也更大。吸积盘-再辐射模型对以上两个主要结果中相对光变谱都拟合得很好, 为该模型提供了进一步的支持。

关 键 词: 类星体; 光变; 吸积; X 射线再辐射

中图分类号: P158 **文献标识码:** A

1 引 言

光变作为类星体的一个重要特征, 人们对其进行了广泛的研究^[1, 2]。光变与类星体的其他特征, 如黑洞质量、热光度以及静止波长等都存在相关性^[3-8]。人们普遍认为, 类星体光学紫外波段的辐射来自黑洞周围的吸积盘, 所以研究其紫外光学光变有助于研究吸积物理。基于吸积理论人们提出了很多模型来解释类星体的光变, 例如, 吸积率变化模型^[9-11]、非均匀盘模型^[12-14]和 X 射线再辐射模型^[15-18], 但光变的起源仍存在争议。另外, 大部分类星体变亮时其光谱会变蓝 (如用 $f_\lambda \approx \lambda^\alpha$ 来拟合类星体紫外/光学的连续谱, 若 $\Delta f / \Delta \alpha < 0$, 即为变亮变蓝)^[6, 19-23], 这种变亮变蓝的现象近来成为验证各种光变理论模型的有效工具^[22, 24-26]。

2008 年, Li 和 Cao^[10] 利用标准薄盘的吸积率变化模型, 很好地解释了光变幅度与黑洞质量之间的正相关, 并定性解释了类星体光变幅度与波长的反相关, 即变亮变蓝现象, 以及

收稿日期: 2018-03-12; 修回日期: 2018-04-08

资助项目: 国家自然科学基金 (11773056, 11473054, U1531245); 中国科学院青年创新促进协会研究基金 (2015216); 中国科学院前沿科学重点研究计划项目 (QYZDJ-SSW-SYS023)

通讯作者: 刘慧, liuhui@shao.ac.cn

光变幅度与光度之间的反相关等光变特征。但是吸积率变化模型还存在仍未解决的问题, 主要包括时标和类星体变亮变蓝现象。类星体的光变时标大概是几天到几十年的量级, 而吸积率变化时标 (即黏滞时标, 对于质量为 $10^8 M_{\odot}$ 的黑洞, 在吸积盘半径为 $10^3 R_g$ 处, 黏滞时标大概为 10^3 a, 其中 R_g 为施瓦西半径) 远远大于光变时标。对类星体变亮变蓝现象, Ruan 等人^[26] 用吸积率变化模型对消光改正后的类星体相对光变谱 (残余谱/综合谱) 进行拟合, 所得结果表明, 用该模型计算的结果与观测得到的谱形不同。为了解决上述吸积盘模型的两个主要问题, 2016 年, 我们^[25] 提出了吸积盘-再辐射的混合模型。在这个新模型中, 我们首先限制了吸积盘的尺寸, 使黏滞时标被限制在光变的特征时标 (10 a) 内; 其次, 我们加入了 X 射线点源的作用, 通过 X 射线点源对吸积盘的再辐射过程来提高紫外波段的光变, 从而使相对光变谱变得更蓝。我们的研究表明, 混合模型能够对观测到的变亮变蓝现象进行更好的拟合。此外, 我们还对光变幅度与黑洞之间的正相关也给出了定性的解释^[25]。

我们还发现, 在两种情况下吸积盘对光变的贡献会消失: 即黑洞质量足够大或者观测时标足够短。这是因为, 当黑洞质量大于 $10^9 M_{\odot}$, 吸积盘最内稳定圆轨道处的黏滞时标会大于 10 a, 此时对于光变时标小于 10 a 的类星体来说, 其光变主要来自再辐射过程; 当观测时标足够短时, 类星体光变也主要来自再辐射过程。另外, 我们还计算了其他情况下的光变, 发现如果光变只是由再辐射过程产生, 光变谱会变得比较平坦 [如参考文献 [25] 中图 2d) 所示], 其结果与吸积盘模型类似 [如参考文献 [25] 中图 2b) 所示]。我们^[25] 利用 SDSS DR7 的数据对以上两种情况进行计算, 所得结果进一步验证了我们的模型。

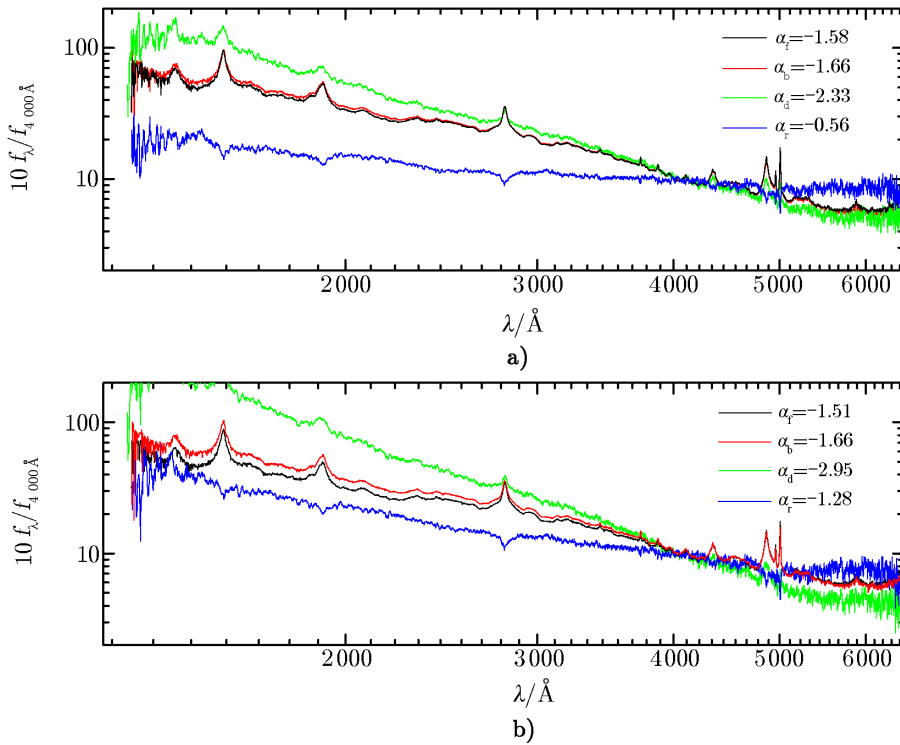
2 样 本

本文中我们用的样本直接选自参考文献[21]。为了避免因不同设备和算法导致不同数据库流量定标之间的差异, 我们只选用了 SDSS DR7 中的数据, 共选出 789 个类星体。需要说明的是, 转换到静止坐标系之前, 对这些类星体每一条光谱的波长和流量, 我们都利用消光曲线^[27] 和消光分布图^[28] 进行了消光改正。

为了选出所有显示变亮变蓝现象的类星体, 我们首先从多次观测中选出整体流量密度最大和最小的两次观测作为亮谱和暗谱, 通过两者相减得出了残余谱。使用残余谱来计算光变可以消除一些其他因素 (如星际消光等) 的影响, 用残余谱除以暗谱即可得到相对光变谱。对于每个类星体的亮谱、暗谱、残余谱, 我们使用简单的卡方检验, 并对无发射线的连续谱区 ($1350 \text{ \AA} \sim 1370 \text{ \AA}$, $1455 \text{ \AA} \sim 1470 \text{ \AA}$, $1680 \text{ \AA} \sim 1720 \text{ \AA}$, $2160 \text{ \AA} \sim 2180 \text{ \AA}$, $2225 \text{ \AA} \sim 2250 \text{ \AA}$, $4000 \text{ \AA} \sim 4050 \text{ \AA}$ 以及 $4210 \text{ \AA} \sim 4230 \text{ \AA}$) 利用幂律谱 $f_{\lambda} \approx \lambda^{\alpha}$ 进行拟合。因此, 对于每个源, 我们得到了 3 个谱指数: α_b (亮谱)、 α_f (暗谱) 和 α_d (残余谱)。本文我们主要研究类星体光变的变亮变蓝现象, 所以我们挑出 465 个残余谱谱指数 $\alpha_d < 0$, 并且 $\Delta\alpha < 0$ 的源 ($\Delta\alpha = \alpha_b - \alpha_f$, 详见参考文献[21])。在 540 个颜色变化一致 ($\Delta\alpha < 0$ 且 $\alpha_d < 0$, 或者 $\Delta\alpha > 0$ 且 $\alpha_d > 0$) 的类星体中, 具有变亮变蓝现象的比例为 86%。这一结果与前人的工作基本一致, 例如 Schmidt 等人^[22] 利用马尔可夫链蒙特卡罗算法计算发现, 大部分测光样本

中的类星体都表现出变亮变蓝现象。另外 Zuo 等人^[29] 只考虑每个类星体的最亮谱和最暗谱, 发现 70% 的类星体呈变亮变蓝现象。

我们分别给出整个样本以及变亮变蓝的样本的几何平均综合谱 (如图 1 所示)。我们先把每条光谱修正到静止坐标系下, 然后根据 $\langle f_\lambda \rangle = (\prod_{i=1}^n f_{\lambda,i})^{1/n}$ 来求得样本的几何平均综合谱 ($f_{\lambda,i}$ 为每条谱线在波长 λ 处的流量, n 代表该波长处总的光谱数量)。接着我们对所有的综合谱进行了幂律拟合, 并得到整个样本综合暗谱的谱指数 (为 $\alpha_f = -1.58 \pm 0.02$)。这一结果与 Vanden Berk 等人^[30] 的结果相符 ($\alpha_\lambda = -1.56$)。用综合残余谱除以综合暗谱, 我们得到了综合相对光变谱, 其谱指数 ($\alpha_r = -0.57 \pm 0.02$) 与 Ruan 等人^[26] 得到的光变谱谱指数接近 ($\Delta\alpha_\lambda = -0.56$)。图 1b) 显示的是变亮变蓝样本的综合谱, 其综合暗谱的谱指数 ($\alpha_f = -1.51 \pm 0.03$) 与之前的结果接近, 而其综合相对光变谱 ($\alpha_r = -1.20 \pm 0.02$) 则比整个样本的综合相对光变谱要蓝很多。



注: a) 代表整个样本; b) 代表整个样本中所有变亮变蓝的源。黑线、红线、绿线以及蓝线分别对应样本的暗谱、亮谱、残余谱以及相对光变谱, 其中相对光变谱是由残余谱除以暗谱得到的。为了显示方便, 所有综合谱都归一化到波长为 4 000 Å 处。

图 1 SDSS DR7 中类星体的综合谱

3 结 果

根据我们提出的吸积盘-再辐射模型可知, 当观测时标比吸积盘内半径处的黏滞时标还短时, 吸积盘对光变的贡献就会消失。吸积盘在半径 R 处的黏滞时标约为^[31]:

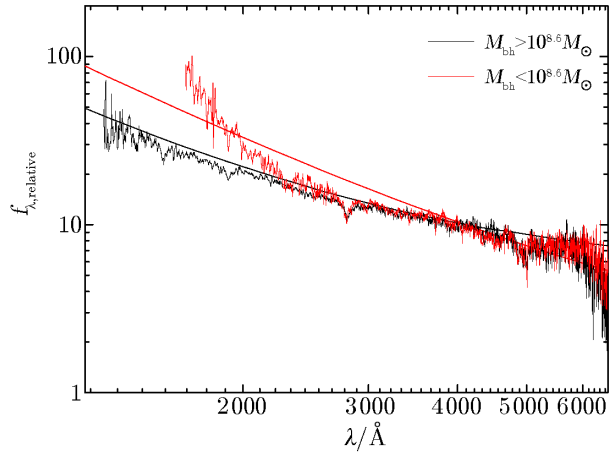
$$t_{\text{vis}} \approx \frac{1}{\eta \Omega_K} \left(\frac{R}{H} \right)^2, \quad (1)$$

其中, $\Omega_K = (GM/R^3)^{1/2}$ 为开普勒角速度, η 为黏滞系数, H 为半径 R 处吸积盘厚度的一半。在下面的所有计算中, 我们取 $\eta = 0.1$, $R/H = 10$ 。

首先, 我们对变亮变蓝样本的光变特性与模型预测的结果进行比较。此样本的黑洞平均质量为 $\overline{M}_{\text{bh}} \approx 10^{9.2} M_{\odot}$, 平均观测时标为 $t_{\text{obs}} \approx 290$ d (见表 1)。通过式 (1), 我们很容易推算出: 当内半径处的黏滞时标约等于平均观测时标时, 黑洞质量约为 $10^{8.6} M_{\odot}$ 。按照结果, 我们将变亮变蓝样本分为两组, 即 BWB1 ($M_{\text{bh}} < 10^{8.6} M_{\odot}$) 和 BWB2 ($M_{\text{bh}} > 10^{8.6} M_{\odot}$)。如图 2 所示, BWB1 的相对光变谱(红线)明显比 BWB2 的(黑线)更蓝, 这一结果与模型的预测一致, 并且这是首次发现类星体相对光变谱的谱形与黑洞质量有关。同时, 我们也利用吸积盘-再辐射模型对该结果进行了拟合, 图 2 中平滑实线代表拟合的结果。模型采用的参数值分别是: 反照率 $A = 0.9$, 吸积率变化 $\Delta \dot{m} = 100\% \dot{m}$, 以及点源的 X 射线光度 $L_* = 0.1 L_{\text{bol}}$, L_{bol} 表示点源的热光度。在这里, 为了得到满意的拟合结果, 我们将两组类星体的黑洞质量调整为 $M_{\text{bh}, \text{BWB1}} = 0.5 \overline{M}_{\text{bh}, \text{BWB1}}$ 和 $M_{\text{bh}, \text{BWB2}} = 0.2 \overline{M}_{\text{bh}, \text{BWB2}}$ 。

样本	$\overline{M}_{\text{bh}}/M_{\odot}$	$\overline{\dot{m}}$	$\overline{t}_{\text{obs}}/\text{d}$	N
全部	$10^{9.2}$	0.24	308.14	789
BWB	$10^{9.2}$	0.22	289.86	465
BWB1	$10^{8.3}$	0.31	360.67	100
BWB2	$10^{9.3}$	0.20	270.47	365
BWB11	$10^{8.3}$	0.28	86.27	51
BWB12	$10^{8.3}$	0.33	551.25	49

注: \overline{M}_{bh} , $\overline{\dot{m}}$ ($\overline{\dot{m}} = \overline{M}/\overline{M}_{\text{Edd}}$, $\overline{M}_{\text{Edd}}$ 为爱丁顿吸积率), $\overline{t}_{\text{obs}}$ 分别为黑洞平均质量、吸积率以及观测时标; N 为每组源的数目。



注: 两条黑色和红色的平滑曲线代表我们的模型拟合结果。

图 2 DR7 中变亮变蓝类星体的相对光变谱

接下来, 我们研究了观测光变时标对相对光变谱谱形的影响。为了精确计算吸积盘对光变的贡献, 我们选取了黑洞质量小于 $10^{8.6} M_{\odot}$ 的样本 BWB1。然后, 利用其平均观测时标 ($\overline{t}_{\text{obs}} \approx 180$ d) 将 BWB1 分成两部分: BWB11 ($t_{\text{obs}} < \overline{t}_{\text{obs}}$) 和 BWB12 ($t_{\text{obs}} > \overline{t}_{\text{obs}}$) (见表 1)。将这两部分类星体源的相对光变谱进行比较, 结果显示, 观测时标长的类星体的相对光变谱

更蓝，尤其是在紫外波段。如图 3 中平滑实线所示，我们的模型能够很好地对这一结果进行拟合。但是 Sun 等人^[32] 得出了相反的结果 (见第 4 章讨论部分)。此外，与图 2 一样，模型拟合过程中 BWB11 和 BWB12 的平均时标分别需要调整为 $t_{\text{obs, BWB11}} = 2\bar{t}_{\text{obs, BWB11}}$ 和 $t_{\text{obs, BWB12}} = 2\bar{t}_{\text{obs, BWB12}}$ 。

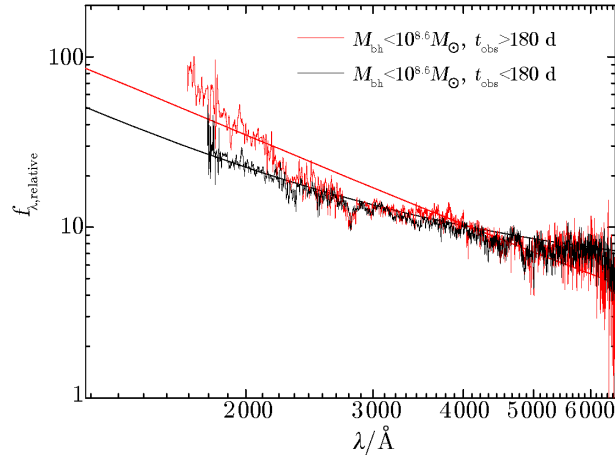


图 3 BWB1 中类星体的相对光变谱

4 总结和讨论

在参考文献[25]中，我们利用吸积盘-再辐射的混合模型来解释射电宁静类星体的光变。除了解决之前吸积盘模型的两个明显的问题——黏滞时标以及变亮变蓝现象问题，模型同时还可以解释 X 射线与光学/紫外光变之间的时延现象以及光变与时标的关系。其中，对于时延现象，我们仅利用再辐射模型^[15-18] 中 X 射线点源对吸积盘外区的再辐射过程就可以解释。而要解释光变与时标的关系，我们就需要考虑其他参数，例如吸积盘的贡献。根据吸积盘-再辐射模型，来自吸积盘的贡献与观测时标成正比关系，所以观测得到的光变随观测时标的增大而不断增大。

在第 2 章，我们利用来自 SDSS DR7 的多历元观测数据研究类星体光变的变亮变蓝现象，从而进一步验证我们的模型。观测数据显示，变亮变蓝样本的相对光变谱在黑洞质量较小，或者观测时标较长的情况下都能表现出更蓝的现象，这与我们模型的预言相一致。然而，为了得到满意的拟合效果，我们需要将图 2 中黑洞质量的值以及图 3 中黏滞时标的值稍作调整。这是因为，首先，样本的黑洞质量直接取自参考文献[33]，Shen 等人^[33] 利用宽线区半径与连续谱光度之间的经验关系来估算类星体的黑洞质量，因此得到的黑洞质量本身有 0.5 dex 的不确定度。其次，我们选取的 BWB1 和 BWB2 两组样本是按照黑洞质量 $M_{\text{bh}} = 10^{8.6} M_{\odot}$ 区分的，这个值对应的是整个 BWB 样本的平均观测时标 $\bar{t}_{\text{obs}} \approx 290$ d。然而，两组样本中都有可能存在观测时标远大于 290 d 的源，这部分源的作用使它们所在样本的综合相对光变谱

变蓝(时标越长, 吸积盘贡献越多, 相对光变谱越蓝), 因此在模型拟合过程中需要将平均黑洞质量调小。同样, 在图 3 的计算中, 我们也将观测时标的值进行适当的调整。

此外, Sun 等人^[32]通过对 r, g 波段进行研究, 发现短时标光变比长时标光变更蓝, 这与我们的结论相反。但由于噪声问题, 我们不能用 r, g 波段验证我们的预言。我们的结果与 Sun 等人不一致, 可能的原因是: 考虑一个现实的类星体, 其光变可能由很多机制共同产生, 如吸积盘-再辐射过程和非均匀盘模型等。不同的样本可能会由不同的机制占主导。Sun 等人使用了 SDSS 82 带状天区的观测数据, 他们得到的平均光变幅度约为 10%。我们则使用了 SDSS DR7 的结果。为了避免系统的噪声, 我们只选择光变幅度在 10% 以上的源, 因此我们样本的光变幅度比 Sun 等人的大很多。结果不一致的原因可能是光变幅度较大的源的光变由吸积盘-再辐射过程主导, 而光变幅度较小的源则由非均匀盘主导。根据 Cai 等人^[12]的研究, 非均匀盘模型可以用来解释 Sun 等人的结果。

参考文献:

- [1] Matthews T A, Sandage A R. *ApJ*, 1963, 138: 30
- [2] Smith H J, Hoffleit D. *Nature*, 1963, 198: 650S
- [3] Ai Y L, Yuan W, Zhou H Y, et al. *ApJ*, 2010, 716: L31
- [4] Bauer A, Baltay C, Coppi P, et al. *ApJ*, 2009, 696: 1241
- [5] Guo H, Gu M. *ApJ*, 2014, 792: 33
- [6] Vanden Berk D E, Wilhite B C, Kron R G, et al. *ApJ*, 2004, 601: 692
- [7] Wilhite B C, Brunner R J, Grier C J, et al. *MNRAS*, 2008, 383: 1232
- [8] Wold M, Brotherton M S, Shang Z. *MNRAS*, 2007, 375: 989
- [9] Gu M F, Li S L. *A&A*, 2013, 554: A51
- [10] Li S L, Cao X. *MNRAS*, 2008, 387: L41
- [11] Pereyra N A, Vanden Berk D E, Turnshek D A, et al. *ApJ*, 2006, 642: 87
- [12] Cai Z Y, Wang J X, Gu W M, et al. *ApJ*, 2016, 826: 7
- [13] Dexter J, Agol E. *ApJ*, 2011, 727: L24
- [14] Kawaguchi T, Mineshige S, Umemura M, et al. *ApJ*, 1998, 504: 671
- [15] Cackett E M, Horne K, Winkler H. *MNRAS*, 2007, 380: 669
- [16] Chelouche D. *ApJ*, 2013, 772: 9
- [17] Krolik J H, Horne K, Kallman T R, et al. *ApJ*, 1991, 371: 541
- [18] Hiroyuki T, Yuzuru Y, Yukiyasu K, et al. *ApJ*, 2006, 652: L13
- [19] Clavel J, Reichert G A, Alloin D, et al. *ApJ*, 1991, 366: 64
- [20] Cutri R M, Wisniewski W Z, Rieke G H, et al. *ApJ*, 1985, 296: 423
- [21] Guo H, Gu M. *ApJ*, 2016, 822: 26
- [22] Schmidt K B, Rix H W, Shields J C, et al. *ApJ*, 2012, 744: 147
- [23] Wilhite B C, Vanden Berk D E, Kron R G, et al. *ApJ*, 2005, 633: 638
- [24] Kokubo M, Morokuma T, Minezaki T, et al. *ApJ*, 2014, 783: 46
- [25] Liu H, Li S L, Gu M F, et al. *MNRAS*, 2016, 462: L56
- [26] Ruan J J, Anderson S F, Dexter J, et al. *ApJ*, 2014, 783: 105
- [27] Cardelli J A, Clayton G C, Mathis J S, *ApJ*, 1989, 345: 245
- [28] Schlegel D J, Finbeier D P, Davis M. *ApJ*, 1998, 500: 525
- [29] Zuo W, Wu X B, Liu Y Q, et al. *ApJ*, 2012, 758: 104

- [30] Vanden Berk D E, Richards G T, Bauer A, et al. AJ, 2001, 122: 549
[31] Kato S, Fukue J, Mineshige S, eds. Black-Hole Accretion Disks. Kyoto: Kyoto Univ Press, 1998: 39
[32] Sun Y H, Wang J X, Chen X Y, et al. ApJ, 2014, 792: 54
[33] Shen Y, Richards G T, Strauss M A, et al. ApJS, 2011, 194: 45

Further Support from SDSS DR7 Observations to Accretion Disk-irradiation Hybrid Model for the Optical/UV Variability in Radio-quiet Quasars

LIU Hui^{1,2}, LI Shuang-liang^{1,2}, GU Min-feng¹

(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)

Abstract: The study on optical/UV variability can help to explore the accretion physics for the reason that the emission at optical/UV band is believed to come from a thin accretion disk around the central black hole. However, the origin of variability in radio-quiet quasars remains unclear so far. In 2016, we upgraded the accretion disc model, which assumed the variability is caused by the change of global mass accretion rate, at two points. Firstly, we constrained the disc size to match the viscous timescale of accretion disc to the variability timescale observed. Secondly, we included the irradiation/X-ray reprocessing to make the emitted spectrum become steeper.

In this work, we try to further validate the accretion disk-irradiation hybrid model which was produced before. We compile a sample of 465 variable radio-quiet quasars, showing a bluer-when-brighter (BWB) trend, with multi-epoch observations in Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 (SDSS DR7). It is the first time we find the composite relative difference spectra of quasars with a BWB trend is much bluer when the black hole mass is small. In addition, the spectra observed are also found to be bluer for longer time-scale observed, especially at UV band. In order to fit the observed spectra well, the values of black hole mass and the observed time-scale have to be moderately modified because of the large scatter of black hole mass estimations. We demonstrate that these two main results can be qualitatively fitted by accretion disk-irradiation hybrid model, providing further support for this model.

Key words: quasar; optical variability; accretion; X-ray reprocessing