

# 基于直接成像法的多星系统观测\*

陈祎力<sup>1,2,3†</sup> 朱永田<sup>1,2,4</sup> 赵刚<sup>1,2</sup> 窦江培<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所 南京 210042)

(2 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所) 南京 210042)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

(4 中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

**摘要** 系外行星直接成像探测能够获取系外行星更全面的物理信息,是未来搜寻系外生命的关键技术之一.针对近期地基望远镜高对比度成像观测数据,对新发现的多星候选体进行系统展示.前期,结合地基系外行星高对比度成像设备观测能力,从已发表文献整理的Gaia星表恒星数据中筛选,得到约1000个观测目标.这些目标分布于不同的年轻星团中.近期,使用Palomar天文台Hale望远镜对上述观测目标中的42个目标在K波段开展了高对比度成像观测.这些目标恒星在可见光波段为7.5–14. 2019年经过两轮观测,发现了6个多星系统候选体,这些目标在Gaia Data Release 2星表和Gaia early Data Release 3星表中难以确认是单星还是多星系统.

**关键词** 双星; 成像; 红外; 恒星; 方法; 观测

**中图分类号**: P153; **文献标识码**: A

## 1 引言

近些年来,高对比度直接成像技术已经成为系外行星探测的重要手段<sup>[1–2]</sup>.多个地基大口径望远镜都配备了系外行星高对比度直接成像观测设备,包括Gemini/GPI(双子座南天望远镜行星成像仪)<sup>[3–5]</sup>与VLT(Very Large Telescope)/SPHERE(系外行星光谱+偏振高对比度搜寻仪)<sup>[6]</sup>和我国地基系外行星成像仪<sup>[7]</sup>等.基于上述观测设备,对恒星进行了高对比度成像的巡天观测,如使用VLT/NACO(内氏焦点自适应光学系统(NAOS)和近红外成像与光谱仪(CONICA))的系外行星巡天计划<sup>[8]</sup>和使用Gemini/NICI(近红外星冕仪成像仪)的系外行星观测计划<sup>[9]</sup>等.在这些工作中,发现

了40颗左右的系外行星和上百颗褐矮星,如HR 8799b、c、d、e<sup>[10–12]</sup>、 $\beta$  Pictoris b<sup>[13–14]</sup>和 $\kappa$  And b<sup>[7, 15]</sup>.同时,高对比度数据处理技术和算法也在近15年来有很大的发展,包括ADI(Angular Differential Imaging)技术<sup>[16]</sup>、LOCI(Locally Optimized Combination of Images)算法<sup>[17]</sup>、基于主成分分析法的KLIP(Karhunen–Loève Image Projection)算法<sup>[18]</sup>、基于奇异值分解方法的PynPoint处理流水线算法<sup>[19–20]</sup>、IRS(Image Rotation Subtraction)技术<sup>[21]</sup>、O-IRS(Optimized-Image Rotation Subtraction)优化算法<sup>[12]</sup>以及近期本团队创新发展的G-RDI(Global Reference star Differential Imaging)<sup>[22]</sup>.这使得对暗弱恒星周围的系外行星成像观测成为了可能.

2021-03-23收到原稿, 2021-10-10收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(11827804、U2031210、11873068),中国载人航天工程巡天空间望远镜专项科学基金项目(CMS-CSST-2021-A11)资助

<sup>†</sup>ylchen@niaot.ac.cn

国际上许多课题组对系外行星进行了大量直接成像的观测工作,随着观测设备和数据处理方法的进步,观测目标从亮星逐步过渡到暗星,如HR 8799 (可见光星等( $m_V$ ) = 5.95)、51 Eridani ( $m_V$  = 5.21)、 $\beta$  Pictoris ( $m_V$  = 3.86)、DH Tau ( $m_V$  = 13.10)、ROXs 42 B ( $m_V$  = 14.27)等.根据NASA (National Aeronautics and Space Administration)系外行星数据库<sup>1</sup>的统计,近10年以来,通过直接成像法观测发现了26颗系外行星,其中在光谱型为K、M、L或表面温度更低的恒星周围发现的系外行星数量为15颗,超过了所有直接成像法发现系外行星数量的一半.因此,对小质量恒星进行直接成像观测是发现系外行星的一种高效途径<sup>[23]</sup>.

双星系统的研究有悠久的历史,观测数据表明银河系中的双星系统很普遍<sup>[24-25]</sup>,而双星系统的形成和演化是天体物理中的重要课题<sup>[26-27]</sup>.在研究双星起源的过程中,人们观测了大量主序之前的双星系统<sup>[28-29]</sup>.同时关于双中子星的研究也是近年来双星研究的热点<sup>[30-31]</sup>.理论研究需要大量观测数据作为支撑,有些双星系统隐藏在Gaia星表的单星数据中,因此我们使用地面大口径望远镜对单星目标进行高对比度成像观测,能够得到更多的双星数据.

Gaia天文卫星<sup>[32-33]</sup>是于2009年发射的用于恒星观测的卫星,Gaia团队目前一共发布了3批数据,分别为Gaia Data Release 1 (Gaia DR1)<sup>[34]</sup>、Gaia DR2 (Data Release 2)<sup>[35]</sup>和Gaia EDR3 (early Data Release 3)<sup>[36]</sup>.随着这3批数据的公布,从中整理出很多 $m_V$ 在7.5-15之间的恒星目标,这些恒星主要是K型星和M型星.我们于2019年使用位于Palomar天文台的Hale望远镜对上述目标进行了观测.由于Hale望远镜是赤道式望远镜,我们使用RDI (Reference star Differential Imaging)方法进行数据处理,因此挑选了相同星团中空间位置相近的一系列恒星作为观测目标,便于选择参考星进行优化相减.

2019年,我们对选取的上述目标源中部分年轻恒星进行了两次观测,使用直接成像法发现了5个

新双星候选系统和1个三星候选系统,该三星系统候选体曾被认为是双星系统.第2节和第3节分别为观测目标选择和观测及数据处理,第4节给出了上述两轮高对比度成像观测的发现,第5节为观测目标的系统分析和讨论.最后对该研究工作进行了总结.

## 2 观测目标选择

目前使用地基望远镜开展的系外行星成像观测项目,观测目标绝大部分是近邻共动星协中的恒星.这主要是因为共动星协中的恒星普遍较为年轻,周围可能的行星尚未完全冷却,具有较高的温度,因此和恒星对比度相对较低,更容易在红外波段观测到.另外星协中的恒星年龄可以较为精确的测量,发现行星的质量估计具有更高的精度.Gaia望远镜对约十亿颗行星进行了精确的天体位置和自行测量,通过对其观测结果的分析,可以识别出未知的共动星协.这些新发现星协中的恒星是系外行星直接成像法观测理想的目标.Oh等<sup>[37]</sup>和Gagné等<sup>[38-39]</sup>分别对Gaia观测得到的数据进行了分析,Oh等<sup>[37]</sup>对Gaia DR1中的恒星位置和运动进行了研究,找到了一些星的共动星协,这些星协被统称为Oh17共动星团.Gagné等<sup>[38]</sup>使用BANYAN (Bayesian Analysis for Nearby Young AssociatioNs)方法对100光年内近70万颗恒星进行了分析,发现了将近900颗先前不属于任何一个年轻星团中恒星,并且将这些恒星和已有的星团进行比对,确定了他们的星团.这些恒星大多为K型星和M型星,符合我们的观测计划.Oh等<sup>[37]</sup>和Gagné等<sup>[38]</sup>对Gaia观测数据整理出的星表由于恒星年龄很年轻,所以其周围可能的行星目标温度较高,适合作为寻找系外行星的目标.在具体挑选目标时,我们将Keck NIRC (Near-InfraRed Camera)/NIRC2 (second generation Near InfraRed Camera)、Subaru Ciao (Coronagraphic Imager with Adaptive Optics)/HiCiao (High-contrast Coronagraphic Imager with Adaptive Optics)、VLT (NACO/SPHERE)和Gemini GPI/NIRI (Near-InfraRed Imager)等地面大型望

<sup>1</sup><https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/TblView/nph-tblView?app=ExoTbls&config=directimaging&constraint=immodelf=1>, 查询时间为2021年7月15日

远镜直接成像设备已经观测过的恒星进行排除, 在余下恒星中根据观测时间选择合适的观测目标.

### 3 观测与数据处理

2019年, 我们使用Palomar天文台的Hale望远镜进行了两次观测. 选择 $m_V$ 为7.5–14的恒星作为观测目标, 并且由于使用Hale望远镜进行观测, 需要使用RDI技术对结果进行处理. 为了减少拍摄参考星和目标星时准静态噪声的变化, 我们尽可能从同一个共动星团选择目标. 第1次观测为

了测试Hale望远镜和第2代PALM-3000 (Palomar Adaptive Optics System)的性能, 从Oh17星团<sup>[37]</sup>和ABDMG星团中挑选了28颗相对较亮( $m_V$ 在9左右)的恒星进行观测. 在第1次观测的基础上, 第2次观测选择了K型和M型的恒星进行了观测, 分别来自于ABDMG、COL和TAU这3个星团. 这些恒星的 $m_V$ 为8.5–14, 所以第2次观测的曝光时间都较长, 而观测的目标数量减少为14颗, 其中K型星9颗, M型星5颗. 第1次和第2次的观测目标分别列在表1和表2中, 其中RA与DEC分别表示赤经和赤纬.

表 1 2019年1月观测目标的具体信息

Table 1 Detailed information of observed targets in January, 2019

Name	Associated group	RA/ hh:mm:ss	DEC/ dd:mm:ss	Magnitude in V-band	Spectral type
HIP9795	No.47 of Oh17 groups	02:05:58.55	+60:16:41.9	8.37	G
HIP10844	No.36 of Oh17 groups	02:19:35.02	+59:18:29.4	8.26	A
HIP11156	No.35 of Oh17 groups	02:23:31.02	+61:46:24.7	8.73	F
HIP13488	No.42 of Oh17 groups	02:53:40.80	+53:48:09.6	8.06	A
HIP23386	No.39 of Oh17 groups	05:01:38.58	-02:43:14.7	8.30	A
HIP23661	No.39 of Oh17 groups	05:05:06.34	-03:40:12.8	8.39	A
HIP23819	No.39 of Oh17 groups	05:07:11.89	-03:29:47.1	8.29	A
HIP63702	No.10 of Oh17 groups	13:03:16.67	+57:18:54.8	9.10	G
HIP69275	No.10 of Oh17 groups	14:10:53.01	+62:31:19.9	8.28	F
HIP72389	No.10 of Oh17 groups	14:48:02.82	+56:09:33.1	10.02	G
J1057+4142	ABDMG	10:57:14.63	+41:42:52.9	11.20	M
TYC1853-1452-1	ABDMG	05:06:13.92	+27:31:56.6	10.52	-
TYC3385-23-1	ABDMG	06:39:30.44	+48:52:04.5	9.60	-
TYC3480-1209-1	No.10 of Oh17 groups	14:53:04.81	+51:15:40.1	10.01	K
TYC3697-428-1	No.35 of Oh17 groups	02:03:40.38	+59:45:37.0	8.46	F
TYC3698-475-1	No.36 of Oh17 groups	02:23:36.70	+59:55:15.9	8.67	A
TYC3698-2538-1	No.35 of Oh17 groups	02:16:42.76	+58:12:42.6	8.79	F
TYC3715-701-1	No.26 of Oh17 groups	03:26:20.44	+58:53:12.8	8.84	F
TYC3715-742-1	No.26 of Oh17 groups	03:23:18.96	+58:43:45.1	8.05	F
TYC3850-257-1	No.10 of Oh17 groups	13:24:51.82	+54:53:50.7	7.58	A
TYC3851-336-1	No.10 of Oh17 groups	13:41:36.51	+53:20:15.0	9.67	G
TYC3851-369-1	No.10 of Oh17 groups	13:43:07.77	+54:01:33.2	9.67	G
TYC3860-1483-1	No.10 of Oh17 groups	14:39:26.35	+54:46:26.6	9.83	-
TYC3861-1374-1	No.10 of Oh17 groups	14:50:05.65	+53:38:05.4	10.34	-
TYC3865-934-1	No.10 of Oh17 groups	14:25:11.11	+57:37:59.6	9.64	G
TYC3867-281-1	No.10 of Oh17 groups	15:04:25.72	+59:52:50.8	9.62	K
TYC4049-648-1	No.26 of Oh17 groups	03:11:01.41	+60:57:16.1	8.25	A
TYC4173-609-1	No.10 of Oh17 groups	14:39:16.80	+61:55:52.5	10.36	-

表 2 2019年11月观测目标的具体信息  
**Table 2 Detailed information of observed targets in November, 2019**

Name	Associated group	RA/ hh:mm:ss	DEC/ dd:mm:ss	Magnitude in V-band	Spectral type
J2105+0425	ABDMG	21:05:56.510	+04:25:38.07	11.18	(M3)
J2206+4734	ABDMG	22:06:05.726	+47:34:02.99	12.81	(M4)
J2255+2847	ABDMG	22:55:34.495	+28:47:29.26	13.35	(M4)
J2330+5916	COL	23:30:02.885	+59:16:08.42	13.21	(M4)
J2334+2739	ABDMG	23:34:27.425	+27:39:41.88	13.15	(M4)
J0545+2350	ABDMG	05:45:06.670	+23:50:08.94	10.55	(K6)
HD236717	ABDMG	01:24:27.324	+57:51:04.71	8.57	K0IV/V
BD+49 646	ABDMG	02:22:34.008	+50:33:35.42	9.65	K0
V* V1274 Tau	COL	03:45:58.004	+27:33:33.54	10.80	K5
HD277665	COL	05:12:23.065	+41:19:37.30	9.54	K0
TYC2378-56-1	TAU	04:46:19.686	+32:15:15.77	10.80	(K0)
TYC711-294-1	TAU	05:17:49.189	+14:34:41.44	11.42	(K3)
TYC1853-1452-1	ABDMG	05:06:13.920	+27:31:56.60	10.52	K7
HD244198A	COL	05:30:34.137	+32:39:21.37	10.50	K0

两次观测均使用了PALM-3000系统和Palomar高角分辨率观测仪(Palomar High-Angular-Resolution Observer, PHARO). PALM-3000<sup>[40]</sup>系统使Hale望远镜的成像效果更接近其衍射极限,当足够明亮的自然导星在仪器视场范围内时,产生的图像通常比达到视宁度极限的图像锐利10–20倍. PALM-3000的具体信息可以参考文献[41]和[42]. PHARO观测仪使用了Rockwell 1024 × 1024 HAWAII传感器,其读出噪声小于10个电子. 这块传感器芯片对近红外的J、H和K波段能进行有效的成像,其成像比例尺为0.04角秒/像素或0.025角秒/像素. 在具体观测的时候,我们使用了K波段并且图像的成像比例尺为0.025角秒/像素,并且每个目标拍摄了400张图像. 由于2019年1月观测的目标较亮,曝光时间固定在PHARO的最短曝光时间1.4 s, 2019年11月为暗星观测,曝光时间2.8–6 s不等. 在科学观测结束后,我们拍摄了暗电流和平场校正所需的图像. 暗电流校正使用的图像是在Charge-Coupled Device

(CCD)镜头关闭的情况下拍摄的,曝光时间与科学观测曝光时间相同;平场校正使用的图像是通过Palomar天文台提供的平场灯进行拍摄的.

数据处理分为基本处理、图像对中和优化3个部分. 基本处理包括暗电流、平场和坏点校正. 暗电流校正使用所有校正图像的中位数作为Master图像,然后将数据图像减去Master图像作为校正;平场校正同样使用所有校正图像的中位数作为Master图像,然后使用Master图像进行平场校正. 坏点校正是在把从暗电流校正图像中挑出的坏点进行剔除后,对整张图像进行了若干次的 $\sigma$ 滤波以减少坏点的影响.

我们通过质心法和2D高斯法对图像进行对中. 首先使用质心法找到恒星的粗略中心,然后在恒星周围的邻近区域内使用2D高斯法进行精细对中. 这种做法的原因是单独2D高斯法对背景的均匀性要求高,在背景比较乱的条件下表现不佳.

优化部分使用了G-RDI方法<sup>[22]</sup>,该方法适合处理没有像场旋转(field rotation)的图像,通过参考

星图像的PSF (Point Spread Function)拟合目标星图像, 得到优化后的PSF图像后, 再将目标星图像减去优化后的PSF, 以提高背景暗弱目标的对比度. 在图像叠加时, 使用拉格朗日数乘法对背景随机噪声进一步优化.

## 4 结果展示

从Palomar天文台的这两次观测中, 我们观测到了8个多星系统, 其中包括已发现的多星系统和多星候选系统. 在2019年1月的观测中, 一共观测到5个双星系统, 其中1个为已确认的双星系统, 另外4个为首次观测的双星候选系统. 这些候选

系统中, 恒星和伴星之间的K波段星等差距是1-4, 图1和表3分别展示了双星系统的直接成像图像和天文观测信息, 双星角距在0.5''至2''之间. 同时还发现5个恒星目标具有低质量伴星候选体, 这些目标已经在Ren等<sup>[22]</sup>近期的工作中公布. 在2019年11月的观测中, 我们观测到2个双星系统和1个三星候选系统, 2个双星系统中1个为已确认的双星系统, 另1个为双星候选系统. 其中首次观测的双星候选系统原来为单星, 另1个三星系统原来为双星, 但本次观测发现存在2个伴星. 图2和表4分别展示了多星系统的直接成像图像和天文观测信息, 其中最近的双星角距为0.36''.

表 3 2019年1月观测得到的双星系统候选体的具体信息  
Table 3 Details of the binary candidates found in January, 2019

Name	K-band magnitude	Age/ Myr	Star-companion distance/''	Exposure time/s	Magnitude difference in K-band
HIP63702*	7.748	~750	1.40	1.4	~3.01
HIP69275*	7.306	~750	0.86	1.4	~4.00
J1057+4142	-	~149	1.88	1.4	~1.60
TYC3698-2538-1*	7.626	-	0.51	1.4	~1.60
TYC3851-369-1*	8.186	~750	1.72	1.4	~3.46

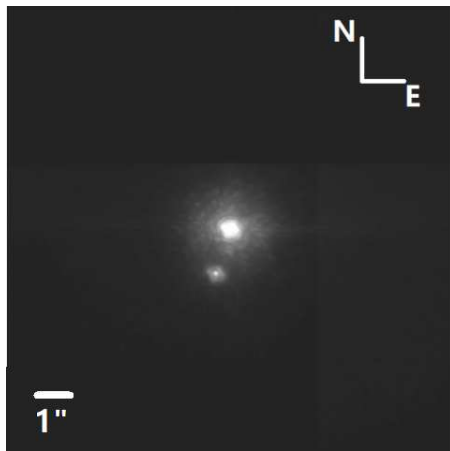
\* a new binary candidate discovered in this work.

表 4 2019年11月观测得到的多星系统候选体的具体信息  
Table 4 Details of the multi-star system candidates found in November, 2019

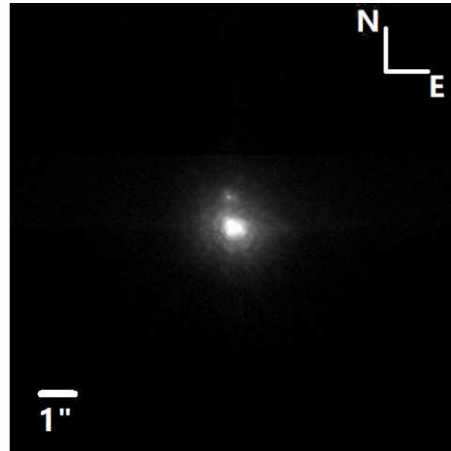
Name	K-band magnitude	Age/ Myr	Star-companion distance/''	Exposure time/s	Magnitude difference in K-band
Gaia EDR3 3390473404239903616**	-	~42	0.36	4.2	~1.56
HD244198A*	7.420	1-2	2.83/1.11	4.2	~0.12/~5.21
J2206+4734	-	~149	3.36	3	~0.03

\* already confirmed as binary but this work suggests that this system may have three stars;

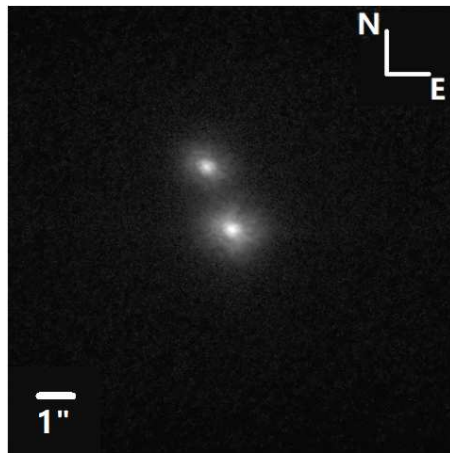
\*\* a new binary candidate discovered in this work.



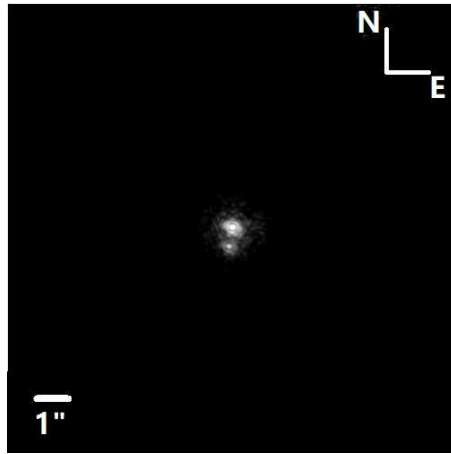
(a) HIP63702



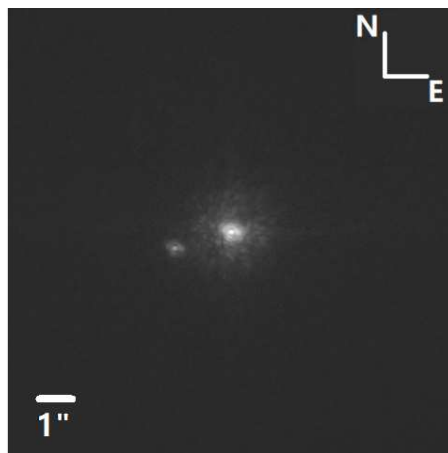
(b) HIP69275



(c) J1057+4142



(d) TYC3698-2538-1



(e) TYC3851-369-1

图 1 2019年1月观测得到的双星系统, 包括已确认和候选体. 图中N代表North, E代表East.

Fig. 1 Binaries in observation of January, 2019, including confirmed binary and candidates. N represents North and E represents East.

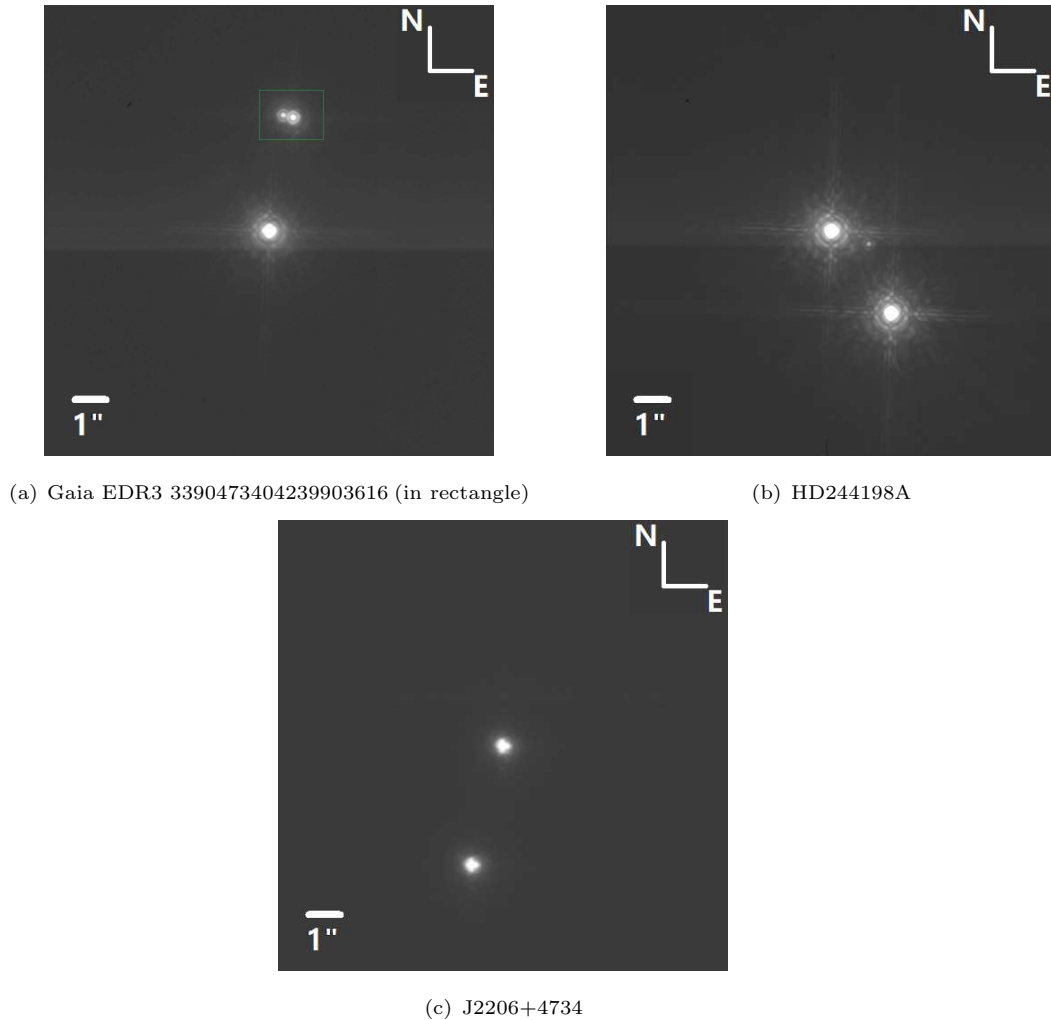


图 2 2019年11月观测得到的多星系统, 包括已确认和候选体.

Fig. 2 Multi-star systems in observations of November 2019, including confirmed multi-star systems and candidates.

## 5 讨论

上述观测目标包括了42颗不同光谱型的恒星, 通过SIMBAD (Set of Identifications, Measurements and Bibliography for Astronomical Data)<sup>[43]</sup>数据库, 与SDSS DR9 (Sloan Digital Sky Survey Data Release 9)<sup>[44]</sup>、2 MASS (Two Micron All-Sky Survey)<sup>[45]</sup>、TGAS (Tycho-Gaia Astrometric Solution)<sup>[46]</sup>和Gaia EDR3<sup>[35]</sup>星表中的目标进行对比, 发现其中5个目标是这些星表中未记录的多

星系统候选体, 另有3个目标为已证认为双星系统, 但其中的HD244198A可能为三星系统. 在Gaia EDR3数据库中, IPD\_FRAC\_MULTIPLEAK参数记录了一个目标处的光强曲线超过一个尖峰的可能性, 该参数由Gaia的天体测量数据处理程序给出, 其数值越高表明目标是目视双星的可能性越大. 该参数为20%–40%表示目标可能是一个双星候选体<sup>2</sup>. 表5给出了文中多星候选体的IPD\_FRAC\_MULTIPLEAK参数, 我们发现仅有

<sup>2</sup><http://gea.esac.eas.int/archive/documentation/GEDR3/index.html>

一个目标的参数值较高,而其他目标的参数值都很低,甚至为0.这说明了大多数目标不能被已有的Gaia天体测量程序检测出是目视双星.

我们还对Gaia DR2和Gaia EDR3中的双星候选体在不同角距下双星候选体的最大星等差进行统计.对于Gaia DR2和Gaia EDR3使用的数据分别来自文献[47]和[48].图3和图4分别给出了Gaia DR2和Gaia EDR3星表中,不同g波段星等和角距下双星候选体的最大星等差.我们发现本次观测得到的6个多星目标的星等差均超过了相同星等和角距条件下Gaia双星候选体星表中的最大星等差.其较大的星等差和较小的角距离导致了目前Gaia数据库中缺少一些恒星目标.

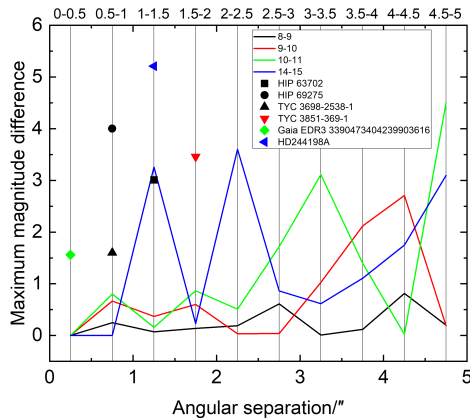


图 3 Gaia DR2中不同角距下多星候选体的最大星等差以及本次发现的6个多星系统候选体在g波段星等为8-11以及14-15下的星等差.相同颜色代表同一星等区间.

Fig. 3 Maximum magnitude difference as a function of angular distance for Gaia DR2 data and the multi-star candidates discovered in this work for g-band magnitudes at 8-11 and 14-15. Systems within different magnitude ranges are shown with different colors.

由于Gaia团队在Gaia EDR3之后还将发布星表数据,这些星等差较大的双星候选体目标可能会包含在后续的数据集中.但目前使用地基大口径望远镜进行直接成像观测可以直接观测到这些多星候选体的伴星,因此在观测星等差较大且角距较小的多星系统时,使用地面大型望远镜的直接成像技

术观测具有独特的优势.

表 5 6个多星系统候选体的IPD\_FRAC\_MULTIPLEAK  
Table 5 IPD\_FRAC\_MULTIPLEAK of six multi-star system candidates

Name	IPD_FRAC_MULTIPLEAK(%)
HIP63702	13
HIP69275	0
TYC3698-2538-1	45
TYC3851-369-1	0
Gaia EDR3 3390473404239903616	12
HD244198A	17

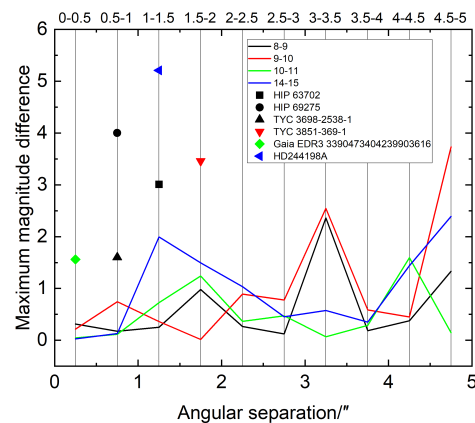


图 4 Gaia EDR3中不同角距下多星候选体的最大星等差以及本次发现的6个多星系统候选体在g波段星等为8-11以及14-15下的星等差.相同颜色代表同一星等区间.

Fig. 4 Maximum magnitude difference as a function of angular distance for Gaia EDR3 data and the multi-star candidates discovered in this work for g-band magnitudes at 8-11 and 14-15. Systems within different magnitude ranges are shown with different colors.

## 6 结论与展望

本文针对近期在Palomar天文台Hale望远镜的两次对Gaia DR1和Gaia DR2中的42个目标的观



测结果, 一共观测到了8个多星系统, 其中新发现了5个双星系统候选体, 在已确认的3个双星系统中, HD244198A被观测到可能是1个三星系统. 为了进一步验证观测结果, 2022年将申请丽江高美谷观测站2.4 m望远镜对上述发现的多星候选体进行认证观测, 并开展新目标源的高对比度成像观测, 期望搜寻到更多新的系外行星或褐矮星候选体. 同时, Fontanive等<sup>[49]</sup>将Gaia DR2星表和已有的4个系外行星数据进行交叉比较, 确定出一系列系外行星或低质量伴星, 并得到了不同类型恒星为双星或伴星的比例. 在我们确认了更多的多星系统和低质量伴星后, 希望可以进一步验证不同温度的恒星是多星系统或者存在低质量伴星的概率.

**致谢** 本文研究结果获得了TAP (Telescope Access Program)的支持.

### 参考文献

- [1] Dou J P, Ren D Q. *ApJ*, 2016, 832: 84
- [2] Dou J P, Ren D Q, Zhu Y T, et al. *RAA*, 2010, 10: 189
- [3] Macintosh B A, Graham J R, Palmer D W, et al. *SPIE*, 2008, 7015: 701518
- [4] Macintosh B, Graham J R, Ingraham P, et al. *PNAS*, 2014, 111: 12661
- [5] Macintosh B, Graham J R, Barman T, et al. *Science*, 2015, 350: 64
- [6] Beuzit J L, Feldt M, Dohlen K, et al. *SPIE*, 2008, 7014: 701418
- [7] Zhu Y T, Dou J P, Zhang X, et al. *RAA*, 2021, 21: 82
- [8] Chauvin G, Lagrange A M, Bonavita M, et al. *A&A*, 2010, 509: A52
- [9] Hayward T L, Biller B A, Liu M C, et al. *PASP*, 2014, 126: 1112
- [10] Marois C, Macintosh B, Barman T, et al. *Science*, 2008, 322: 1348
- [11] Marois C, Zuckerman B, Konopacky Q M, et al. *Nature*, 2010, 468: 1080
- [12] Dou J P, Ren D Q, Zhao G, et al. *ApJ*, 2015, 802: 12
- [13] Bonnefoy M, Lagrange A M, Boccaletti A, et al. *A&A*, 2011, 528: L15
- [14] Lagrange A M, Bonnefoy M, Chauvin G, et al. *Science*, 2010, 329: 57
- [15] Carson J, Thalmann C, Janson M, et al. *ApJ*, 2013, 763: L32
- [16] Marois C, Lafreniere D, Doyon R, et al. *ApJ*, 2006, 641: 556
- [17] Lafreniere D, Marois C, Doyon R, et al. *ApJ*, 2007, 660: 770
- [18] Soummer R, Pueyo L, Larkin J. *ApJ*, 2012, 755: L28
- [19] Amara A, Quanz S P. *MNRAS*, 2012, 427: 948
- [20] Amara A, Quanz S P, Akeret J. *A&C*, 2015, 10: 107
- [21] Ren D Q, Dou J P, Zhang X, et al. *ApJ*, 2012, 753: 99
- [22] Ren D Q, Chen Y L, *MNRAS*, 2021, 502: 2158
- [23] Bowler B P. *PASP*, 2016, 128: 102001
- [24] Mathieu R D. *ARA&A*, 1994, 32: 465
- [25] Duchêne G, Kraus A. *ARA&A*, 2013, 51: 269
- [26] Tohline J E. *ARA&A*, 2002, 40: 349
- [27] Langer N. *ARA&A*, 2012, 50: 107
- [28] Padgett D L, Brandner W, Stapelfeldt K R, et al. *AJ*, 1999, 117: 1490
- [29] Padgett D L, Strom S E, Ghez A. *ApJ*, 1997, 477: 705
- [30] Radice D, Bernuzzi S, Perego A. *ARNPS*, 2020, 70: 95
- [31] Shibata M, Hotokezaka K. *ARNPS*, 2019, 69: 41
- [32] Olibier B, Catherine T. *GAIA: a European Space Project*. EAS Publications Series, 2002
- [33] Klioner S A, Seidelmann P K, Soffel M. *Relativity in Fundamental Astronomy: Dynamics, Reference Frames, and Data Analysis*. Proceedings of the International Astronomical Union 261, January 28, 2010
- [34] Jordi C, DPAC Team, Gaia Science Team. *Highlights on Spanish Astrophysics IX*, 2017: 30
- [35] Gaia Collaboration, Brown A G A, Vallenari A, et al. *A&A*, 2018, 616: A1
- [36] Gaia Collaboration, Brown A G A, Vallenari A, et al. *A&A*, 2021, 649: A1
- [37] Oh S, Price-Whelan A M, Hogg D W, et al. *AJ*, 2017, 153: 257
- [38] Gagné J, Faherty J K. *ApJ*, 2018, 862: 138
- [39] Gagné J, Roy-Loubier O, Faherty J K, et al. *ApJ*, 2018, 860: 43
- [40] Dekany R, Bouchez A, Britton M, et al. *SPIE*, 2006, 6272: 62720G
- [41] Burruss A R S, Dekany R G, Roberts J E, et al. *SPIE*, 2010, 7736: 7736Q
- [42] Dekany R, Roberts J, Burruss R, et al. *ApJ*, 2013, 776: 130
- [43] Wenger M, Ochsenbein F, Egret D, et al. *A&AS*, 2000, 143: 9
- [44] Ahn C P, Alexandroff R, Prieto C A, et al. *ApJS*, 2012, 203: 21
- [45] Skrutskie M F, Cutri R M, Stiening R, et al. *AJ*, 2006, 131: 1163
- [46] Lindgren L. *IAU*, 2018, 330: 41
- [47] Zavada P, Píška K. *AJ*, 2020, 159: 33
- [48] El-Badry K, Rix H W, Heintz T M. *MNRAS*, 2021, 506: 2269
- [49] Fontanive C, Gagliuffi D B. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2021, 8: 16

## Multi-star System Observations Based on the Direct-imaging Method

CHEN Yi-li<sup>1,2,3</sup>   ZHU Yong-tian<sup>1,2,4</sup>   ZHAO Gang<sup>1,2</sup>   DOU Jiang-pei<sup>1,2</sup>

*(1 National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042)*

*(2 CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042)*

*(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)*

*(4 School of Astronomy and Space Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)*

**ABSTRACT** The direct-imaging exploration can obtain comprehensive physical information of exoplanets, which is a key technology to search for extraterrestrial life in the future. In this paper, based on our recent high-contrast imaging data of ground-based telescope, the newly discovered multi-star candidates are presented. In the early stage, combined with the ability of high-contrast imaging equipment for the exoplanets in the ground-based system, we select about 1000 targets from published works which are compiled using the catalogs released by Gaia. These targets are distributed in different young star clusters. Recently, we used Hale Telescope at Palomar Observatory to carry out high-contrast imaging observation on 42 of the above targets in the K-band. Most of the observed targets are 7.5–14 in the V-band. In 2019, after two rounds of observation, we discover six multi-star system candidates. It is however difficult to find out whether these targets are single-star or multi-star systems in Gaia DR2 (Data Release 2) catalog and Gaia EDR3 (early Data Release 3) catalog.

**Key words** binaries: visual, infrared: stars, methods: observational