



星明天文台： 变星搜寻项目推动创建食变星新类型

□ 赵经远 周文杰

星明天文台变星搜寻项目： 众里寻他千百度

在静谧的夜空中，恒星挂满了天幕，虽然名为恒星，但它们并非永恒不变，天文学家通常将亮度有变化的恒星称作变星。早在两千年前，古人就已知晓夜空并非永恒，其间偶尔会出现此前从未见过的星星，它们迅速增亮，然后缓慢变暗，这种天体包括现代天文学中的新星和超新星两大类型，在早期阶段，人类发现的变星都属于这两类。直到1596年德国天文学家David Fabricius发现刍藁增二表现出周期性亮度变化，才使变星研究翻开了新的篇章。18世纪后期，英国天文学家John Goodricke首先解释了部分变星亮度变化的原因，正确指出大陵五的光变是两颗恒星相互掩食造

成的，而造父一则是由于自身变化导致了光变。到了19世纪，随着摄影术的出现和发展，天文学家将其应用于天文学，变星数量随之迅速增多。而现在，大量天基、地基巡天项目如雨后春笋般涌现，人类发现的变星早已数不胜数，但其中蕴含的丰富信息仍有待持续探索。

为了进行变星搜寻、发现及分类等方面的研究，星明天文台于2022年1月正式上线了变星搜寻项目（VSSP），这是星明天文台运行的综合性研究项目之一。VSSP成员分工合作，利用星明天文台自有设备获得的数据，并结合茨威基暂现源设施（ZTF）、小行星地面撞击预警系统（ATLAS）、凌星系外行星巡天卫星（TESS）、自动化全天超新星搜寻项目（ASAS-

发射星云SH 2-241（底图中的棕黄色区域）和E-DO型食变星VSSP J060413.69+300728.8（插图标记处）。

图像来源：DSS、PanSTARRS DR1

SN) 等专业巡天项目发布的公开数据, 寻找未知的变星。目前, VSSP已发现数百颗变星, 涵盖食变星、脉动变星、爆发变星、自转变星和X射线变星等多种类型, 其中不乏罕见、有趣的目标。本文就将讲述VSSP发现的一颗变星, 这颗变星的发现推动了国际变星索引数据库(VSX)食变星分类体系中第四大类型的创建, 具有很高的科研价值。

发现：孤秀满星河，亭亭出众星

2024年6月20日11时左右, VSSP成员赵经远同好在茨威基暂现源设施(ZTF)公开的数据中发现了一颗奇特的变星, 它位于发射星云SH 2-241的边缘区域, 亮度变化有着长达831天左右(约2.3年)的周期, 按周期折叠后的ZTF r波段光变曲线(即相位图)如图1所示。

由图可知, 该目标的光变幅度约为2星等, 每个周期中有约40%(即332天)处于变暗阶段, 且在变暗阶段的中心附近有一个不同寻常的凸起特征。

赵经远检查了VSX、VizieR和SIMBAD等天体数据库, 但不能查到该目标是变星的明确记载, 因此它可能是一颗未知变星。但该目标周围恒星较为密集, 如果邻近恒星存在亮度变化, 那么有可能会对该目标的光变曲线造成影响, 于是赵经远检查了附近三颗恒星的光变曲线, 却发现它们都呈现波澜不惊的水平状, 没有任何明显变化, 这表明光变确实是该目标本身产生的。

由于光变特征非常独特, 赵经远立即将其分享至VSSP群内, 孙国佑、张宓、周文杰等其他成员也表

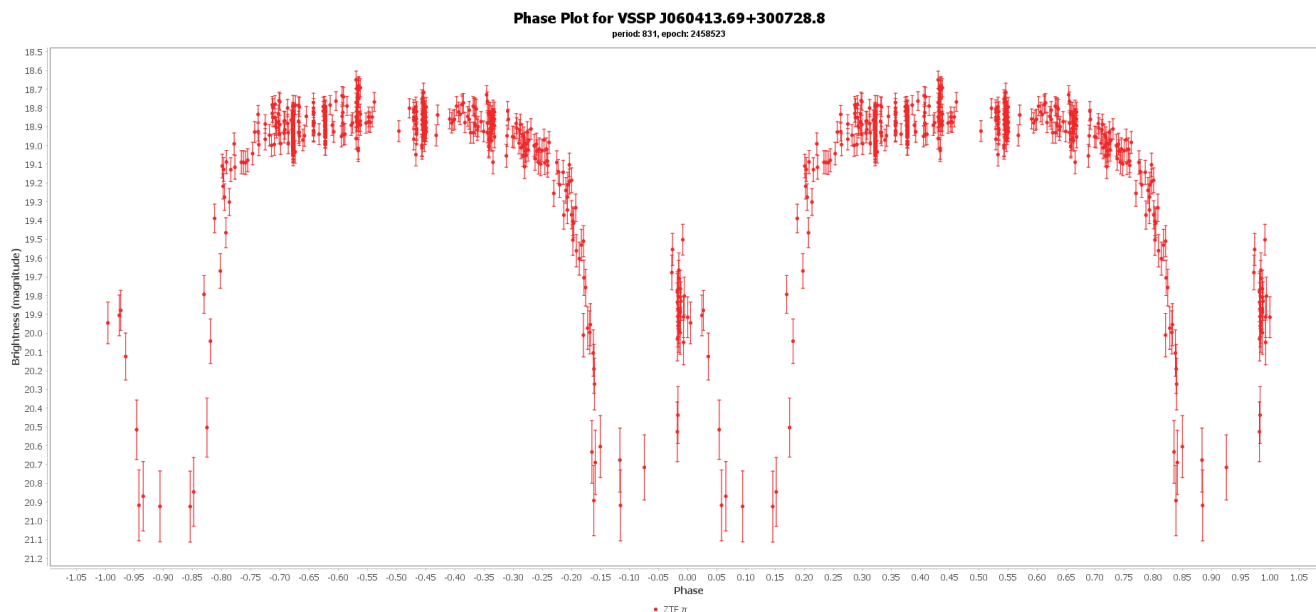


图1 使用VStar软件绘制的ZTF r波段相位图。

图像来源：星明天文台

示“这是个奇葩的目标”、“好东西”。随后各位成员纷纷猜测该目标可能属于哪类变星，并推测亮度变化的原因。该系统的光变曲线与白藜型变星（M）不符，排除；八百多天的周期太长，与武仙座AM型变星（AM）不符，排除；变暗部分占比太大，远高于大陵型变星（EA）的上限，且变暗中心的凸起不易解释，与EA型变星不符，排除……虽然该目标的光变曲线与拥有大气的行星或卫星掩星形成的中心闪（central flash）非常相似，但长时间变暗和周期性光变显然不可能由太阳系天体形成，而在遥远的恒星系统中，系外行星或卫星也难以造成高达2星等的掩食和如此强烈的中心闪。就这样，能想到的变星类型和光变原因基本都被排除了。

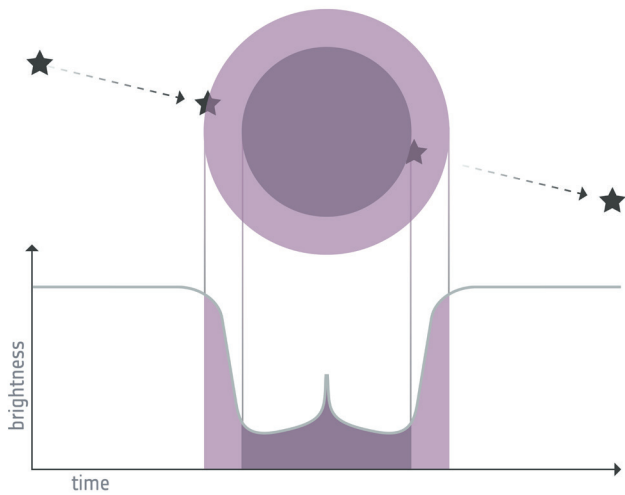


图2 太阳系内拥有大气的行星或卫星掩食恒星的示意图。来自恒星的光线从太空穿过大气时，周边环境的密度发生变化，光线因此弯曲，产生汇聚作用，形成中心闪。图像来源：ESA

分类与上报： 山重水复疑无路，柳暗花明又一村

赵经远想起2022年曾看过清华大学的一篇新闻报道，其中提到该校天文系祝伟副教授牵头的国际团队发现了两个类似Kearns-Herbst 15D（缩写为KH 15D，变星编号为麒麟座V582）的双星系统，它们被星周盘（circumstellar disk）掩食，分别编号为Bernhard-1和Bernhard-2。这两个系统的掩食占比非常大，与我们最新发现的目标有些相似。但赵经远翻阅了相关论文并检查了它们的光变曲线后发现，这两个系统在掩食阶段并没有呈现凸起的特征，便没再进一步探究。

当晚，周文杰同好进一步检查了我们发现的这一目标，并表示想不出合适的分类，于是他将其编号为VSSP J060413.69+300728.8，并以“*”这一类型（表示现有变星分类之外的类型）上报至VSX，待VSX管理员审核。

周文杰完成上报之后，李言蹊同好提出该目标奇特的光变是否可能由尘埃吸积盘（accretion disk）造成。受“盘状物掩食”这一猜想的启发，周文杰也独立找到了祝伟副教授团队的论文，并认为这篇论文里发现的两颗变星除了缺少变暗阶段中心的凸起之外，光变曲线的其他特征与我们发现的目标相似。随后周文杰向VSX的管理员Sebastián Otero先生去了一封邮件，向其说明虽然难以从现有变星分类中为VSSP J060413.69+300728.8找到合适的类型，但我们认为该目标有可能是被星周盘掩食的双星系统，在某种意义上也属于食变星（E）这一大类型，不过若将其分类为E可能并不够贴切。

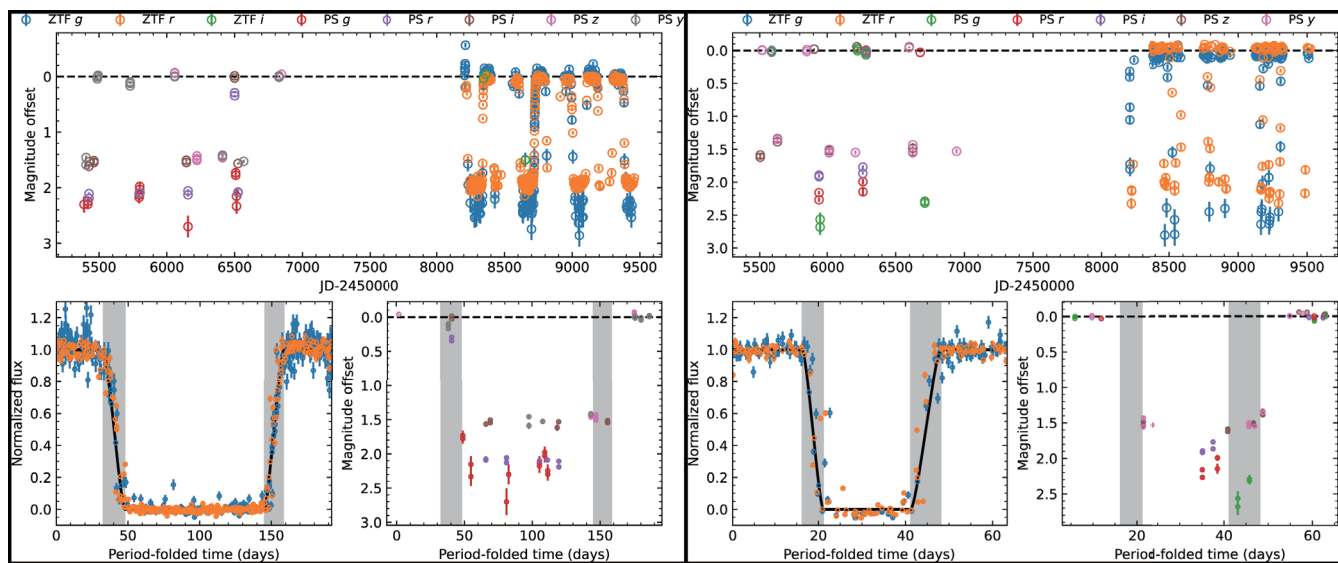


图3 Bernhard-1（左）和Bernhard-2（右）的光变数据。

图像来源：Wei Zhu et al. The Astrophysical Journal Letters, 933:L21

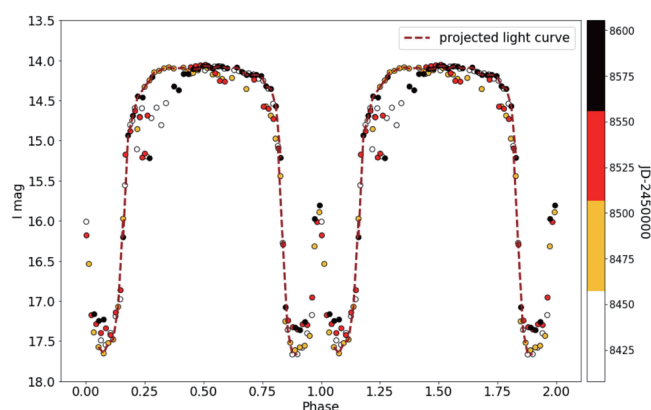


图4 KH 15D的相位图。图片来源：Aleezah Ali/University of Washington

第二天一早，受聊天记录启发，赵经远查询了祝伟副教授团队论文中提到的KH 15D的相位图。顿时，一切都豁然开朗了。原来，KH 15D不仅掩食占比非常大（在约48天的光变周期中，有约20天处于掩食阶段），而且它在特定时期的光变曲线与VSSP J060413.69+300728.8极为相似，掩食中心呈现明显的增亮。

其他成员也表示VSSP J060413.69+300728.8和KH 15D非常相似，并认为独特的光变曲线很可能是星周盘掩食双星系统形成的。综合这些想法，周文杰于6月22日、6月26日分别向Otero先生、祝伟副教授发了一封邮件，说明了我们对于VSSP J060413.69+300728.8的最新见解，并征询他们的意见。

在6月22日去信之后的几天里，Otero先生既没有批准我们的提交，也没有回复周文杰的来信。这让我们可以趁此间隙了解关于KH 15D的历史及其光变的成因。

KH 15D：他山之石，可以攻玉

KH 15D也被称为眨眼星（winking star），关于它的发现可以追溯到1970年，当时前苏联天文学家H. Badalian和L. Erastova在锥状星云附近首先发现了这颗变星，并将其归类为不规则变星。1998年，美国维思大学天文学系William Herbst教授和他的学生Kristin Kearns独立发现了它，他们用自己的名字将其编号为Kearns-Herbst 15D（其中“15D”意为在编号为D的天区发现的第15颗变星），缩写为KH 15D，并指出它的光变非常特殊，值得进一步研究。2002年，Herbst教授的学生Catrina Hamilton进一步论证了这一变星的重要性，使其引起天文学界的广泛关注。此后许多天文学家对KH 15D进行了深入研究，逐渐提出并完善了星周盘掩食双星系统的模型，其中美国普林斯顿大学天体物理系Joshua Winn教授等人在2006年提出的模型大致

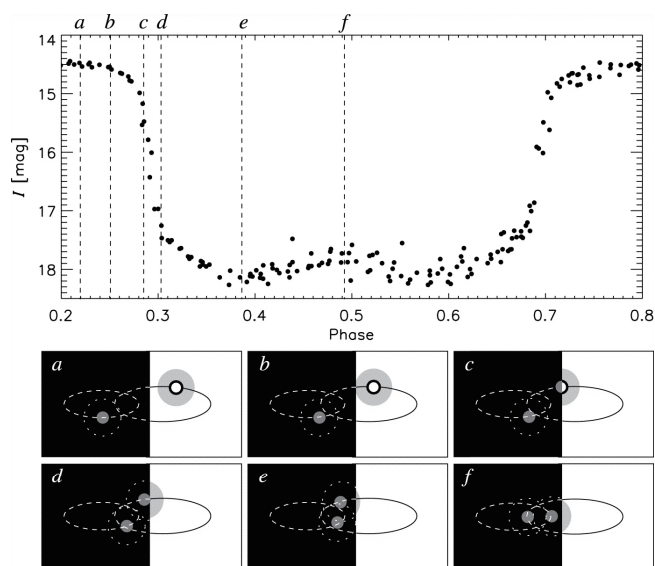


图5 Joshua Winn教授等人的模型图示。

图片来源：Joshua N. Winn et al. The Astrophysical Journal, 644:510 - 524

如图6所示，这一模型也能较好地解释我们发现VSSP J060413.69+300728.8的光变特征。

- ◎ (a) 如图a所示，黑色部分代表双星系统与地球之间的星周盘（恒星处于该部分星周盘之后时，会被遮掩，系统整体亮度会下降），白色部分代表双星系统背后的星周盘（该部分星周盘不会遮掩恒星），双星系统中两颗星周围的灰色部分可能是由星周盘散射产生的晕（halo）。a图中处于白色区域的恒星（称为A星，该星在后续图中不一定处于白色区域）及其晕未被星周盘遮挡，处于黑色区域的恒星（称为B星，该星在后续图中不一定处于黑色区域）及其晕完全被星周盘遮挡。
- ◎ (b) 星周盘开始遮挡A星的晕，该系统的亮度开始逐渐变暗。
- ◎ (c) A星被遮住一半。
- ◎ (d) A星被完全掩蔽，但它的晕仍露出一部分，该系统的亮度下降减缓。
- ◎ (e) A星的晕被完全掩蔽，同时B星的晕开始逐渐露出，该系统的亮度达到最小值。
- ◎ (f) B星露出星周盘的晕达到最大，在光变曲线中表现为掩食中心的增亮。

目前天文学家认为，KH 15D是一个双星系统，在其周围有一个星周盘，这一星周盘与双星系统的轨道平面成一定角度，且会缓慢摆动，因此每个周期的光变曲线并不完全相同。由于在星周盘中可能会形成行星，而且与其他拥有星周盘的恒星系统相比，KH 15D的轨道与亮度变化非常独特，天文学家可以借此一窥星周盘的构造及演化，因此KH 15D被誉为理解行星形成的“罗塞塔石碑”，具有重要的意义。2008

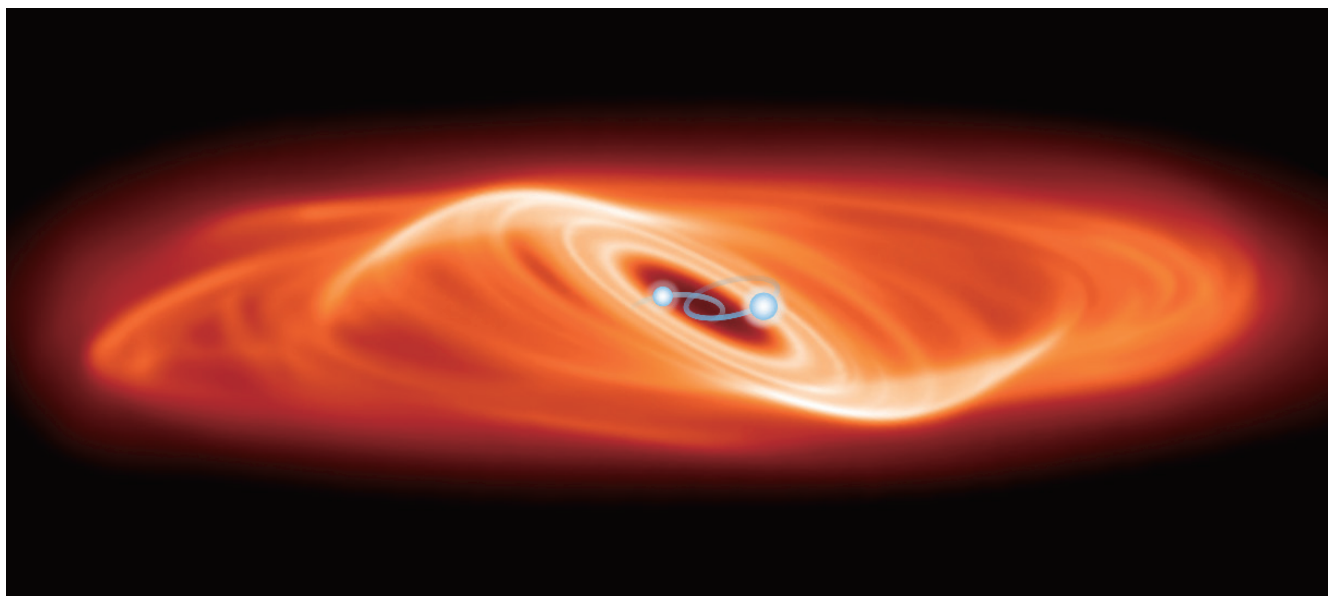


图6 与双星轨道平面成一定角度的星周盘艺术图。

图像来源：清华大学新闻网

年，Herbst教授等人在Nature发表了一篇论文，指出KH 15D中的星周盘是由直径约1毫米左右的颗粒组成的，而这些颗粒则是更小的尘埃在300万年内逐渐凝聚的产物，这正是行星形成的第一步。

新类型E-DO型食变星：领导标新二月花

6月27日，祝伟副教授回信称，从光变曲线上看，这个目标确实是类似KH 15D的系统，且目前已知的类似系统数量很少——因此如果该系统能得到证认，将会对已有样本的信息有较大提升。他还指出，该目标的周期远超其他类似系统，暗示了这个目标在动力学演化上可能非常有趣。这些判断大大鼓舞了VSSP团队。

6月28日下午，孙国佑注意到VSX网站出现了一批变星，它们的分类均含有E-DO这一从未见过的类型，在查阅VSX变星分类描述后了解到这是Eclipses by Disk Occultation的缩写，是指因星周盘掩食而产生光变的天体。赵经远随后发现在这一批变星中，前文提到过的Bernhard-1、Bernhard-2和KH 15D赫然在列，并猜测Otero先生也基本上认可我们对VSSP J060413.69+300728.8的看法，而我们提交的这一目标也即将被VSX收录。

果不其然，周文杰很快收到了Otero先生的回信。Otero先生在信中表示他同意我们的判断，并且刚刚特别创建了E-DO这一食变星的新类型，用于对星周盘掩食的天体进行分类，他要求我们将VSSP J060413.69+300728.8的分类也修改为这一类型。周文杰很快完成了该目标的修改，并将其重新提交给VSX。第二天凌晨，VSSP J060413.69+300728.8终于被

批准通过，出现在VSX的页面上（<https://www.aavso.org/vsx/index.php?view=detail.top&oid=2389495>）。

长久以来，食变星仅有大陵型变星（EA）、天琴座β型变星（EB）和大熊座W型变星（EW）三大类型，虽然天文学家已经发现了一些被星周盘掩食的变星，但并未给他们一个细致的分类。我们提交的VSSP J060413.69+300728.8促使VSX创建了E-DO这一全新的食变星类型，这不仅使类似的变星有了归宿，而且使变星数量最多的食变星家族迎来了第四大类型，为变星研究开辟了新领域，具有十分重要的意义。

目前，VSX收录了约二十颗E-DO型变星，在VSX收录的变星总数（约230万颗）里犹如沧海一粟。这些E-DO型变星中大部分目标的掩食占比均不高于25%，仅有KH 15D、Bernhard-1、Bernhard-2、WL 4和我们发现的VSSP J060413.69+300728.8例外，这5个天体的掩食占比均不低于40%，其中仅有KH 15D和VSSP J060413.69+300728.8已经观测到掩食中心的增亮现象，因此这两个天体是非常独特的。我们的这一发现也得到了KH 15D的发现者之一Herbst教授的高度评价：“中心增亮表明这颗变星一定是双星系统，因为其他理论很难解释该现象……星周盘只存在于早期恒星系统中，而很多早期恒星系统位于星云附近，这颗变星也符合这一特点……VSSP J060413.69+300728.8的周期非常长，是KH 15D的近20倍，这意味着与KH 15D等其他类似的系统相比，该变星的亮度变化相对缓慢，这有助于揭示其轨道、结构和动力学演化等有趣的性质，甚至会为双星系统中的行星形成提供新见解……这是三十年来，我看到的另一个KH 15D的最佳

Latest Details ?	
Log in to retrieve additional aliases from SIMBAD.	
Name	V VSSP J060413.69+300728.8
AAVSO UID	000-BPX-003 (No observations)
Constellation	Auriga » Sequence
J2000.0	06 04 13.69 +30 07 28.8 (91.05704 +30.12467) » Search nearby
B1950.0	06 01 01.19 +30 07 40.3
Galactic coord.	181.015 +4.094
Other names (Internal only)	2MASS J06041368+3007287IPHAS J060413.70+300728.8TIC 367263808 URAT1 601-114880 (Not logged in) » Add name
Variability type	E-DO ?
Spectral type	--
Mag. range	18.8 - <21 r ?
Discoverer	Jingyuan Zhao, Wenjie Zhou, Leiming Tang, Shuming Wang, Yanxi Li, Zhuoyang Chen, Hua Luo, Guoyou Sun, Mi Zhang, Xing Gao (Xingming Obs)
Epoch	08 Feb 2019 (HJD 2458523) » Ephemeris
Outburst	--
Period	831 d
Rise/eclipse dur.	40% (332 d)
Remarks ?	
Some references may be clicked to view in new window. Roll over index number to view submission details.	
1	Zhou, Wenjie Occultations by a circumbinary disk.

图7 VSX页面。

图片来源：VSX

样本！祝贺你们团队的发现！”

由于KH 15D较亮，历史数据比较丰富，甚至能回溯到上个世纪初，从大量数据分析并建模得到的星周盘模型不仅能完美拟合历史数据，还能对未来的亮度变化作出预测，而且预测结果与实际观测结果也是比较相符的。那么对于我们发现的VSSP J060413.69+300728.8来说，遮挡物除了星周盘之外是否有其他可能呢？由于VSSP J060413.69+300728.8较暗，只有ZTF r波段2000多天的观测数据能相对完整地显示光变历程，而且掩食阶段的数据较少、误差很大，虽然目前倾向于它的光变也是由星周盘掩食造成的，但如果把遮挡物替换成与双星系统没有直接联

系的致密星际尘埃，从短期观测效果上来说，这与星周盘的作用似乎是等效的，所以这种假设也是有可能的。也许只有等未来，观测数据变得丰富了，我们才能对遮挡VSSP J060413.69+300728.8的物体的性质作出最合理的解释。

参与了VSSP J060413.69+300728.8发现的有星明天文台变星搜寻项目（VSSP）团队成员赵经远、周文杰、唐磊明、王书铭、李言蹊、陈卓扬、罗华、孙国佑、张宓、高兴。特别感谢清华大学祝伟副教授、VSX管理员Sebastián Otero先生、美国维思大学William Herbst教授对这颗变星的讨论。■

（责任编辑 郑 硕）