

# 利用 ZTF 数据研究 SDSS Stripe 82 天区的类星体

物理学院 2018 级 刘兆轩

**摘要：**本项目利用加州理工学院的 ZTF 望远镜观测数据研究了 SDSS Stripe 82 天区 3740 个类星体的颜色光变。ZTF DR6 数据库平均 2 年在 g、r 两个波段有 100 个以上的观测点，为我们提供了这些源的丰富测光数据。区别于前人大多使用的 SDSS 数据库，ZTF 的数据库在时间采样率上有明显的优势，我们借此得到了不确定度更小的颜色光变。在经过数据筛查之后，我们确认了前人针对类星体颜色越亮越蓝的结论，我们也发现这个趋势会受到红移与观测波段的影响。在消除红移对颜色光变的影响后，我们验证了前人发现的类星体颜色光变不依赖于类星体黑洞质量和爱丁顿吸积率的观点。这表明类星体的吸积率并不能完全解释类星体的光变。本课题对 ZTF 数据的处理方法可以用于 2022 年后正式运行的 LSST 望远镜上，有望用更准确的数据得到更准确的结论。

正文：

## 一、引言

类星体是一种极端明亮的活动星系核。它的辐射覆盖射电波段到X-ray或gamma-ray波段，这归功于中心的超大质量黑洞和周围的气体吸积盘。类星体的活动可以表现在它的亮度上。它的亮度是会变化的，光变时标小到几小时(Stalin et al. 2004; Gupta et al. 2005)，大到几个月(Giveon et al. 1999; Collier & Peterson 2001; Vanden Berk et al. 2004; Rengstorf et al. 2004; Sesar et al. 2007; Bramich et al. 2008; Wilhite et al. 2008; Bauer et al. 2009; Kelly et al. 2009; Kozlowski et al. 2010)。利用吸积盘不稳定性(Rees 1984; Kawaguchi et al. 1998; Pereyra et al. 2006)和物质掉落至吸积盘(Hopkins et al. 2006)等可以解释短时标的光变。黑洞吸积盘的阻尼随机行走模型(DRW)(Zu et al 2013)等可以用来解释较为长期的光变现象。前人的研究表明，类星体的整体光变是由黑洞吸积盘的热涨落主导的，而黑洞吸积盘很难被我们直接观测，因此，利用类星体的光变来研究吸积盘模型是一种很好的手段。

我在本项目中使用 Zwicky Transient Facility(ZTF)的观测数据来研究 SDSS Stripe82 天区类星体颜色光变 (Color Variability) 及其与黑洞的一些物理参数如黑洞质量、爱丁顿吸积率之间的关系。颜色光变 (Color Variability) (Schmidt et al 2012)指的是某波段流量随色指数 g-r 的变化规律。与前人使用的 SDSS 数据不同，ZTF 的数据采样率更高，时间间隔更短，会帮助我们对前人工作在更小的时间尺度上加以印证，也会对 ZTF 的后继者 LSST 的相关研究提供思路与方向，我得到的结果也会对研究黑洞吸积盘理论模型提供一定的帮助。

## 二、ZTF DR6 数据筛查与处理

我选取的源来自于SDSS Stripe 82天区。斯隆数字巡天项目 (Sloan Digital Sky Survey, SDSS)( Stoughton et al. 2002; Gunn et al. 2006) 创建了有史以来最详细的宇

宙三维图，它涵盖了1/3的星空，记录到超过三百万个天体的数据，为天文工作者提供了丰富的数据与结果。SDSS Stripe 82天区是在天赤道附近赤纬 $2.5^\circ$  宽，赤经 $120^\circ$  长的一个天区。SDSS ugriz 5个波段都对这片区域有很频繁的观测，这使得这片天区的源有非常丰富的资料以供参考，能为我们的工作提供丰富的类星体的物理参数。将SDSS Stripe 82天区的变源表(Ivezić *et al.* 2007 A)与SDSS DR16q Catalog(Lyke *et al.* 2020)交叉之后，我得到了7929个目标类星体。

我选取的数据库是 Zwicky Transient Facility(ZTF)望远镜的 Public Data Release 6 (DR6)。ZTF 望远镜坐落于美国加州的 Palomar 天文台，是一个大视场巡天设备。它拥有与 SDSS 相近的 g、r、i 波段，能在可见光和近红外范围内探测有迅速光变的暂现源，如超新星、伽马暴、中子星并和事件等。因为它的口径只有 1.2 米，所以会有很大的视场，有极高的巡天速度，能够在三个夜晚拍完整个北天区。它相比 8 年 60 个观测点的 SDSS 巡天在更短的时间内有更多的数据点，大概两年多可以在 ZTF g、r 两个波段产生 100 多个点。这意味着它有更高的采样率，可得到更完整的光变曲线，从而能够更准确的计算光变和颜色光变的结果，也能得到小时间间隔的更准确的结构函数。它的数据每一季都会更新，为了快速更新我的数据库，我和师兄写了一个方便更新 ZTF 数据、快速生产光变曲线库的脚本。<https://github.com/RaInLiu/ZTFMultiObjectTool>

我利用光变曲线来研究类星体的颜色光变。首先，我对这些源的光变曲线做了些处理。从图 1a,b 两张图的对比，我们可以发现 b 的光变曲线情况明显好于 a。这是因为 ZTF 望远镜的口径只有 1.2m，拍不了太暗的源，所以为保证数据质量我将光变曲线星等平均值大于 20 等的源都舍去了，最后留下 3789 个类星体。

其次，因为 ZTF 主要是发现和研究超新星的，有时候会在某一天多次观测一个天区，如图 1a 中红框所示，这样会在一天内产生许多数据点。这些点对于类星体光变来说并不可信，而且由于 ZTF 测光方式是较差孔径测光，这些点的光变可能是孔径内其他源的光变所致，所以我们有理由怀疑是不准确的。因此，我对所有源的光变曲线重新取 bin，对 bin 内数据点做算术平均，得到 3 天一个点的光变曲线。而且，我还效仿 Wenwen Zuo 的方法(Zuo *et al.* 2012 *ApJ*)，对光变曲线做了数据清理，将偏离曲线平均值 5 个标准差的点全部去除。

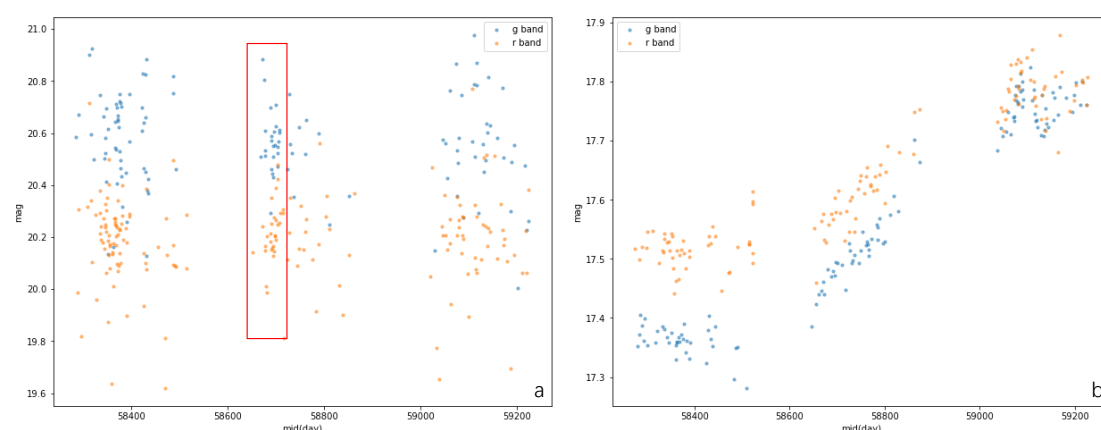


图 1.——展示了两个类星体的 ZTF g、r 两个波段的光变曲线。图 a 的类星体选自 g 波段 20 等以上的样本，图 b 的类星体选自 g 波段 20 等以下的样本。图中蓝点表示 g 波段的光变曲线，橙点表示 r 波段的光变曲线。红色长方形区域表示的是一次典型的 ZTF 短时间大量观测的现象。

### 三、颜色光变的计算

在处理好光变曲线后，我开始计算颜色光变。参照文献(Schmidt *et al.* 2012)，我将  $g-r$  颜色指数随  $g$  波段星等的变化关系  $s_{gr}$  定义成颜色光变：

$$r - \langle r \rangle = s'_{gr}(g - \langle g \rangle) + b \quad (1)$$

$$g - r = -(s'_{gr} - 1)(g - \langle g \rangle) + B \quad (2)$$

$$s_{gr} = (s'_{gr} - 1) \quad (3)$$

从公式可以看出，我是先对  $g$  和  $r$  的关系进行线性拟合，再按照线性关系换算成  $g-r$  和  $g$  的关系的。这种处理有两个好处：第一是方便处理误差，现在的误差可以直接用斜率  $s'_{gr}$  的误差；第二是考虑到对于天文观测来说，源越暗观测误差越大，若直接计算颜色光变会导致曲线误差过大。

图 2 就阐述了为何采取公式 1 的计算方法误差会更小。如图 2a 所示，天文的测光数据，一般越暗误差越大，a 图显示的就是理论上的  $gr$  线性关系，加上观测的影响（二维高斯作为误差），对应于  $gr$  空间的点。我们可以发现，虽然略微发散，但整体上依然呈现明显的线性关系。然而把  $gr$  空间中的点映射到  $g-r$  vs  $g$  空间中，我们会得到一条二次曲线（图 2b），如果我们在  $g-r$  vs  $g$  的空间中拟合该数据，会得到很差的线性关系。图 3 粗略的阐释了数据的松散程度，两条直线中间的区域就代表着存在着二维高斯误差的情况下数据点可能存在的区域，我们可以发现图 3a 的松散程度明显好于图 3b，这也意味着更准确的线性关系。综上所述，我最后选择了公式 1 作为计算公式来估计颜色光变。

在计算颜色光变拟合曲线时，考虑到  $g$  和  $r$  波段星等都存在观测误差，为了得到数学上更合理的直线斜率和误差，我使用了蒙特卡洛一卡尔可夫链拟合的方法(Hogg *et al.* 2018)。考虑到可能存在的离群点会破坏拟合结果，我参照 Hogg 的方法，将似然函数分为内群点和离群点部分进行拟合，最终的拟合误差我定义为模型的一个标准差值。图 4 是一个其中一个源的拟合实例。

在做完直线拟合后，我对颜色光变的误差进行了统计，发现绝大部分的源的误差小于 0.2(图 5)。考虑到 ZTF 望远镜本身的测光并不是很精准，而且有些源可能受测光的影响导致结果并不好，我决定去除总误差平均值 3 个标准差之外的点。经过这一步处理，最终我筛选得到 3740 个类星体的颜色光变。

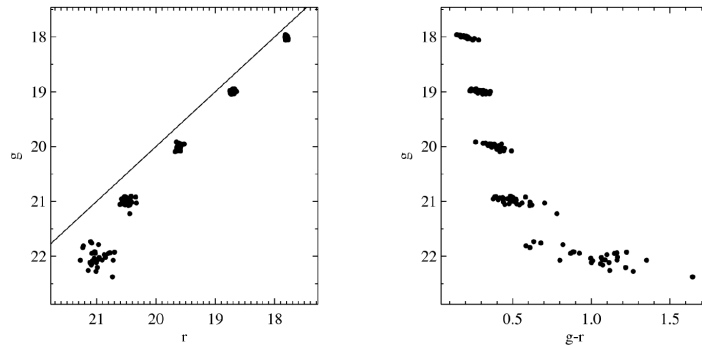


图 2。——说明星等和颜色之间的误差协方差的影响的模拟数据图。左图显示了  $g-r$  空间中从  $g=18, 19, 20, 21$  和  $22$  处的二维高斯分布绘制的 5 个模拟观测“云”，其测光误差分别为 0.02、0.025、0.04、0.06 和 0.15。在右图中，这些数据绘制在  $g-(g-r)$  空间中。条纹状图形是由于  $g$  星等误差与  $g-r$  颜色误差之间的相关性造成的。(Schmidt *et al.* 2011)

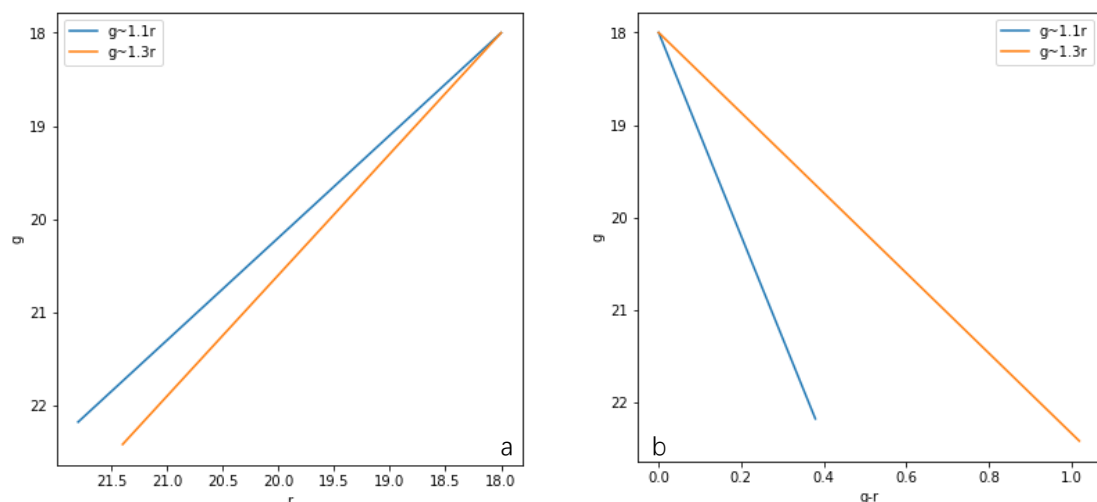


图 3. ——数据松散程度的模拟结果展示图。a 图中蓝橙两线分别为  $g \sim 1.1r$  和  $g \sim 1.3r$  在  $g-r$  空间中的表示区域, 它们相交于点 (18, 18)。b 图展示的是两线在  $g-(g-r)$  空间的表示区域。两图所夹的区域为我们可能观测到的数据点, 可见 a 图数据松散程度远小于 b 图。

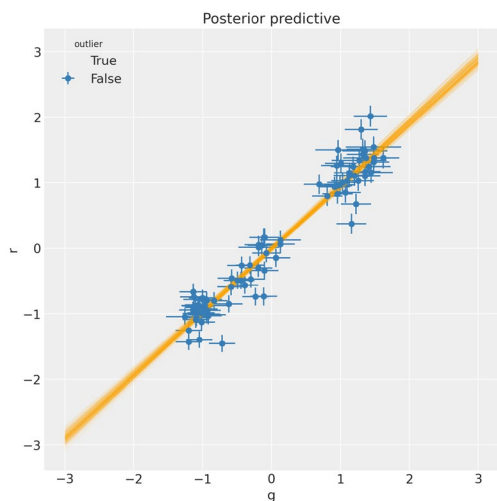


图 4. ——类星体 SDSS 000011.96+000225.2 的光变曲线的颜色光变拟合结果。蓝色点表示的是光变曲线映射到  $g-r$  空间后再进行标准化所得到的点。黄色线显示的是蒙特卡洛-卡尔可夫链拟合的 1000 条拟合结果。

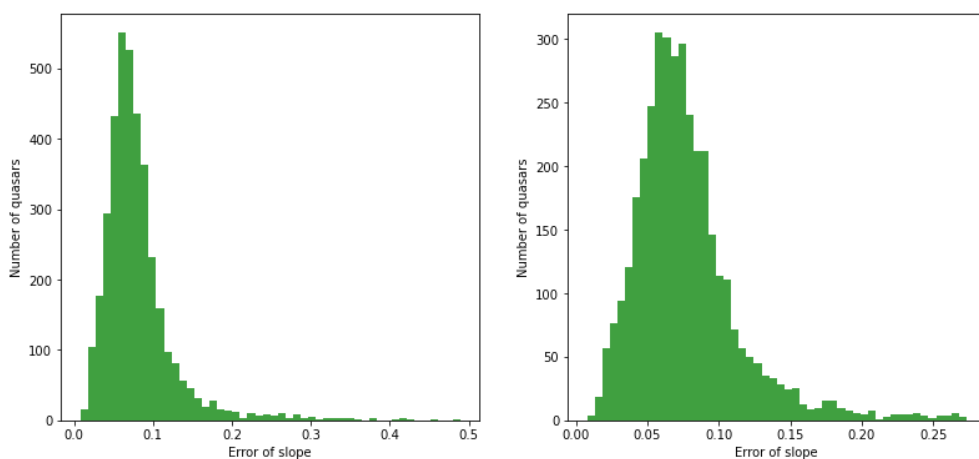


图 5. ——颜色光变误差直方图。左图是 3789 个类星体的颜色光变不确定度的统计直方图。右图是去除偏离平均值三个标准差之外的点后得到的 3740 个类星体的颜色光变不确定度的统计直方图。

#### 四、对颜色光变的分析

为了研究颜色光变的物理机制，我将得到的颜色光变表与 SDSS DR7 表做了交叉，得到 2471 个类星体，利用 DR7 中的类星体物理信息做了相关性分析。

首先是红移与颜色光变的关系。图 6 左图中蓝线是对红移取 bin 后 bin 内颜色光变的平均值，橙线是所有源的颜色光变的平均值。我们可以发现，得到的颜色光变整体都低于 0，这表明随着 g 波段星等越小，颜色变蓝，这也就印证了类星体越亮越蓝的这个规律。和 SDSS 的结果图（右图）相对比我们可以发现：ZTF 的数据计算得到的颜色光变平均值的不确定度明显小于 SDSS 的结果，而且 SDSS 的类星体数量大约是我们的样本的 3.5 倍，从统计学角度来说，我们从 ZTF 的数据得到的单一类星体颜色光变的不确定度要比 SDSS 的要小得多。

如右图蓝线所示，这一越亮越蓝的程度和红移有明显的相关性，这并不意外，因为红移会影响发射线是否落在望远镜的滤光范围内，这会一定程度地影响我们的观测星等，这也是导致 ZTF 结果图和 SDSS 结果图有较大区别的原因。以红移 0.45、1.1、1.5 处为例，从图 7 类星体复合谱和 ZTF 三个波段的响应曲线的关系我们可以看到， $z=0.45$  时，MgII 线正好进入 g 波段， $z=1.1$  时从 g 波段移入到 r 波段，1.5 时正好移出 r 波段。这刚好对应图 6 中平均值线（蓝线） $z=0.5$  处的下降、 $z=1.1$  处的放缓、 $z=1.5$  处上升的趋势。在理论上，我们知道类星体的光变属性不应该与红移——也就是它们和我们的远近有关，所以这种相关性的趋势完全代表了波段对颜色光变的影响。为此，我们需要对颜色光变  $s$  进行整体上的改正，用改正后的结果再与其他物理参数进行比较。于是，我用了如下的处理方式对每一个红移 bin 内的类星体颜色光变进行了处理。

$$\langle s \rangle - \langle s_k \rangle(z) \quad (4)$$

公式 4 意味着每一个红移 bin 内的颜色光变的修正值为图中蓝线和橙线的差，也就是 bin 内平均值与总体平均值的差。改正后每个 bin 内的平均值，也就是蓝线，会落在橙线上，这样我们会将 bin 内平均值改正到整体平均值线上，也就消除了光变  $z$  和颜色光变  $s$  的关系，以达成修正的目的。

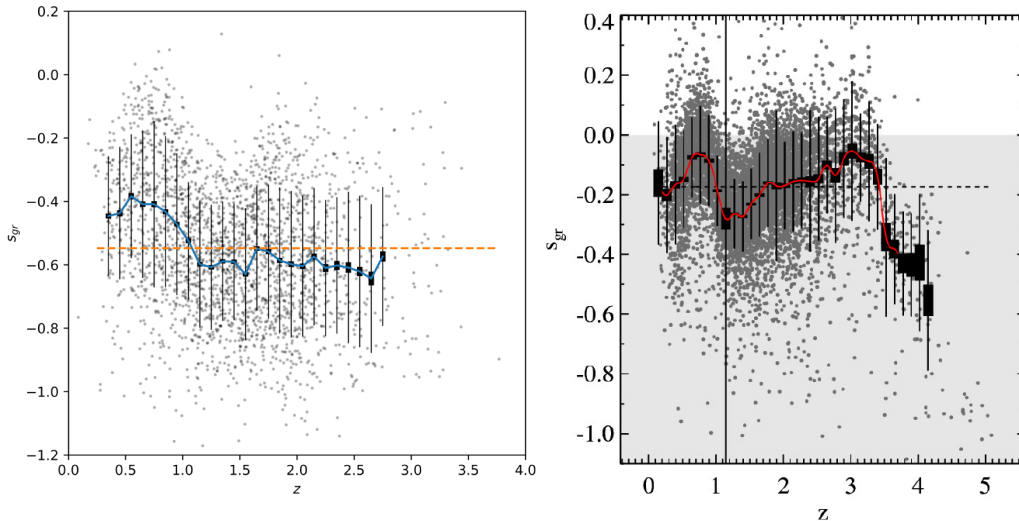


图 6. ——颜色光变与红移的关系图。左图为 ZTF 数据的结果，右图为 SDSS 数据的结果 (Schmidt et al. 2011)，得到两图所使用的方法相同。左图中蓝线表示的是红移 bin 为 0.1 时，bin 内颜色光变的平均值，细黑线的误差棒代表的是 bin 内颜色光变的统计标准差，粗黑长方块的误差棒表示的是 bin 内颜色光变平均值的不确定度，橙线表示的是所有类星体的颜色光变平均值。右图的图例与左图相对应。

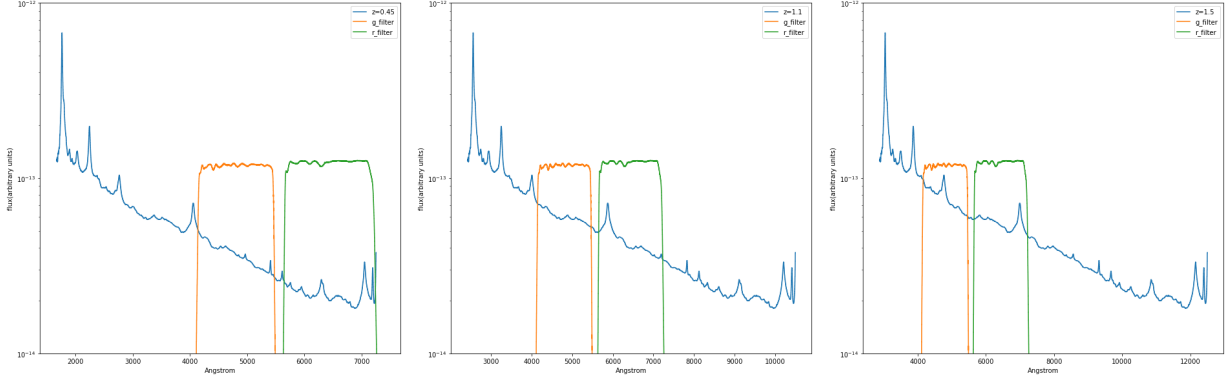


图 7. ——发射线在颜色光变中的作用。三图中的蓝线分别为红移  $z=0.45$ 、 $1.1$ 、 $1.5$  时的类星体复合谱。橙线和绿线分别为 ZTF gr 两个波段的响应曲线。

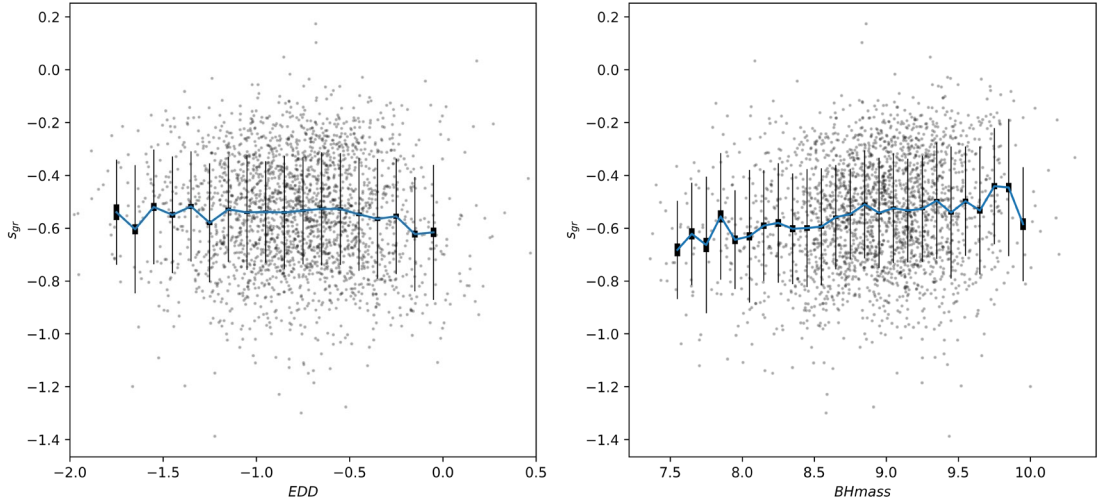


图 8. ——红移修正后的颜色光变与爱丁顿光度及黑洞质量之间的关系图。其中， $EDD = \log(L/L_{\text{Edd}})$ ,  $BHmass = \log(M_{\text{BH}}/M_{\odot})$ 。图例与图 6 相同。

为了研究颜色光变是否与黑洞状态相关，我将修正后的结果与黑洞的物理参数做了对比。

图 8a 中我们可以看到，颜色光变和爱丁顿吸积率的关系近似是一条直线。这个结论十分清晰，代表着 bin 内平均值线的蓝线的波动很小。在图 8b 中，我们也可以看到黑洞质量和颜色光变的关系在高采样率的地方也近似是一条直线，虽然两边的结果因为采样点较少并不够好，但是最密集部分近似是水平的，而且整条蓝线涨落不超过 0.1。这印证了，黑洞的物理参数并不会决定颜色光变，这个结论与用 SDSS 数据得到的结果相一致。

## 五、总结与展望

在本项目中，我利用了 ZTF DR6 数据研究了 SDSS Stripe 82 天区的类星体的颜色光变。我最终计算得出 3740 个类星体的颜色光变，并按照红移对他们进行了修正。我的结果印证了类星体吸积盘模型预言的类星体越亮越蓝的趋势，也证明了类星体的颜色光变与黑洞的物理参数无关。



本项目采用的 SDSS Stripe 82 天区只是天空中很小的一块区域，我相信我的工作也会很方便地更改到其他天区进行计算与研究。

SDSS 望远镜的优势在于口径大，测光精准，目前运行时间长，可是它的光变曲线时间采样率极低，8 年 60 个观测点是常态，对研究颜色光变这种相对短标、需要高采样率的计算并不适合，而且不方便研究光变曲线随时间的变化。目前 ZTF 仅三年的数据就已经超过了 SDSS 的观测量，算得的颜色光变不确定度明显低于 SDSS 的结果，而且目前 ZTF 还在持续更新数据点，继续为我们提供更丰富的观测数据，从统计上来讲会持续降低颜色光变的不确定度。

ZTF 作为口径 8.4m 的 LSST 的实验品，按照我目前的工作，已经显示了它在类星体研究上足够出色的工作性能，而作为它后继者的 LSST 更是未来可期。我目前的工作代码，在 2022 年 LSST 运行并公布数据后，可以直接更改 api 适配 LSST 的数据，快速得到更准确、采样率更高的光变曲线，并得到颜色光变和构造函数，来研究整个天区的类星体的光变。

### 致谢

首先，我要感谢吴学兵老师对我的指导。吴老师对我的本科生科研课题做了许多指导与建议，在我得到阶段性结果之后带我进行总结分析，并对下阶段的研究指明方向。我在课题最初阶段对如何做科学研究不慎了解，只是懂得按图索骥，只闷头写代码但不了解很多物理意义。吴老师在这方面帮了我很多，也纠正了我对做科研的许多错误的观点与看法。

同时也要感谢组里师兄师姐们的帮助，谢谢你们对我代码方面的指导。马芹春师兄和我都利用 ZTF 的数据进行类星体光变研究，在对 ZTF 数据研究方面帮了我很多。傅煜铭师兄和庞宇萱师兄也在编程和科研的各个方面给我大力支持。此外，平时在组会上我也听取学习了师姐们的报告，学会了很多科研上的方法。

此外，我还要感谢学院老师们和学院对我的帮助。所里老师们开设的本科课程激发了我对天文科研的兴趣，也为我打下了良好的基础。学院对本科生科研的资助也为我们本科生提供了做科研的机会。

最后，衷心感谢吴学兵老师，John Silverman 老师，王菁老师，我的家人，朋友对我在科研上的鼓励与支持，没有你们的鼓励与认可，我不会有勇气在科研上继续坚持，完成这个项目。

### 参考文献

- Bauer, A., et al., 2009, *ApJ* 696:1241  
Bramich, D. M., et al., 2008, *MNRAS* 386:887  
Collier, S. & Peterson, B. M., 2001, *ApJ*, 555:775  
Giveon, U., et al., 1999, *MNRAS* 306:637  
Gunn, J. E., et al., 2006, *AJ* 131:2332  
Hogg, D.W., et al., 2018 *ApJS* 236:11  
Hopkins, P. F., Hernquist, L., Cox, T. J., Di Matteo, T., Robertson, B., & Springel, V., 2006, *ApJS* 163:1  
Ivezic, Z., et al., 2007, *AJ* 134:973

Kawaguchi, T., Mineshige, S., Umemura, M., Turner, E. L., 1998, *ApJ* 504:671  
Kelly, B. C., et al., 2009, *ApJ* 698:895  
Kozłowski, B., et al., 2010, *ApJ* 708:927  
Lyke, B.W., et al., 2020 *ApJS* 250:8  
Pereyra, N. A., et al., 2006, *ApJ* 642:87  
Rees, M. J., 1984, *ARA&A* 22:471  
Rengstorf, A. W., et al., 2004, *ApJ* 617:184  
Schmidt, K.B., et al., 2012 *ApJ* 744:147  
Sesar, B., et al., 2007, *AJ* 134:2236  
Stoughton, C. et al., 2002, *AJ* 123:485  
Vanden Berk, D. E., et al., 2004, *ApJ* 601:692  
Wilhite, C. B., et al. 2008, *MNRS* 383:1232  
Zu, Y., et al., 2013 *ApJ* 765:106  
Zuo, W., et al., 2012 *ApJ* 758:104

### 作者简介:

刘兆轩, 男, 2000 年 4 月出生于辽宁省鞍山市, 2018 年从鞍山市第一中学, 通过自主招生降分(天文学科营优秀营员)考入北京大学物理学院天文系, 在校期间任 18 级天文班团支书, 积极参加文体和志愿活动, 力求德智体美劳全面发展。

### 感悟与寄语:

在课题的完成过程中, 我从最初的科研小白到了现在能够小试牛刀的水平, 也积累了不少科研相关的经验与感悟。

最开始, 我只是把本研项目当作学校作业一样去做, 后来才慢慢步入正轨。对于普通的学校作业, 我们作为学生, 只需要搞清楚怎么做, 之后做出来上交即可。而对于科研训练, 我们不但要明白怎么做, 还要知道为什么做这个, 做出来预期有什么结果, 结果有什么用。里面的环节都需要主动思考, 必要时需要积极主动找老师师兄师姐们聊聊遇到的问题, 在不断试错中摸索正确的方向。

现在, 通过本科生科研训练, 我已经对科研有了正确的认识, 掌握了一些基本的科研方法, 具备了初步的科研能力。我希望我以后能够继续从事天文科研工作, 为天文事业出一份绵薄之力。

### 指导教师简介:

吴学兵, 男, 物理学院天文学系教授、系主任, 科维理天文与天体物理研究所副所长。1986 年和 1989 年在华中师范大学物理系分别获学士和硕士学位, 1996 年在中国科学院北京天文台(现国家天文台)获天体物理专业博士学位。现任中国天文学会副理事长、《Research in Astronomy and Astrophysics》杂志编委, 国际天文学联合会(IAU)会员。研究领域为: 黑洞天体物理, 类星体与活动星系核, 高能天体物理, 观测宇宙学。2004 年入选教育部新世纪人才支持计划, 2005 年获国家杰出青年科学基金, 2015 年获中国天文学会首届黄润乾天体物理基础研究奖。研究成果入选 2015 年度中国科学十大进展、中国高等学校十大科技进展, 获 2017 年教育部自然科学一等奖。