

夜天文中的自适应光学

冯麓^{1,†} 张玉佩² 宋菲君^{3,4} 薛随建¹ 沈志侠¹ 郭广妍⁴

(1 中国科学院国家天文台 北京 100012)

(2 浙江省计量科学研究院 杭州 310018)

(3 大恒新纪元科技股份有限公司 北京 100080)

(4 中国科学院光电研究院 北京 100094)

2018-02-27收到

† email: jacobfeng@bao.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20180602

Adaptive optics for night astronomy

FENG Lu^{1,†} ZHANG Yu-Pei² SONG Fei-Jun^{3,4} XUE Sui-Jian¹

SHEN Zhi-Xia¹ GUO Guang-Yan⁴

(1 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

(2 Zhejiang Province Institute of Metrology, Hangzhou 310018, China)

(3 Daheng Science & Technology, Beijing 100080, China)

(4 Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

摘要 自1989年自适应光学首次在地基天文望远镜上成功实现衍射极限的天文观测以来, 自适应光学系统已逐渐发展成为地基大口径天文望远镜必备的仪器之一。由于当今夜天文观测对仪器性能的要求越来越苛刻, 为了提高夜天文观测中的适用性, 自适应光学系统近20年来也在不断发展, 涌现出多种新型自适应光学系统, 如激光导星自适应光学系统、多层共轭自适应光学系统、极限自适应光学系统、近地层自适应光学系统等。尽管自适应光学系统的性能不断提高, 但仍存在其局限性。文章分析了目前国际上已有自适应光学系统, 探讨近年来夜天文当中应用的自适应光学系统及相关进展。

关键词 天文学, 天文技能和技术, 自适应光学

Abstract Ever since adaptive optics was first utilized in 1989 in ground-based astronomy to achieve diffraction-limited observation, adaptive optics systems have gradually become must-have instruments for large ground-based astronomical telescopes. Due to the increasingly stringent requirements for scientific instruments used for night astronomy observation, and to improve compatibility, over the last 20 years adaptive optics has undergone continuous and rapid development. Many new schemes have emerged, for instance, laser guide star adaptive optics, multi-conjugate adaptive optics, extreme adaptive optics, and ground layer adaptive optics. However, even though their performance is improving, there are still many limitations. In this article we analyze systems that are already in use, and discuss the advancement of several new systems specifically designed for night astronomy applications.

Keywords astronomy, astronomical skills and techniques, adaptive optics

1 引言

历史悠久的天文学自诞生以来就是一门实测与理论结合极为紧密的学科。观测设备和技术的发展不断地加深着人类对宇宙的了解。帮助天文学家在观测时能够看得更深远、更清晰就成为天文望远镜发展的永恒目标。

更深远，即要求观测设备需要有足够的集光本领或灵敏度，能够探测来自暗弱天体的信号；更清晰，则要求观测设备应具有足够高的空间分辨本领，能够将密近的天体或天体的细节清晰分辨。考虑到望远镜的集光本领与望远镜的口径成平方关系，灵敏度在衍射极限情况下与口径成四次方关系，空间分辨率在理想情况下与口径成反比关系，因此，在望远镜发展的400年间，地基望远镜的口径在不断增大，相应的观测能力也越来越强，进而帮助我们不断揭示着宇宙中的秘密(见图1)。

尽管地基望远镜的口径在不断增大，但在实际观测时，望远镜的分辨能力却由于上空大气湍流的限制而达不到理论所预测的衍射极限，即 $\theta_{\text{diff}} = 1.2 \times \frac{\lambda}{D}$ ，其中 λ 为观测波长， D 为望远镜口径。实际中存在一个随地点、时间和曝光长度

等因素相关的极限值^[1]，即所谓的视宁度限 θ_0 。以10米望远镜为例，其对应的理论衍射极限约为0.01角秒。但即使坐落在世界上公认最好的两个天文台址之一的夏威夷莫纳克亚(Mauna Kea)山上的10米凯克(Keck)望远镜，在视宁度限下所能达到的最佳分辨率也仅为0.25角秒(对应波长500 nm)^[2]。由于成像的点扩散函数(Point Spread Function, PSF)被视宁度所限制，口径增大仅增加了望远镜镜接收的光子的数量，接收光子数正比于($D^2 \times$ 大气透过率 \times 曝光时间)，而没有减小对应的噪声，噪声正比于($D^2 \times$ 背景噪声 $\times \theta_0 \times$ 曝光时间)^{0.5}，因此灵敏度仅与口径成平方的关系。对于衍射极限下的观测，由于PSF的大小正比于 λ/D ，噪声项不再与 D 和 θ_0 相关，灵敏度也就提升为与口径 D 成4次方的关系。考虑到10米级大口径望远镜的观测费用在6千美元/小时以上^[3]，提高灵敏度直接带来的收益将是望远镜的整体观测效率的提升。因此如何恢复大口径地基望远镜口径大所带来的优势，使其能够助力现代天文观测成为亟待解决的问题。

自适应光学系统(Adaptive Optics, AO)的出现在一定程度上解决了上述问题，作为望远镜整个系统当中的波前校正系统，使大口径地基望远镜第一次能够在地面上实现衍射极限观测。正如Merkle在文献[4]中提到，当自适应光学首次成功在欧洲南方天文台的1.52米望远镜上实现衍射极限天文观测时，“做地基天文观测的天文学家长久以来的梦想终于成真”。自此，国际上大口径望远镜争相研发并配备传统自适应光学系统，利用自适应光学系统进行天文研究的文章数量也在逐年增长(图2)。

但是，自适应光学受到技术水平的限制，并不完美，存在局限性。对于天文观测而言，与自适应光学相关的技术要求分别有：

(1)观测波段。表征系统校正的波长范围；

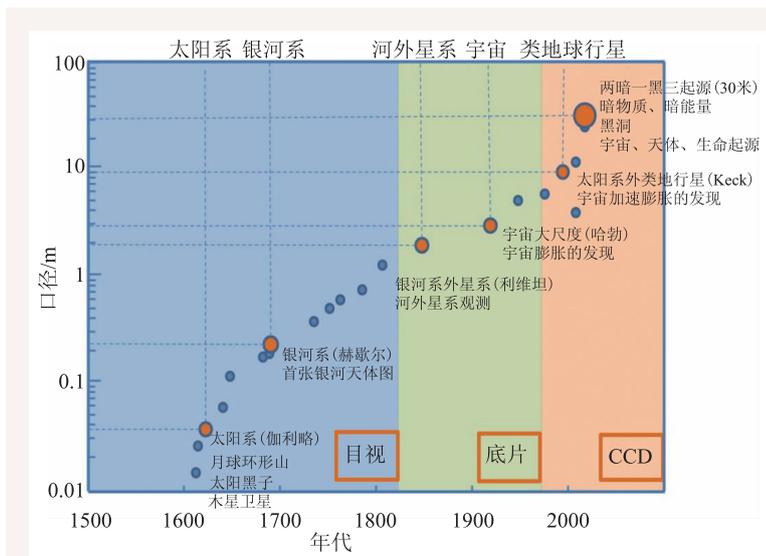


图1 望远镜的发展趋势。下方横轴为年代，纵轴为望远镜尺度，上方横轴为当时对宇宙认知的“范围”。不同底色分别对应望远镜的不同后端，从最早人眼观测(蓝)，到乳胶底片(绿)，再到现代各类CCD(橙)。技术革新提高了天文学家对宇宙的观测能力，从而加深了对宇宙的了解

(2)极限星等。表征系统所能探测到的最暗天体的亮度；

(3)校正视场大小。表征系统可以提供有效校正的视场范围；

(4)视场内的分辨本领。表征系统在提供校正时，在校正视场内对天体目标的分辨能力；

(5)天空覆盖率。表征系统能够有效提供校正的天区占望远镜可观测全部天区的百分比；

(6)对比度。表征系统校正下，所能观测的两颗密近天体亮度之比的极限值，换言之，在一颗亮星附近天区能找到暗星，两者亮度的比值。

对于现阶段的自适应光学系统，同时以高性能实现以上6点尚无可能。因此通常会根据科学目标对以上6点不同的优先级要求确定自适应光学系统的形式。本文将在第2节中介绍目前国际上出现的几种应用于夜天文的自适应光学系统的原理，第3节中介绍它们的应用以及发展现状，第4节展望来自适应光学系统在夜天文中的应用。

2 自适应光学系统原理简介

由于观测天体距离遥远，来自天体的光波波阵面在到达地球大气层上方时已经被近似为平面波。如果望远镜放在太空，那么波前由望远镜成像后，将得到一个单纯由望远镜口径 D 决定的艾里斑(图3(a))，其角直径 $\theta \approx 1.22 \times \frac{\lambda}{D}$ 。由于存在大气，平面波前就会由于大气湍流产生畸变。地面上的望远镜接收成像后，将得到斑点图(Speckle Image, 图3(b))。图中每一个斑点的大小均与艾里斑近似。由于天文观测往往需要长时间曝光，最终得到的图像将是一幅幅短曝光散斑图叠加出来的巨大光斑。这个光斑的尺寸与曝光过程中大气湍流的强度分布直接相关。这个尺寸被定义为视宁度 θ_{seeing} ，表征大气湍流在垂向分量上整体对成像分辨率影响的特征尺度，称为弗莱德

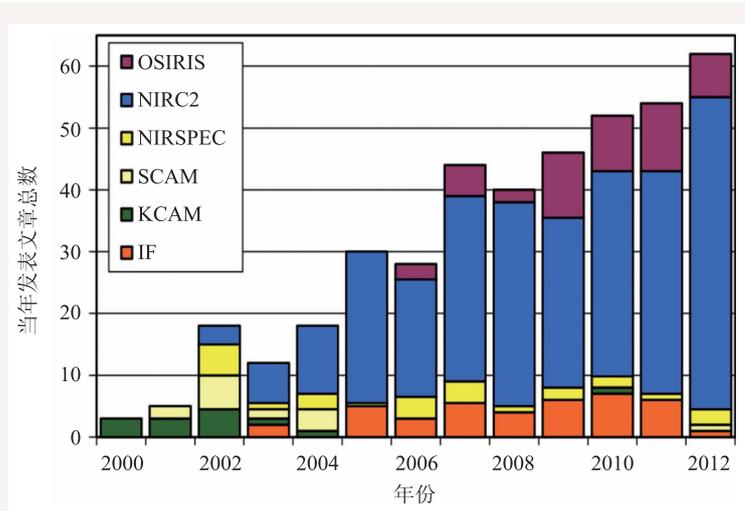


图2 利用凯克2望远镜上的自适应光学系统观测并撰写发表的科学文章逐年统计。图中不同颜色代表了其上配备有自适应光学系统的科学仪器。图片源自于 P. Wizinowich 2013 年的文章^[5]

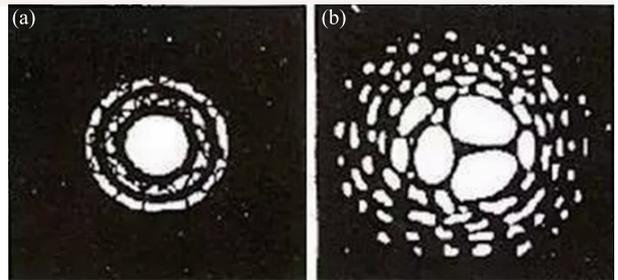


图3 艾里斑(a)和望远镜进行短时间曝光后所得到的斑点图(b)

参数(Fried Parameter)，即 $r_0 \approx 1.22 \times \lambda / \theta_{\text{seeing}}$ 。

20世纪50年代，天文学家 Horace W. Babcock 提出了“视宁度校正装置”概念^[6]：将一个镜面面型通过主动控制进行高速变化的反射镜放置在望远镜成像的光路中，再假设该系统可以通过某种参考信号探测得到大气引起的湍流畸变，就可以将该镜面面型实时校正。入射波前被反射后将会恢复成平面波前进入后续光路，最终得到没有大气畸变的高分辨天文图像(图3)。这个设计的结构与当前的自适应光学系统基本相近。实际上，其后发展出来的更为复杂的自适应光学系统，也均遵从以上原理。整个系统也就可以按功能划分为波前探测子系统、波前校正子系统、实时控制子系统、以及导星生成子系统4部分。

图4给出了结构最基础、目前在国际上应用最广泛的单层共轭自适应光学系统(Single Conju-

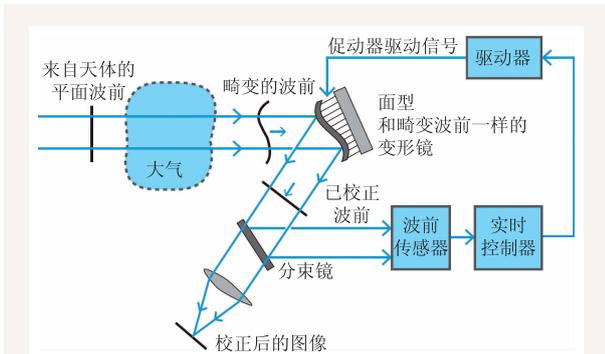


图4 单层共轭自适应光学系统简图：将畸变的波前恢复成平面波，实现接近衍射极限分辨率的图像。该系统主要分成4部分，波前校正子系统(变形镜及其驱动器，“双手”)，波前探测子系统(波前探测器，“双眼”)，联系这两部分的实时控制子系统(“大脑”)，以及生成参考信号的导星生成子系统。Babcock提出的设计与这个原理简图近似

gate Adaptive Optics, SCAO)的结构简图。图中从望远镜传输过来的波前先由波前校正器校正。校正后的波前一部分通往科学仪器进行科学观测，另一部分波前残差由波前传感器接收，实时控制器根据测量得到的信号重构波前，并转换为控制信号，再次传输给校正器，实现整个系统的闭环控制。如果将望远镜观测方向上整层大气的湍流变化压缩成一层，就可以利用一套波前传感器、一套波前校正器实现一定视场范围内的校正。由于大气湍流在垂向分量上存在特定分布，在不同高度上，湍流的演化速度和水平向传播速度均存在差异，使得在一定时间内能够将全高度上湍流“定住”并可以整体看作一层的角度范围很小，该张角被称为大气等晕角 θ_0 。在 θ_0 的视场范围内自适应光学系统可以实现有效校正，超出的视场部分图像质量会急剧下降。在较好的台址，通常在500 nm时 θ_0 约为2—3角秒。这段能够将湍流“定住”的时间被称作大气相干时间 τ_0 ，在可见光波段约为数毫秒。考虑到波长 λ 与 θ_0 和 τ_0 均存在 $\sim\lambda^{1.2}$ 的关系，以及波前校正器、波前探测器等器件动态性能和计算性能的限制，目前SCAO普遍工作于1 μm 以上的近红外—红外波段，校正视场与大气等晕角相近，闭环带宽在百赫兹到千赫兹范围。波长越长校正的水平也越好。

如前所述，自适应光学系统除了上述3部

分，还需借助天空中的光源为探测大气湍流提供校准信号。理想情况下，可以采用所观测的天体目标本身作为参考信号，通过探测该目标发出的波前实现校正。由于目前夜天文观测目标已普遍较暗(10米级望远镜SCAO K波段观测目标的极限星等约为23—24等)，仅依靠观测目标本身，在微秒量级的曝光时间内波前探测器难以达到足够的信噪比实现波前探测。如果在观测目标方向数角秒的等晕角范围内能找到另一颗足够亮的自然亮星，观测目标和这个自然亮星方向基本一致，大气湍流对它们的影响便基本相同，因而可以利用这颗自然亮星作为校准星，为波前探测器提供校准信号。自然导星(Natural Guide Star, NGS)的位置和亮度对于自适应光学系统的校正性能就有着重要的影响。美国的10米凯克望远镜其自然导星SCAO实现闭环的导星极限亮度为15等^[7]。天空中能够满足亮度要求的天体数量非常有限，还能同时满足与观测目标之间的距离要求的亮星就更少。根据文献[8]，在K波段进行校正时，可用于校正的自然导星所能覆盖的天区(假设自然导星为中心的等晕角范围内可被AO矫正)与全天区面积之比，即天空覆盖率，小于1%^[9]。这使得单纯依赖自然导星进行校正的自适应光学系统应用非常受限。

为了提高自适应光学系统的天空覆盖率，20世纪80年代美国军方在星火靶场(Star Fire Optical Range)率先展开了利用激光在高空大气中生成亮斑，人工生成亮星的技术，称为激光导星(Laser Guide Star, LGS)技术。截至目前，根据激光导星的生成机理，LGS主要分为两种：一种利用激光与15 km高度以下的底层大气中气体分子与激光之间的瑞利散射生成激光导星，称为瑞利激光导星^[10]。一种利用589.19 nm的钠激光共振激发处于高空90—110 km高度的游离态的钠原子产生共振荧光作为激光导星，称为钠激光导星^[10]。由于激光导星可以通过调整发射望远镜的方向调节导星在天空的位置，就可以保证在观测视场内总存在亮星实现高阶波前畸变的探测。但因为生成导星的激光在上行和下行过程中在大气中所通过的路径相同，方向相反，所以俯仰畸变(Tip/Tilt

模,即Zernike模中的 Z_1 模)无法通过激光导星探测得到,仍需要辅以一颗自然亮星确定Tip/Tilt(TT)模。在这种情况下,考虑到自然亮星仅需探测TT模,对于它到视场中心的距离以及亮度的要求较之前大幅下降,同样Keck望远镜的SCAO系统,在采用激光导星后,自然导星的极限星等要求降为19等,导星与观测目标间的距离要求也可以放宽到60角秒^[11](红外波段的TT导星所带来的性能提升更大),更重要的是,天空覆盖率也从原来的约1%大幅提高到约80%^[12]。当然,激光导星同样存在着局限性。由于激光导星相较自然导星高度有限,所能探测的大气湍流为导星与望远镜入瞳面所组成的锥体内所包含的部分大气,与无穷远天体与望远镜入瞳面组成的圆柱存在区别。高度越高激光导星所能探测到的湍流层面积越小,即会出现所谓的“锥体效应”(Cone Effect)。其结果就是对大气湍流采样不完备^[8],会在波前探测部分引入额外残差。同时导星无论采用脉冲激光生成,或是连续波激光利用门限技术(Range Gating)生成,均存在一定长度,对于大口径望远镜来说,距导星较远的位置在波前探测时会由于几何投影存在导星光斑拉长现象^[13]。人造导星由于对焦距离与观测目标不同也会带来对焦非等晕(Focal Anisoplanatism, FA)现象^[14]。钠导星对大气钠层的依赖性也会使其亮度、高度发生实时变化,进而影响自适应光学系统的矫正性能^[15]。

尽管激光导星在实际应用中存在上述诸多问题,但由于它可以极大地提高自适应光学系统的适用天区,目前国际上的许多自然导星自适应光学系统都已展开或已完成相应的升级工作(图5)。前面提到由于激光导星存在锥体效应,通过结合不同方向的几颗导星对应的锥体,结合相应的波前重构方法就可以实现大气湍流的宽视场(1角分以内)层析重构,更大视场内(数角分)局部多个小视场重构或近地层重构。当导星之间间距不大,锥体重叠的部分高于湍流高度时,就可以提高对大气湍流的探测范围,实现更宽视场的衍射极限校正。如果波前重构是按照不同高度分层计算,同时变形镜也共轭到不同分层进行校正,这种系统被称作多层共轭自适应光学系统(Multi-Conjugate

Adaptive Optics, MCAO, 见图6(b))。如果波前重构在分层计算之后再合成为一层,并由单个变形镜实现校正,该系统则称为激光层析自适应光学系统(Laser Tomography Adaptive Optics, LTAO, 见图6(c))。这两种系统可以在K波段1角分量级的视场大小内实现衍射极限的校正,但如需更大视场下的衍射极限观测目前所提出的系统概念是多目标自适应光学系统(Multi-Object Adaptive Optics, MOAO, 见图6(d))。这对于需要在10角分量级的大视场内同时观测多个目标的科学案例极有帮助。该系统的做法是仅针对视场内各个目标做小区域的衍射极限校正,近似于利用多个单导星自适应光学系统组合成一套完整系统。但由于该系统采用开环控制,对探测及校正器件要求极高,目前仅有RAVEN系统^[17]在威廉·赫歇尔望远镜(William Herschel Telescope, WHT)进行过实验,并在昴星团望远镜上结合IRCS光谱仪进行过科学观测^[18]。

由于大气湍流的主要能量集中于近地层(地表100 m高度以下),如果仅校正近地层,就可以将激光导星的几个锥体间的角度分得更大,在牺牲全高度大气探测能力的情况下实现更大视场的探测。这种仅能在数角分视场内实现优于视宁度分辨率2—3倍的均匀校正的系统,被称作近地层自适应光学系统(Ground Layer Adaptive Optics, GLAO, 见图6(a))。尽管空间分辨率相较衍射限自适应光学低,但该系统在衍射限自适应光学无法工作的较差

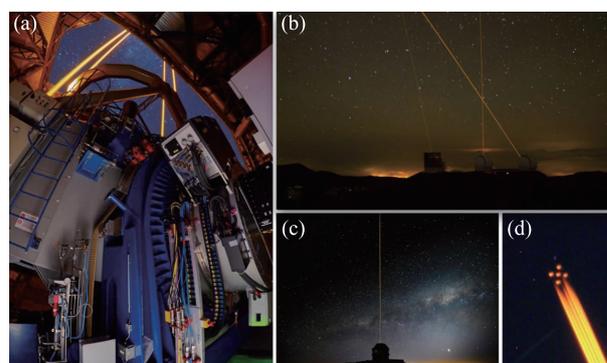


图5 国际地基10米级光学红外望远镜已纷纷装备激光导星升级其自适应光学系统 (a)欧洲南方天文台的VLT; (b)夏威夷山顶,从左至右,日本的昴星团望远镜,美国的凯克I&II; (c)美国的双子望远镜(南); (d)美国双子望远镜在90 km高空钠层生成的钠激光导星星座

的湍流环境下仍能实现部分校正，有效地提高了望远镜的观测效率。美国的多镜面望远镜(Multi Mirror Telescope, MMT)最先实现了GLAO, K波段2角分视场内的分辨率提高了约2倍^[19]。美国的大双筒望远镜(Large Binocular Telescope, LBT)的ARGOS系统^[20], 在4角分的视场内, 星斑的半高全宽减小了2—3倍。欧洲南方天文台甚大望远镜(Very Large Telescope, VLT)在750 nm实现1角分

视场内分辨率2倍的提高^[21]。相对于传统自适应光学复杂的点扩散函数(Point Spread Function, PSF), GLAO的PSF稳定、易测得, 有利于后续的观测数据处理。其所带来的信噪比显著提高(4—9倍), 同时提高了望远镜的观测效率和观测深度(图7)。但此类系统由于校正视场大, 矫正镜通常需要作为望远镜次镜处于光路之中, 尺寸大, 加工难度高。正因为如此, 目前国际上实现此系统的望远镜并不多。

在GLAO系统提高校正视场大小的同时, 另一种自适应光学系统, 极限自适应光学系统(Extreme Adaptive Optics, ExAO)在努力将小视场内高阶像差校正到极低的水平(斯特雷尔比在90%以上), 从而结合星冕仪观测对比度极高(10^7 — 10^8 , 未来达到 $>10^9$)的科学目标。该系统对直接探测系外行星、研究其大气成分都有着重要意义。目前国际上最成功地安装了此类自适应光学系统的科学仪器, 一个是美国双子望远镜上的Gemini Planet Imager(GPI), 另一个是欧洲甚大望远镜上的Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet Research instrument(SPHERE)。这两台仪器上的ExAO所共有的特点包括: 校正精度高(斯特雷尔比 $>90\%$), 校正频率快(>1000 Hz), 子孔径/变形镜促动器排列密度大(校正范围内 >1000 个子孔径)。

3 自适应光学系统夜天文应用

正如前文所述, 望远镜以及提升其性能的自适应光学系统对天文学观测至关重要, 但不可忽

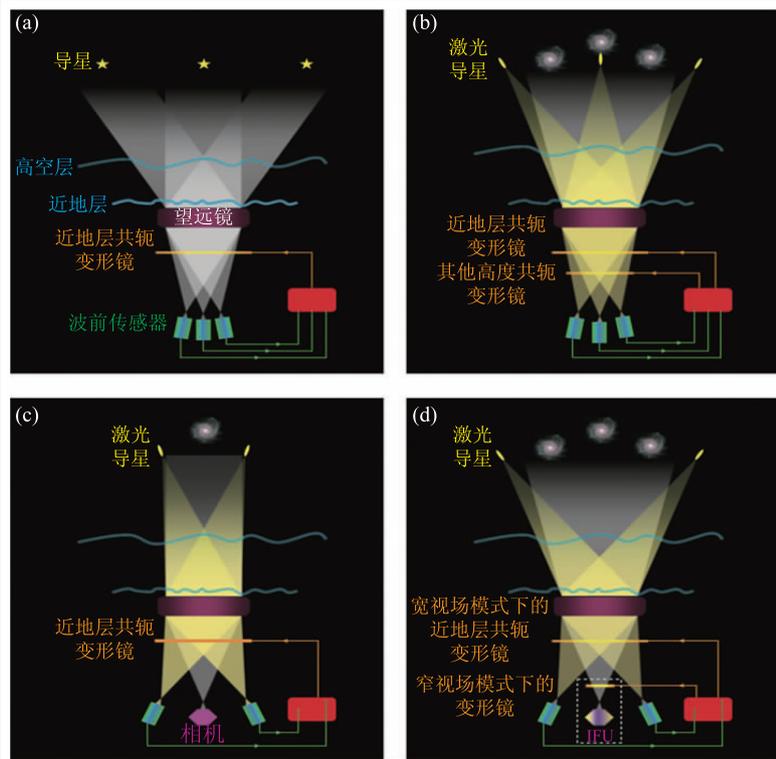


图6 多激光导星自适应光学系统简图^[16] (a)近地层自适应光学系统; (b)多层共轭自适应光学系统; (c)激光层析自适应光学系统; (d)多目标自适应光学系统

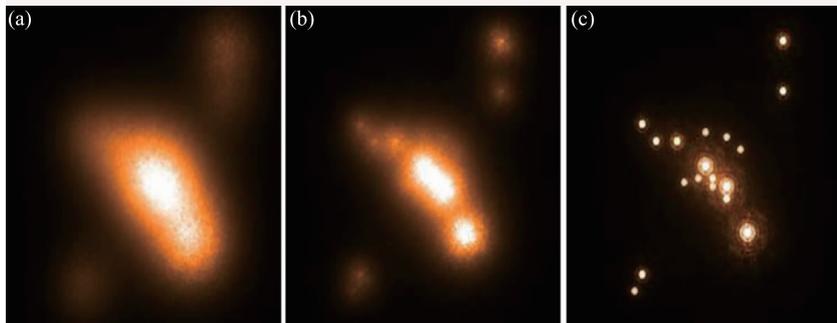


图7 未来39米欧洲极大望远镜(E-ELT)仿真得到不同情况下的观测效果图(图像大小为2角秒 \times 2角秒)^[22] (a)视宁度极限下; (b)近地层自适应光学系统; (c)激光层析自适应光学系统

表1 目前国际科学产出前列的配备有自适应光学的科学仪器列表

编号	仪器名称	望远镜名称	开始运行时间	仪器模式	视场	自适应光学种类, 其他
1	NACO [1, 6]	VLT	2002	成像: JHKsL'M' 楞栅: 0.9—4.9 μm ($R=122-1902$, 已停止服务) 星冕仪 偏振仪	14×14角秒 28×28角秒	NGS SCAO
2	SINFONI [2]	VLT	2004	积分视场光谱仪: JHK 光谱分辨率: 2000 (J), 3000 (H), 4000 (K)	3×3角秒 0.8×0.8角秒	卡塞格林焦点 NGS SCAO 将结合 AOF 升级为 ERIS, $R=8000$
3	SPHERE [3, 7]	VLT	2015	成像 IRDIS: 0.95—2.3 μm 积分视场光谱仪 IFS: 0.95—2.3 μm , $R=50$, ~30 成像光谱仪 IRDIS: 0.95—2.3 μm , $R=50$, 500 偏振成像: 500—900 nm	11×11角秒 3.5×3.5角秒	仅对图像中心进行校正 EXAO
4	HAWK-I [4]	VLT	2018	成像: JHK	7×7角秒	GLAO
5	MUSE [5]	VLT	2018	积分视场光谱仪: 480—930 nm	1×1角分 7.5×7.5角秒	VISIBLE GLAO[13] VISIBLE LGS LTAO
6	ERIS [6]	VLT	2020	成像: J-M' 积分视场光谱仪: JHK, $R=8000$ 星冕仪: L-, M-波段	27×27角秒, 54×54角秒 8×8角秒	MCAO
7	NIRSPAO (NIRSPEC+AO)	Keck-2	1999	光谱: 0.95—5.5 μm 光谱分辨率: $R=25000$ (无 AO), $R=100000$ (有 AO)	46	NGS/LGS SCAO
8	NIRC2	Keck-2	2006	成像: J-Ms 光谱: 0.9—5.3 μm , $R=1000$ 星冕仪	10×10角秒 20×20角秒 40×40角秒	NGS/LGS SCAO
9	OSIRIS [8]	Keck-1	2005	积分视场光谱仪: 1—2.4 μm , $R=3800$ 成像: 1—2.4 μm	4.8×6.4角秒 20.4×20.4角秒	NGS/LGS SCAO
10	GNIRS [9, 10]	GEMINI-N	2004	成像: 1—2.5 μm (自适应校正波段) 长缝光谱: XJHKL (自适应校正波段), $R=1700$ (光谱全覆盖), $R=5100$ (部分光谱) 交叉色散光谱: 1—2.5 μm (自适应校正波段), $R=6000$ (光谱全覆盖), $R=18000$ (部分光谱)	不规则 keyhole 形状, 不同波段尺寸不同, 尺度大致为 20×20 角分 (14)	NGS/LGS SCAO (ALTAIR [11])
11	NIRI [9]	GEMINI-N	2004	成像: 1—2.5 μm (自适应校正波段)	22×22角秒 51×51角秒	NGS/LGS SCAO (ALTAIR [11])
12	NIFS [9]	GEMINI-N	2004	积分视场光谱仪: 1—2.5 μm , $R=5000$	3×3角秒	NGS/LGS SCAO (ALTAIR [11])
13	GSAOI [9]	GEMINI-S	2013	成像: 0.9—2.4 μm	85×85角秒	GeMS
14	GPI [9]	GEMINI-S	2014	积分视场光谱仪: 0.9—2.4 μm , $R=40$, 对比度 10^{-6} 偏振计: YJHK1K2	2.4×2.4角秒	EXAO GPI
15	ROBO-AO [12]	2.1 m KITT-PEAK	2011	成像: g'r'I'z', lp600	36×36角秒	ROBO-AO
16	PHARO	HALE	2000	成像: 1—2.5 μm 长缝光谱仪: $R=1500$	25×25角秒 40×40角秒	PALM3000
17	IRCS+AO188 [14]	SUBARU	2006	成像: 0.9—5.6 μm	实际校正视场约 30×30 角秒	NGS-LGS AO (AO188)
18	HiCIAO+AO188 [15]	SUBARU	2008	(直接, 偏振差分, 光谱差分) 成像: 0.9—2.5 μm	20×20角秒(直接成像) 20×10角秒(偏振差分成像) 5×5角秒(光谱差分成像)	NGS-LGS AO (AO188)
19	SCE+AO188 [16]	SUBARU	2011	成像: 0.95—2.4 μm	0.5×0.5角秒	EXAO
20	SAMI [17]	SOAR	2013	成像: 0.4—0.7 μm	184×184角秒	RLGS GLAO (SAM [18])
21	ShARCS [19]	3 m SHANE	2016	成像: 0.9—2.5 μm	20×20角秒	NGS/LGS SCAO (Shane AO)
22	LUCI [20]	LBT	2013	成像: 0.9—2.5 μm 光谱: 0.9—2.5 μm , z: 6877, J: 8460, H: 7838, K: 6687	4×4角分视宁度改正视场 或 30×30角秒内提供衍射极限视场	RLGS GLAO (ARGOS [21])
23	PISCES [22]	MMT	2007	成像: 1—2.5 μm	110×110角秒	RLGS GLAO

表2 表1中的文献引用列表

表1中引用文献	文档名称	网址
[1]	ESO NACO information page	http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/naco.html
[2]	SINFONI information page	http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/sinfoni.html
[3]	ESO SPHERE information page	https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/sphere.html
[4]	ESO HAWK-I information page	http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/hawki.html
[5]	ESO MUSE information page	https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/muse.html
[6]	R. Lenzen, "NAOS-CONICA first on sky results in a variety of observing modes", SPIE, 2003	
[7]	K. Dohlen, "The infra-red dual imaging and spectrograph for SPHERE: design and performance", SPIE, 2008	
[8]	OSIRIS	https://irlab.astro.ucla.edu/osiris/
[9]	GEMINI	http://www.gemini.edu/sciops/telescopes-and-sites/adaptive-optics
[10]	GNIRS information page	https://www.gemini.edu/sciops/instruments/gnirs/
[11]	ALTAIR	http://ast.noao.edu/observing/current-telescopes-instruments#kpno
[12]	ROBO-AO	http://roboao.caltech.edu
[13]	ESO GALACSI information page	https://www.eso.org/sci/facilities/develop/ao/sys/galacsi.html
[14]	IRCS	https://www.naoj.org/Observing/Instruments/IRCS/index.html
[15]	HICIAO	https://www.naoj.org/Observing/Instruments/IRCS/index.html
[16]	SCEXAO	https://www.subarutelescope.org/Projects/SCEXAO/02capabilities/01current_capabilities/
[17]	A. Tokovinin, "Science operation of the SOAR Adaptive Module (SAM)"	http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/papers/sam_2015.pdf
[18]	A. Tokovinin, "SOAR Adaptive Module (SAM): Seeing Improvement with a UV Laser"	http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1538-3873/128/970/125003/pdf
[19]	SHARC information page	https://mthamilton.ucolick.org/techdocs/instruments/sharcs/intro/
[20]	LUCI Instrument information page	http://abell.as.arizona.edu/~lbtsci/Instruments/LUCIFER/lucifer.html
[21]	ARGOS	http://www.mpe.mpg.de/ir/argos
[22]	PISCES+GLAO	C. Baranec, "Astronomical imaging using ground-layer adaptive optics", SPIE, (2007)

视的另一方面，即科学仪器，同样是达成天文发现的至关重要的一环。作为望远镜系统的终端，科学仪器早已替代了人眼、胶片，在自适应光学出现以前的数十年里已成为天文学家研究天文现象最重要的工具。在自适应光学系统出现后，自适应光学系统也仅是作为望远镜光路中的一部分，为科学仪器服务。所以在本节，我们从科学仪器的角度，探讨不同自适应光学系统是如何与它们结合在一起的。

P. Wizinowich 在文献 [5] 的图 8 中列举了 1995—2012 年国际上科学产出最高的配有自适应

光学系统的天文台。我们结合该结果与 ADS¹⁾ 查找的近年来已发表的文章，将截至 2016 年国际上产出最多的自适应光学系统列于表 1，系统参数出处列于表 2。

从表 1 中我们可以看到，这些排名靠前的配有自适应光学系统的科学仪器主要分布在国际上几个大口径望远镜中。这里面包含了：10 米级的甚大望远镜(VLT)，凯克望远镜(Keck)，双子望远镜(Gemini)，昴星团望远镜(Subaru)，大双筒望远镜(LBT)。同时在小口径方面也有应用，包括了 5 米级的多镜面望远镜(MMT)，南非光学望远镜

1) ADS, Astrophysical Data System, 天文数据系统, 是美国史密松天文台和美国航天局建设的一个文献在线数据档案库。
网址为: adsabs.harvard.edu。

(SOAR), 海尔望远镜(Hale), 2米级的基特峰2.1米望远镜以及沙因(Shane)望远镜。由于AO在大口径望远镜上所能带来的性能提升较小口径望远镜更为明显, 所以从AO发展的历程上来看, 该系统也是最先在大口径望远镜上率先实现其应用, 随后才逐渐向5米级望远镜上普及。

AO系统的实现难度与波长息息相关, 目前主要的AO系统均工作在近红外波段以上, 即波长约在0.9至2.5 μm (J、H、K波段)及更红的波段。校正的方式主要采用SCAO。校正的导星最早是自然导星, 现已普遍采用激光导星和自然导星相结合的方式(在没有合适自然导星的情况下, 可以采用激光导星提供参考信号)。校正视场的宽度普遍在10角秒量级。AO后端所搭配的仪器非常广泛, 从成像相机, 到低一高分辨光谱仪均有实例。这也从一方面证明了AO系统可以为天文学家在小视场, 近红外波段, 与各种仪器搭配, 提供相应的观测手段。

AO高空间分辨率、高灵敏度的特点, 使其非常适合对密近多天体、密集星场等在空间上进行精测的科学观测。根据远近不同, 这方面的应用大致可以分为4类: 太阳系内的科学观测、银河系内的科学观测、银河系外的科学观测, 以及比较独特的一类——系外行星的科学观测。具体的观测内容丰富多样, 限于篇幅, 我们只相应举几个比较有趣的例子。

AO在太阳系内的一类应用是对小行星的观测。估计小行星质量最好的方法是通过观察围绕小行星旋转的卫星的轨迹计算得到。由于卫星及轨道半径通常很小, AO的高分辨本领在这类应用中就显得尤为重要。1999年, 加拿大—法国—夏威夷望远镜(Canada—France—Hawaii Telescope, CFHT)利用AO成像系统发现了第一个围绕小行星45

Eugenia旋转的卫星, 精确测量了它的轨道(图8), 并发现45 Eugenia这颗小行星的密度比水的密度仅大了20%^[23]。在太阳系中的另一类应用是对行星及其卫星的观测。大口径望远镜的自适应光学系统可以在近红外—红外波段提供与哈勃望远镜可见光波段分辨率相近的成像能力, 且波长范围更宽, 仪器能力也更为多样。两者结合就可以从全光谱上了解观测目标的自身特点。De Pater利用自适应光学系统对土星表面的光斑进行了多波段的观测, 在5 μm 的图像中, 发现了仅有小光斑对应的风暴系统的图像在外围存在一个亮圈, 而大

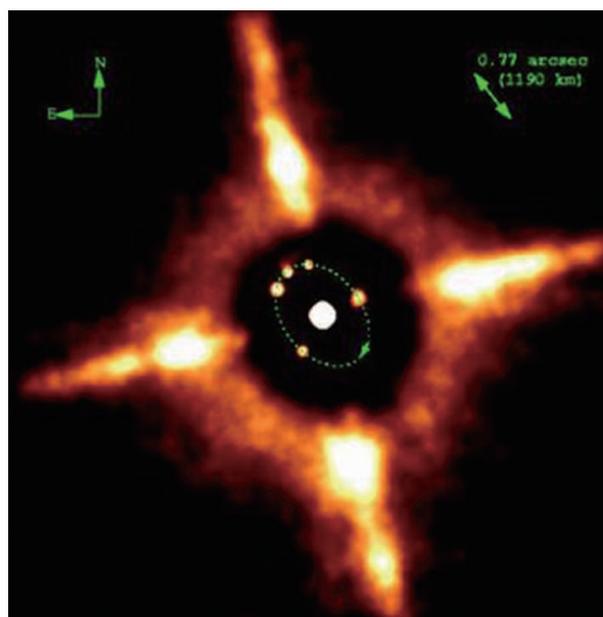


图8 CFHT观测的45 Eugenia及其小行星, 图中绿色虚线为小行星轨道, 轨道上的5个点为不同“月相”时的小行星。图中右上角的箭头标明了轨道长轴仅0.77角秒^[23]

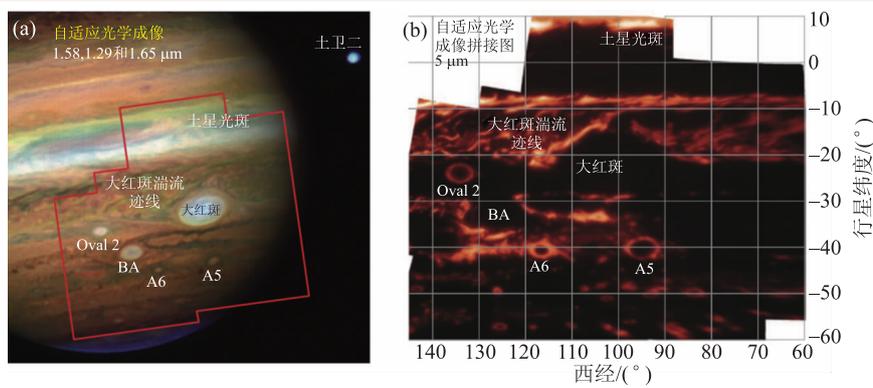


图9 多波段观测下的土星光斑 (a)近红外波段AO观测的土星光斑; (b)中红外波段的土星光斑。可见对于小光斑, 其周边存在光环^[24]

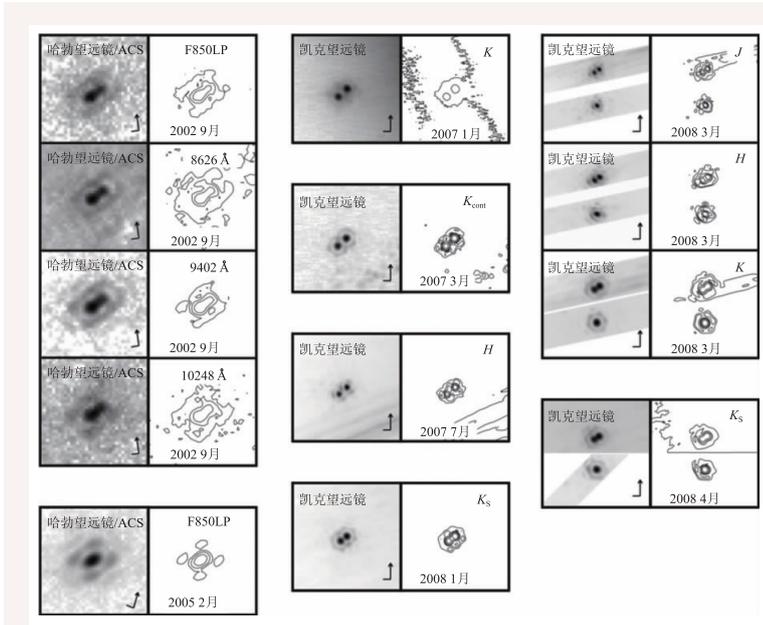


图 10 哈勃和凯克望远镜对双星系统 HD130948BC 在不同时段的观测结果^[27]

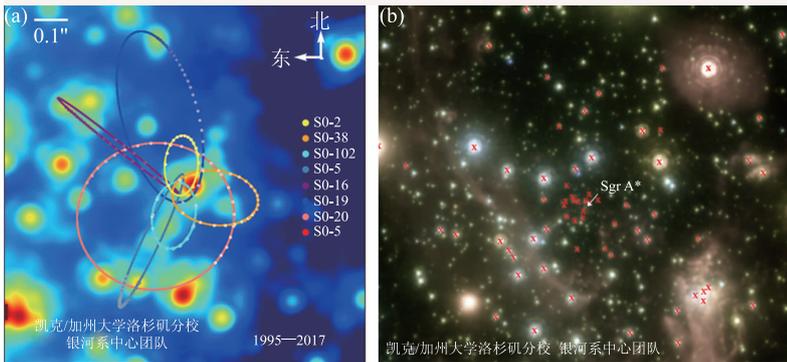


图 11 Ghez 领导的 UCLA 银河系中心团队(the Galactic center group)利用凯克激光导星自适应光学系统观测银河系中心及周围恒星的运动学轨迹(图像来自: <http://www.astro.ucla.edu/%7Eghezgroup/gc/>)

红斑(Great Red Spot)则无此类现象(图9)。基于此观测结果,天文学家对这些风暴系统建立了新的反气旋模型(anticyclone model^[24]),进而解释了为何大红斑这种大型风暴系统无法存在这样的反气旋。

在银河系内的研究中,AO 主要用于研究恒星形成以及与恒星形成相关的星周盘(circumstellar disk)、行星系统等。对于研究恒星分类,对极低质量的双星以及褐矮星双星的精测(轨道、亮度)就非常重要。由于这类恒星自身的温度较低,辐射主要集中在近红外波段,非常适合自适应观测。Laird Close 和 Nick Siegler^[25],以及后来的

Trent Dupuy、Michael Liu^[26]就分别利用 Gemini 望远镜以及凯克望远镜的自适应光学系统对极低质量的双星系统样本进行了普查式的高分辨观测(survey,即对大量的观测样本进行统一观测)。观测结果显示了极低质量的双星系统轨道椭圆率在 0.1—0.8 均有分布,中值为 0.34,轨道周期与椭圆率不相关,这都与类太阳恒星所不同。图 10 是 Dupuy 样本之一的一系列观测结果。

对银河系中心超大质量黑洞的观测是近年来自适应光学系统,尤其是激光导星自适应光学系统在科学观测方面的另一大重要研究领域。对银河系中心的测量结果可外推至其他星系的研究。这就要求对银河系中心角秒量级范围内进行高分辨率观测。由于距银河系中心 10 角秒范围内并无足够亮(可见光波段)的亮星作为自然导星,目前这种观测仅能依靠激光导星实现。Andrea Ghez 等人通过利用凯克望远镜及甚大望远镜激光导星自适应光学系统对银河系中心超大质量黑洞周边的恒星进行了运动学观测,揭示了银河系中心超大质量黑洞的一系列特性^[28]。图 11 是在提及凯克望远镜自适应光学系统科学产出和自身性能

时最常引用的一张观测效果图。图 11(b)是凯克激光导星自适应光学系统的观测图(10×10 角秒),图 11(a)为中心 1×1 角秒内恒星的运动轨迹。正是通过连续观测这些运动轨迹,天文学家才得以推测银河系中心超大质量黑洞的位置和质量。

自适应光学自然也被应用于观测银河系外的天体,尤其对红移在 1.5—3 范围内的星系的内部结构和动力学研究。由于这类星系的大小通常为 1—2 角秒,且特征光谱已经从可见光红移至近红外波段,所以非常适合目前的自适应光学系统进行观测。尤其是当自适应光学系统与积分视场光

谱仪结合后,对于研究星系内部结构非常有帮助。图12是Genzel等人利用甚大望远镜的积分视场光谱仪SINFONI (Spectrograph for Integral Field Observations)在近红外波段对红移2的星系ZC406690观测的结果^[29]。(a)图显示了该星系整体的旋转方向和速度,(b)图显示了星系中各个恒星形成的区域(clumps),(c)图则给出了理论计算结果(蓝色+红色)与实际观测结果的对比。可见,自适应光学系统在角秒量级的视场内实现0.1角秒的分辨率就可以有效地将星系内不同恒星形成的区域分辨开来,对其进行分别研究,就有助于进一步了解星系演化的规律。

寻找类地行星,尤其是对类地行星直接成像是近年来最为热门的天文观测方向。对类地行星的直接成像,是发现类地行星的最为直接的证据。由于宿主恒星与行星的亮度相差极大,并且距离很近,所以必须依靠以提高对比度和成像质量为目的的极限自适应光学系统。Christian Marois利用凯克望远镜、双子望远镜以及甚大望远镜的自适应光学系统对HR8799进行的成像观测直接捕获到了围绕该恒星旋转的3颗行星(图13左)²⁾。后续对该系统内行星的光谱研究更揭示这些类木行星的大气特征。尽管目前直接成像发现的行星数量还是有限,但是随着专门用于类地行星成像的仪器,如双子望远镜的GPI以及甚大望远镜的SPHERE(图13右)相继投入使用,相信会有更多的行星将会通过极限自适应光学系统直接成像法得以发现和证实。

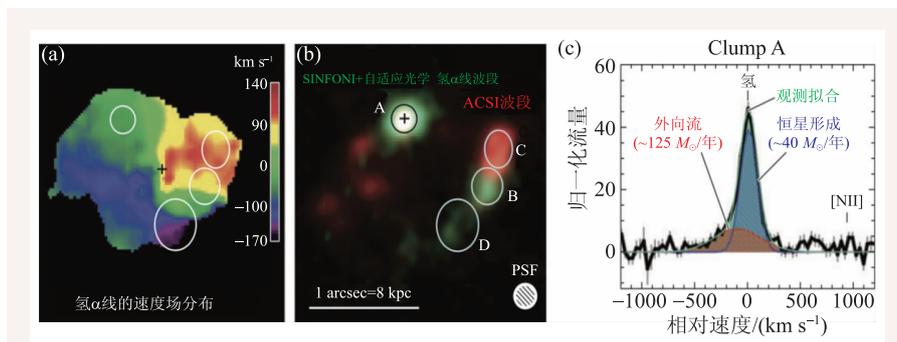


图12 Genzel利用甚大望远镜自适应光学系统和积分视场光谱仪SINFONI对ZC406690观测的结果

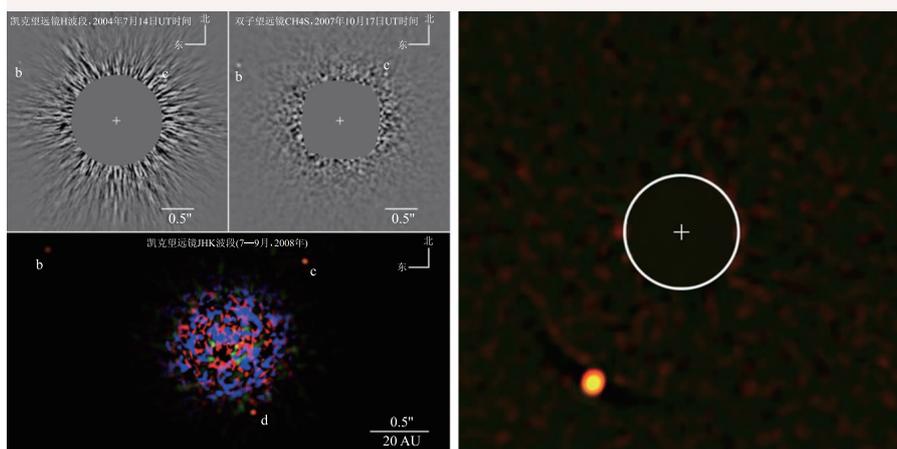


图13 (左)利用Keck和Gemini星冕仪及AO观测的HR8799及围绕其旋转的b、c、d三颗行星;(右)VLT SPHERE发现的第一颗系外行星HIP 65426b

4 未来展望

自适应光学系统近年来被越来越多的天文台所采用,但是目前的自适应光学系统还存在局限性。针对这些局限性,国际上已提出了一批新一代的自适应光学系统并已展开了相应的研究设计。这些新系统拟解决的主要问题包括以下几方面:(1)衍射极限下视场扩展至角分量级;(2)视宁度增强模式下(半高全宽缩小至视宁度1/2—1/3),视场扩展至5—10角分量级;(3)校正波段扩展至可见光波段;(4)全天区覆盖;(5)提高系统自动化程度,实现无人值守。这些内容在文中已有论述。

未来的自适应光学系统,尤其是国际上目前正在兴建的30米级望远镜的首光自适应光学系统,普遍以近红外波段校正、多层共轭自适应光

2) 在Wikipedia相关页面(HR8799)还有由7年观测数据(2010—2016年)所组成的该系统的运动动画。

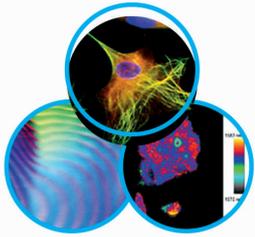


a HÜBNER Group company
cobolt.se



See things clearer

with Cobolt



High Performance Lasers

- Single frequency
- UV-VIS-MIR
- CW & Q-switched
- Unprecedented reliability with HTCure™







北京鼎信优威光子科技有限公司
地址: 北京市西城区太平桥大街力摩中心40915室 电话: 010-8350 3853
网址: www.dyna-sense.com 邮件: info@dyna-sense.com



扫描二维码, 获取更多信息

学系统(MCAO)为主, 配以多激光导星组成的导星星座, 实现角分量级的校正视场。这些系统无疑将会在灵敏度和分辨率上展示其强大威力, 在不久的将来, 帮助天文学家进一步揭示浩瀚宇宙中的无穷秘密。

参考文献

- [1] Fried D L. Journal of the Optical Society of America, 1996, 56(10): 1372
- [2] Canada-France-Hawaii Telescope Observatory. http://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/ObservatoryManual/CFHT_ObservatoryManual_%28Sec_2%29.html, 2003
- [3] NOAO, National Optical Astronomical Observatory. <http://ast.naoa.edu/system/tsip/more-info/time-calc-keck>, 2012
- [4] Merkle F, Kern P, Lena P *et al.* Messenger, 1989, 58: 1
- [5] Wizinowich P. Pub. Astr. Soc. Pac., 2013, 125: 798
- [6] Babcock H W. Pub. Astr. Soc. Pac., 1953, 65: 229
- [7] Wizinowich P, Acton D S *et al.* Performance of the W.M. Keck Observatory natural guide star adaptive optic facility: the first year at the telescope. American Astronomical Society, AAS meeting #214, id.219.01, Bulletin of the American Astronomical Society, 2000, 41: 725
- [8] Hardy J W. Adaptive optics for astronomical telescopes. Oxford University Press, 1998. 351
- [9] Irion R. Science, 2006, 311: 602
- [10] RP Encyclopedia: Laser Guide Stars. https://www.rp-photonics.com/laser_guide_stars.html
- [11] Wizinowich P. Pub. Astr. Soc. Pac., 2006, 118: 297
- [12] Keck Observatory. http://www.keckobservatory.org/mobile/single/laser_guide_star_available_for_adaptive_optics, 2003
- [13] Ribak E. Proc. SPIE, 2006, 6272: 62724E
- [14] Butterley T *et al.* Proc. SPIE, 2004, 5490: 966
- [15] Schreiber L *et al.* Proc. SPIE, 2014, 9148: 91486Q
- [16] Davies R, Kasper M. Annu. Rev. Astron. Astrophys., 2012, 50: 305
- [17] Andersen D R. Raven, a Multi-Object Adaptive Optics technology and science demonstrator. AO4ELT 2, 2011
- [18] Lamb M *et al.* Using the multi-object adaptive optics demonstrator RAVEN to observe metal-poor stars in and towards the Galactic Centre. MNRAS, 2016
- [19] Baranec C *et al.* ApJ, 2009, 693: 1814
- [20] Rabien S *et al.* Proc. SPIE, 2010, 7736: 77360E
- [21] Kolb J. AOF: first on-sky performance of the GALACSI GLAO mode. http://www.iaa.es/congreso/AO4ELT5/media/monday/ao4elt5_kolb.pdf
- [22] Cunningham C *et al.* Proc. SPIE, 2008, 6986: 69860K
- [23] Merline W J *et al.* Nature, 1999, 401: 565
- [24] Pater I D *et al.* Icarus, 2010, 210: 742
- [25] Siegler N. Astrophysical Journal, 2003, 598: 1265
- [26] Dupuy T. Astrophysical Journal, 2011, 723: 122
- [27] Dupuy T, Liu M. Astrophysical Journal, 2009, 692: 729
- [28] Ghez A M *et al.* Astrophysical Journal, 2008, 689: 1044
- [29] Genzel R. Nature, 2006, 442: 786
- [30] Marois C *et al.* Science, 2008, 322: 1348