

谈谈地面大型天文望远镜

——纪念望远镜问世 400 周年

李 良

观测天体的重要手段是天文望远镜。自从 1609 年伽利略自制天文望远镜成功,约 400 年来,望远镜早已从小型手控的发展到由计算机控制的庞大复杂的天文仪器。随着望远镜在各方面性能的不断改进和提高,天文学也正经历着巨大的飞跃,迅速推进着人类对宇宙的认识。在过去的一百年中,“世界上最大的天文望远镜”的称号曾几易其主。从美国威尔逊山上的胡克望远镜,到雄据宝座达 50 年之久的帕洛马天文台口径 5 米的海尔望远镜,再到夏威夷莫纳克亚山上口径 10 米的一对凯克望远镜,望远镜越做越大,观测手段也不断创新。可以毫不夸大地说,没有天文望远镜的诞生和发展,就没有现代天文学。为了纪念科学大师伽利略率先把望远镜指向天空,联合国把 2009 年定为国际天文年。展望未来,一个巨型望远镜时代即将来临。在今后的十几年里,“世界上最大的望远镜”的称号将继续出现“几易其主”的现象。

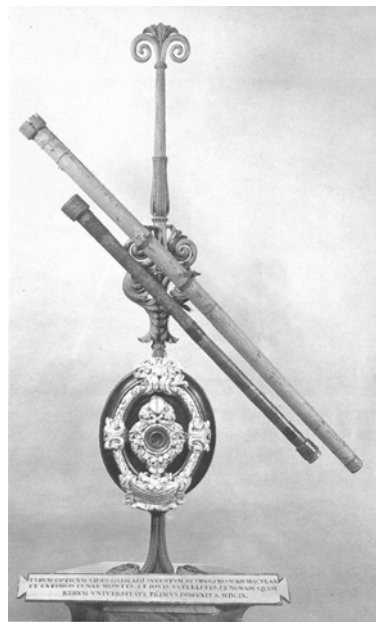
哥伦布发现新大陆,伽利略发现了新宇宙!

科学史表明,为了彻底推翻错误的地心说,为哥白尼日心说提供最明确的观测证据,并使这一学说获得关键性胜利的正是科学大师伽利略(1564~1642)。

1608 年,荷兰眼镜制造商汉斯·列伯希(Hans Lippershey)偶然地用两个镜片对叠往远处观看时发现,远处的目标被拉近了。后来他制作了一个圆筒,两端装上透镜,做成了一个简单的望远镜。1609 年 7 月的一天,著名的意大利科学家伽利略听到了汉斯·列伯希的故事,他非常感兴趣,立即动手研制望远镜。1609 年,伽利略自制了一架放大 32 倍的折射式望远镜(图 1)。他用望远镜观测星空,获得了一系列天文发现。

当伽利略把望远镜指向了天空,他看到了人们做梦也想不到的观测结果:月亮并非像人们常说的那么皎洁无瑕,而是满目疮痍,上面既有山也有大片平原(称为“月海”);他很快看出金星有类似月亮的盈亏,这种现象证实了金星沿着以太阳为中心

的轨道运转。伽利略把望远镜指向银河,发现并不像人们用肉眼看到的淡雾茫茫的一大片而是由密密麻麻如针尖大小的星星构成的;他借着云雾减弱刺目的日光,观察到太阳上有许多黑子(这造成晚年伽利略双目失明,再次提请读者注意:千万不要在没有强滤光片情况下



用望远镜看太阳!)。最使伽利略兴奋的是,他发现了木星周围有四颗卫星。那是在 1610 年 1 月 7 日的夜晚,他通过望远镜观测木星时,发现在它淡黄色的视圆面附近有三个光点,它们几乎在一条直线上,一颗在木星右侧,两颗在木星左边。从此,伽利略每晚都仔细观察它们。结果发现,木星周围的小星星有时三颗,有时两颗,还有时竟出现四颗!经过分析研究,伽利略断定自己看到的是四颗围绕木星旋转的木星卫星,那好像是一个小小的“太阳系”!今天人们已发现了木星 60 颗卫星。对上述四颗卫星,后人习惯称为“伽利略卫星”,以志纪念。

由哥白尼开始的科学革命直接导致对新物理学的寻求,正是在将天文学与物理学相结合之后,有别于亚里士多德物理学的新天文学才得以诞生。而新天文学的开创人物正是伽利略。伽利略在天文学和物理学上的一系列开创性的研究实验,极大地发展了哥白尼学说。伽利略将其用望远镜获得的天文发现写成《星际使者》等书,在知识界引起了巨大的反响,后来人们争相赞诵:“哥伦布发现了新大陆,伽利略发现了新宇宙!”伽利略为自然科学的

图 1 伽利略 1609 年自制的望远镜

进一步发展奠定了牢固的理论和实验的基础，从此结束了人类只用肉眼观天，这在天文学上具有划时代的意义。

伽利略作为一个尊重客观实在的科学家，曾几次奔赴罗马，企图说服教皇给以宣传日心说的自由。在他第三次去罗马时，得到的却是罗马宗教裁判所强迫他声明与哥白尼学说决裂的答复，教庭于1616年颁布禁令，不准人们以任何形式宣传日心说。那些顽固维护传统教义和权威理论的人，借助教皇的权力残酷迫害伽利略。结果罗马教庭最终宣称伽利略的著作是违反圣经教义的异端邪说，并令伽利略到罗马宗教裁判所受审。从1633年6月22日起，他被判处终身监禁。这就是轰动全球的“伽利略事件”。1992年从梵蒂冈传出信息，罗马教皇约翰·保罗二世（波兰人）宣布，1633年教庭因伽利略支持哥白尼的日心说而对他所作的惩罚，是一个“善意的错误”，从而为伽利略冤案彻底“平反”。由此可以进一步证明：科学是人类文明的一面旗帜，真理的力量是不可抗拒的。

综上所述，哥白尼的日心说改变了那个时代人类对宇宙的认识，从根本上动摇了欧洲中世纪宗教神学的理论基础。特别是1609年，伽利略是第一个用望远镜观测星空的人，开创了崭新的望远镜天文学时代。

1611年，德国天文学家开普勒使用两片双凸透镜分别作为物镜和目镜，使放大倍数有了明显的提高，以后人们将这种光学系统称为开普勒式望远镜。现在人们用的折射式望远镜还是这两种形式，天文望远镜是采用开普勒式。由于当时的望远镜采用单个透镜作为物镜，存在严重的色差，为了获得好的观测效果，需要用曲率非常小的透镜，这势必会造成镜身的加长。所以在很长的一段时间内，天文学家一直在梦想制作更长的望远镜，许多尝试均以失败告终。

1668年，牛顿发明了反射式望远镜，采用了球面反射镜作为主镜。他用2.5厘米直径的铜质镜胚，磨制成一块凹面反射镜，并在主镜的焦点前面放置了一个与主镜成 45° 角的反射镜，使经主镜反射后的会聚光再经反射镜以 90° 角反射出镜筒后到达目镜，这种系统称为牛顿式反射望远镜。反射式望远镜有许多优点，譬如说，它没有色差，能在广泛的可见光范围记录天体发出的信息，且相对于折射望

远镜比较容易制作。但由于它也存在固有的缺点，如口径越大视场越小，物镜需要定期镀膜等。后来，望远镜制作发展到采用玻璃并镀上金属银作反射膜，现今的主镜和副镜常镀上铝金属膜并加上保护膜，这样望远镜可用很长时间而不需要重新镀上反射膜。

1672年，法国人卡塞格林提出了反射式望远镜的第三种设计方案，结构与格雷戈里望远镜相似，不同的是副镜提前到主镜焦点之前，并为凸面镜，这就是现在最常用的卡塞格林式反射望远镜。这样可使经过副镜反射的光稍有些发散，虽然降低了放大率，但是它消除了球差，这种望远镜还可以使得焦距很短。卡塞格林式望远镜的主镜和副镜还可以有多种不同的形式，光学性能也有所差异。由于卡塞格林式望远镜焦距长而镜身短，放大倍率也大，所得图像清晰；既有卡塞格林焦点，可用于研究小视场内的天体，又可配置牛顿焦点，用以拍摄大面积的天体。就这样，卡塞格林式望远镜得到了非常广泛的应用。

望远镜越做越大

天文观测的对象大多数是十分遥远的暗弱天体，决定望远镜“视力”的主要因素有两个：望远镜的口径和角分辨率，简单地说就是望远镜主镜的大小和望远镜所能分辨的最小细节。因此，只有采用口径尽量大的望远镜，收集更多的天体辐射，才能发现新的天体或对暗弱天体有效地进行照相，以及进行光度、分光等方面的测量和研究。在过去的200多年中，“世界上最大的天文望远镜”的称号几易其主。

1786年，英国天文大师威廉·赫歇尔（William Herschel）经历过无数失败、挥洒了无数汗水磨制成一架长达40英尺（12.2米）、口径48英寸（122厘米）的反射望远镜。该望远镜虽然威力巨大，但每次观测都需要花费很长时间进行调整，而且还要两名助手协助才能驾驭，因此它的使用率不高。1793年赫歇尔又制作了反射镜口径130厘米的望远镜，用铜锡合金制成，重达1吨。据统计，赫歇尔一生曾磨制了大小400多块望远镜片，制作了多架性能优异的望远镜；他用自制的望远镜发现了天王星，极大地扩展了太阳系的疆域，最有影响的是，他开创了恒星天文学。

英国“贵族天文学家”——第三代罗斯伯爵威

廉·帕森斯于1845年建造了一台口径72英寸(1.84米)、重达3.6吨的巨型金属反射镜,在此后的70多年间,它是世界上最大的望远镜。1845年4月,罗斯伯爵用它发现猎犬座的M51“星云”具有螺旋状结构,这是人类第一次看到旋涡星系。可惜这架望远镜最初设计就有些缺陷,例如它在水平方向无法敞开转动,致使可观测的天区很有限;另外因望远镜安放地潮湿多风、经常多云,不仅晴夜很少而且星空闪烁也十分严重。1908年,罗斯伯爵的孙子把这架生锈的望远镜拆除了,后来又把它重新安装玻璃镜面并辟为一个旅游景点。

1888年,在美国金融家詹姆斯·利克资助下,建立了利克天文台并建成口径91厘米、长18.3米的利克望远镜,此举打破了1885年俄国普尔科沃天文台创下的口径30英寸折射镜的记录。1895年,著名美国天文学家乔治·埃勒里·海尔说服了芝加哥电车大亨查尔斯·泰森·叶凯士,请他出资建造了一架一米口径的折射望远镜,并把天文台命名为叶凯士天文台。1897年5月21日,这架直径1.02米、长约18米的望远镜落成,该望远镜可转动装置重达20吨,平衡性能良好,据说只用一根手指就可将它推动。至今它仍是世界上口径最大的折射望远镜。早在19世纪50年代,一位德国化学家发明给玻璃表面镀银的方法,结果启发了天文学家应用这一技术来制造玻璃反射镜。

真正使得反射望远镜步入大型化的是美国天文学家乔治·埃勒里·海尔,以及他的合作者、制镜天才乔治·威利斯·里奇。他们首先合作成功是加利福尼亚威尔逊山天文台口径60英寸(1.5米)的反射望远镜。在实践中,里奇创造性地使用了无尘环境即洁净室来进行镜面加工,并成为后来者的制镜典范。这架1.5米的望远镜于1908年落成,该高性能望远镜拉开了现代大型反射望远镜的序幕。还在该望远镜制造期间,才思敏捷的海尔又开始为制造口径100英寸(2.54米)望远镜筹措资金,结果获得洛杉矶富商约翰·胡克的资助,并答应他望远镜将以胡克的名字命名。1918年,“胡克望远镜”(Hooker)终于在里奇手中制作成功。胡克望远镜具有强大的聚光能力,它向人们展现了一个空前神奇的宇宙。哈勃就是用它发现了许多河外星系,并发现河外星系正在远离我们退行,这是我们的宇宙正在膨胀的重要的观测证据,由此开创了观测宇宙学

与星系天文学。在“胡克望远镜”建成后30年中,它一直是全世界最大的反射天文望远镜。

1929年,海尔又设法从洛克菲勒基金会那里获得一大笔款项,他筹划建造更大的反射式望远镜——200英寸(5.08米)的望远镜。它于20世纪30年代开始建造,建造技术在当时堪称奇迹,1934年该望远镜玻璃镜坯浇铸成功,为了避免产生气泡和瑕疵,用了约10个月的时间慢慢冷却,然后从康宁工厂运到加州帕洛玛山上“安家”。当时,巨大的镜坯装在17英尺高的箱子里,火车运载仅在白天,且以不超过25英里时速缓缓地行进。当时铁路两旁站满了围观的民众,一些学校甚至停课组织学生前来参观这个庞然大物。这块巨镜运到加利福尼亚后进行了最后的抛光。1941年,除了主镜,包括圆顶观测室在内的望远镜其他部分均已建造完毕。因为处于第二次世界大战期间,所以直到1947年,镜坯才最终被精加工成镜面并安装到望远镜上。海尔于1938年去世,为了表彰和纪念海尔的伟大历史功绩,人们把该望远镜称为“海尔望远镜(Hale)”。

1948年,海尔望远镜安置在美国帕洛玛山上,望远镜的镜面净重14.5吨,镜筒重140吨,采用十分结实的马蹄形赤道式装置,整个望远镜的可动部分总重530吨,使用摩擦系数很低的油垫轴承支承。虽然从1993年以后,它作为世界上最大的反射式光学望远镜的地位已被取代,但仍在为宇宙探索发挥重要作用。1976年,苏联建成一台口径6米的反射望远镜,为解决基架重力变形问题,采用地平式装置,造价比赤道式装置便宜一半。转动部分总重800吨,可惜的是,它的工作性能太差,根本没有发挥其应有的作用。

主动光学与多镜面望远镜(MMT)

天文学家们确实需要更大的镜片来会聚更多的光线,以研究宇宙中更暗弱的天体。但由于大口径透射光学材料制备困难,透镜加厚吸光量就会增加(在紫外、红外区尤为严重);又由于透镜由边缘支承,自重变形较大,加上镜筒过长,都会给机械结构带来麻烦。此外,大口径的透镜也会有残余色差,这些困难限制了大口径折射望远镜的发展。折反射望远镜同样也在一定程度上受到改正镜的透射材料的限制,最大的折反射望远镜是1960年在德意志民主共和国陶登堡史瓦西天文台安装的施密特望远镜,它的改正镜口径为1.34米,主镜口径为2米;

世界第二大折反射望远镜是美国帕洛马山天文台的施密特望远镜，口径 1.2 米。

20 世纪中叶以后，天文学家面临一个新的困境，这就是怎样才能建造出比口径 5.08 米的海尔望远镜更大的望远镜？这似乎是不可能的，更大的玻璃镜片很容易有裂痕，并且很可能因为自身重力而形变。20 世纪 80 年代，为了加强望远镜的集光能力，有人提出，望远镜主镜的口径最好在 4 米以上；事实上，传统的维护像质、防止透镜因重力而变形的的方法由于受到造价和结构重量的限制已不再适用。为了改善大中型望远镜的像质，主动光学诞生了。其方法是，改正过去在观测前手工被动地调整望远镜的作风，采用一种在观测过程中用内置光学修正部件调整像质的方法，即在望远镜的主镜背后安装上百个促动器，在观测过程中不断地检测镜面因为重力、风力、温度等因素而发生的形变，然后通过促动器来矫正镜子的形状从而弥补非期望的形变，将镜面的形状保持在最佳状态上。这些修正部件工作在相对较低的频率（ $\leq 0.05\text{Hz}$ ）。

事实上，最初是美国军方开发的一种新技术，称之为主动光学系统，以此来减少大气扰动对图像的影响。结果，天文学家把这种技术拿来应用于望远镜研究上。主动光学系统的工作原理是，通过计算机来控制望远镜中镜片的形状来弥补光线穿过大气后光路的变化。镜片形状每秒钟改变上百次。主动光学系统提高了可见光图像质量，而这种技术对更长波长的光更有效，例如红外线。将主动光学系统和多镜面望远镜技术结合，提供了比以往陆基望远镜更清晰的宇宙暗弱天体的图像。第一架完整的主动光学望远镜——欧洲南方天文台 3.5 米的新技术望远镜（NTT），于 1989 年在智利的拉塞拉天文台（La Silla）投入使用。坐落在夏威夷蒙那亚克山（Mauna Kea, Hawaii）的著名的 10 米凯克（Keck）望远镜，以及欧洲南方天文台四台 8.2 米口径的甚大望远镜阵列（VLT）也都是采用主动光学系统。

考虑到大型的天文望远镜玻璃镜片很容易有裂痕，并且很可能因为自身重力而发生形变。为了获得更大的镜面，人们必须创造新的方法和技术。多镜面望远镜（Multiple Mirror Telescope 英文缩写为 MMT），是 20 世纪 80 年代出现的新技术，主要是用很多子镜面来合成一个望远镜镜面，并可获得合成的单一图像。多镜面望远镜运转时需用计算机控

制每个子镜片的形状和位置，调整望远镜的指向，跟踪天空中的目标。这种由多块分立镜面组成的新型天文望远镜，避免了制造巨大单镜面望远镜的众多困难，并可大幅度降低制造费用。最早的一台多镜面望远镜是美国史密松天文台于 1979 年启用的，该望远镜由 6 块口径 1.8 米的反射镜组成，它们绕中心排成正六边形，通过光束合成器使其效果相当于一架口径 4.5 米的大望远镜；它采用地平式装置，仪器和观测室的尺寸比一般结构的望远镜显着缩小。此外，由于电子计算技术的发展，大望远镜已有采用地平式装置的趋向。谈到这架多镜面望远镜的缘起，要从当年一堆闲置不用的望远镜部件说起。当时由于美国和前苏联处在冷战期间，美国空军建造了 6 片重量相对较轻的 72 英寸（1.8 米）口径的反射镜，这组镜片准备应用于军用卫星上，后来的结果是它们闲置不用了，亚利桑那州大学和史密斯学会合作，利用它设计建造了这架新型的反射望远镜。

多镜面望远镜使用的镜片和其他所有的玻璃镜片一样，也有热胀冷缩现象，这种现象会导致望远镜焦点的改变。所以必须考虑通风问题，望远镜周围的建筑物在设计时给予了足够开阔的空间，保证在夜晚时空气能够充分流通，从而使望远镜的温度快速降到和环境温度相同。一旦望远镜的温度达到了夜晚空气的温度，望远镜的焦点就稳定下来，到此望远镜就能够使用了。多镜面望远镜安装在一种地平式支架上，支架可以上下左右运动，就像军舰上的炮台一样。多镜面望远镜的支架设计离不了计算机的应用。计算机不停地调整支架，即使地球在自传，也能使望远镜的视线始终停留在观测目标上。还要考虑到支架要小、重量轻而且占用的空间也小。对比来说，海尔望远镜圆顶观测室内的 5 米望远镜占用的空间比多镜面望远镜大得多。望远镜支架不是唯一能够移动的部件，而是整个建筑物都被设计成能够旋转的，它能够跟随望远镜的移动而转动。事实上，即使有计算机的帮助，要做到所有镜片都指向同样一个点并且保持同步操作，一直都是一个挑战。据说，多镜面望远镜的第一次观测就证实了引力透镜现象。引力透镜（gravitational lensing）效应是爱因斯坦的广义相对论所预言的一种现象，由于时空在大质量天体附近会发生畸变，使光线在大质量天体附近发生弯曲（光线沿弯曲空间的短程线传播）。如果在观测者到光源的视线上有一个大质量

的前景天体则在光源的两侧会形成两个像，就好像有一面透镜放在观测者和天体之间一样，这种现象称为引力透镜效应。这里说的大质量天体应该是巨大的星系（星系团）以及黑洞一类的天体。光线弯曲的程度主要取决于引力场的强弱；分析背景光源的扭曲，可以帮助研究中间作为“透镜”的引力场的性质。根据强弱的不同，引力透镜现象可以分为“强引力透镜”和“弱引力透镜”效应。1979年，天文学家观测到类星体 Q0597+561 发出的光在它前方的一个星系的引力作用下弯曲，形成了一个一模一样的类星体的像。这是人们首次观察到引力透镜效应。

1998年，这台6个镜筒的多镜面望远镜被改造成为一个单镜面的6.5米口径的望远镜，在2003年，该望远镜全新的自适应光学的变形副镜调试获得成功，这是自适应光学变形镜面的一个重要的新进展。据专家介绍，MMT口径6.5米望远镜的自适应光学改正镜是它的副镜，其直径1米，主镜的焦比为1.25，卡氏焦点的焦比为15；利用副镜本身作为变形镜最大的好处是大大减少了反射或者透射面的数量，提高了望远镜的效率。这个装置减少了在其他的自适应光学系统所需要的8个镜面。为了使这个1米直径的自适应光学改正镜面能够及时变形，它的镜片厚度只有2毫米。

关于自适应光学技术

自适应光学的工作原理与主动光学比较类似，也是从主光路中分束检测。但不同的是，自适应光学系统针对的是大气湍流对成像的影响，而非改正重力和温度造成的镜面变形。自适应光学依照大气湍动情况调整反射镜面形，以改正出射波前，而不是将面形保持在最佳状态上。自适应光学是军事、天文和视力校正领域内的一项高新技术。它利用超薄镜面，对比接收到的星光和理想波阵面的差别，通过迅速改变镜面形状，补偿因大气抖动等因素形成的误差，从而提高图像的分辨率。这项技术将在现代化的天文望远镜设计中得到广泛应用。它通过检查一个理想的点光源在大气传播以后的波阵面的形状，来发现大气以及光学仪器本身对波阵面传输的影响，然后通过一个形状可以变化的变形镜，及时地、非常迅速地改正这种因为大气和其他因素所形成的波阵面的误差，从而使所成的图像达到光学仪器的衍射极限，极大地提高所成图像的分辨率。

和主动光学技术比起来，这一技术之开发者的工作是令人惊叹的，可以想象，来自遥远天体的光波穿越了20千米的大气湍流层，越过大型天文望远镜，产生了几微米的相位差别，自适应光学系统必须通过分析有限的数据在每一短暂的毫秒内做出新的修正，修正部件工作在相对主动光学更高的频率。自适应光学的另一个复杂因素是：适用于自适应光学的视场大小（人们用等晕角来描述这块视场的大小）是相当小的（在可见光波段只有几角秒）。

大气对光学传输的影响变化很快，所以自适应光学的改正频率很高，一般要达到每秒1000次的量级。自适应光学采用大型可变形的镜面越来越大。选择造成形变的触动器的数量必须综合考虑改正度、观测波段、参考星的选择以及可用预算。例如，日本昴星望远镜使用了主动光学和自适应光学技术，支持镜面的是261个机械手指，它们可以不断触动、调整镜面的形状以获得最佳观测影像。自适应光学的控制系统是一台专门的计算机，它通过分析由波前传感器采集的数据来对镜面的形状做出修正。分析必须在极短的时间内完成（0.5~1毫秒内），不然大气情况的改变将使系统的改正因延误而产生错误。

2007年，加州理工学院的Nicholas Law、剑桥大学的Craig Mackay以及他们的同事用新型幸运相机（Lucky Cam）把自适应光学向前推进了一步。这一设备与后院天体摄影者（在国外指的是业余天文学家）的网络摄像头类似，每秒可以拍摄数帧图像。其中的一些必然是在大气异常稳定的时候拍下的。在这些“幸运”的时刻，图像质量会非常不错。将自适应光学系统与“幸运成像”结合，帕洛玛小组某些时候可以获得角分辨率接近200英寸望远镜理论极限的照片。这比哈勃最好的照片还要锐利两倍，这是由于海尔望远镜的口径是哈勃的两倍，而将大气影响从公式中扣除后，分辨本领直接与望远镜口径相关。

自适应光学最早是用于对敌国的人造卫星的精细观察，现在天文望远镜依靠这种技术来获得更高分辨率的天文图像，尤其是当甚大望远镜（VLT）投入使用后（光干涉观测法带来了更清晰的像质）。自适应光学系统强大的集光能力和极小的分辨率（空间上的和光谱上的）将为未来地面天文观测带来最主要的进步。更深入的，在计划和讨论中的欧

洲空间局 100 米口径绝大望远镜（简称 OWL）将依赖先进的自适应光学技术来实现全部的天文观测，在这些项目的建设初期望远镜就和自适应光学系统融为一体。

中国的大望远镜

在过去的 18 年里，我国国家天文台位于河北兴隆观测站的口径 2.16 米反射望远镜一直是远东最大的光学望远镜。2007 年 5 月，在我国云南丽江高美古建成了一台口径 2.4 米的高性能光学望远镜（2003 年 9 月开始动工兴建），号称新一代“东亚镜王”，它取代了 2.16 米望远镜的地位。此外，我国自主研发的大天区多目标光纤光谱望远镜（LAMOST）于 2008 年落成，它也是拼接镜面，有效通光口径为 4 米、焦距为 20 米、视场达 20 平方度的中星仪式的反射施密特望远镜。其技术特色是：①把主动光学技术应用在反射施密特系统，在跟踪天体运动中作实时球差改正，实现大口径和大视场兼备的功能。②球面主镜和反射镜均采用拼接技术。③多目标光纤（可达 4000 根，一般望远镜只有 600 根）的光谱技术是一个重要突破。LAMOST 把普测的星系极限星等推到 20.5m，比 SDSS 计划高 2 等左右，实现 107 个星系的光谱普测，把观测目标的数量提高 1 个量级。它的研发成功，将标志我国科技工作者不仅掌握了拼接镜面技术，主动光学和自适应光学技术也将通过考验。

LAMOST 的建成，将对人类认识宇宙的起源、星系的形成与演化、银河系的结构、恒星的演化等诸多研究领域做出重大贡献；在建设 LAMOST 过程中发展起来的新技术大大推动了我国在光学仪器制造、精密机械、电子技术、海量数据处理等领域的发展，并为我国正在预研的下一代 30~100 米极大光学/红外望远镜以及相关科研、生产和国防建设的发展提供可靠的技术储备。

近年世界著名的大望远镜简介

凯克望远镜（系孪生子，Keck I 和 Keck II）在 20 世纪 90 年代，得益于威廉·凯克基金会的慷慨资助，美国加州理工学院和加州技术学会联合打造了“凯克 I”和“凯克 II”望远镜，设在夏威夷海拔 1.4 万英尺（4267.2 米）的莫纳克亚山上。它们各由 36 块直径 1.8 米的六角镜面拼接组成，有效口径都是 10 米。通过电脑控制的主动光学支撑系统调节，使镜面保持极高的精度。这两台望远镜分别在 1993

年、1998 年完工，曾一度是世界上最大的光学天文望远镜。每个凯克望远镜通过电脑控制的主动光学支撑系统调节，使镜面保持极高的精度。其总重达 200 吨，并可兼作红外观测。

每一个凯克望远镜都有 300 吨重，8 层楼高，有效物镜尺寸达到 10 米（33 英尺），能够采集到可见光和红外线。凯克望远镜采集和集中光线的大型镜片和南非大望远镜类似，均具有内部冷却系统，目的是保护镜片不受温度变化产生的形变影响。该望远镜系统中有一个很重要的很小的镜片，专门用来弯曲光线，即使在高高的莫纳克亚山，凯克望远镜也必须克服地球大气层的折射；这个 6 英寸（15 厘米）的镜片每秒钟改变形状 670 次，用以抵消地球大气层对进入光线的影响。

昴星团望远镜（SUBARU）日本的昴星团望远镜是目前世界上最大直径的单面反射镜，其口径达 8.3 米。坐落在夏威夷莫纳克亚山上，建造完成于 1999 年。据称，该望远镜仅仅是抛光其超大镜面就花去了七年的时间。昴星团望远镜使用了主动光学和自适应光学技术，支持镜面的是 261 个机械手指，它们可以不断触动、调整镜面的形状以获得最佳观测影像。

甚大望远镜（VLT）1999 年，欧洲南方天文台在智利建造了甚大望远镜（VLT）。它是由 4 台 8.2 米口径的望远镜组成一台等效直径达到 16.4 米的光学望远镜。这 4 台望远镜可以组成一个干涉阵，做两两干涉观测，也可以单独使用每一台望远镜。它可以在不同波段观测超新星等遥远天体，这四个口径为 8.2 米的巨型望远镜，每一个都比人眼敏感 10 亿倍，望远镜由计算机连接，能采集相当口径 16.4 米所收集的光，其最高分辨率足以观察宇航员在月球上行走的情景。2002 年，VLT 首次观察到了一颗位于太阳系之外的行星——2M1207b。

大型双筒望远镜（Large Binocular Telescope, LBT）由美国、意大利和德国合作制造，是世界上最大的单镜面望远镜，它的两个子镜均为 8.4 米的单镜面，建在美国亚历桑那的一座山上，2008 年 3 月开始试用。这一双筒望远镜每一块的物镜尺寸均为 8.4 米（27.56 英尺）。跟甚大望远镜的 8.2 米（26.9 英尺）的镜片阵列不同，LBT 的两个镜片安装在同一个望远镜上，它不是阵列，而是独立的大型单元，拥有两个采集光线的大口径镜片，具有与

单一 11.8 米 (38.8 英尺) 物镜的望远镜同等的集光能力。LBT 采用了独具创新的蜂窝结构的镜片取代了传统的平面镜片。镜片的正面是光滑的, 反面是矩阵机构的蜂窝, 因此比其他类型的镜片更轻, 更不容受重力畸变影响。当它全面投入使用(预计 2010 年), 天文学家预测 LBT 能看到围绕银河系之外的恒星运转的行星, 且分辨率是哈勃太空望远镜的 10 倍, 用以发现研究行星。天文学家还相信, LBT 可以获取能够演化为新星系的那种宇宙灰尘和气泡的图片。

双子望远镜 (Gemini) 由美国主持合作建造的 (美国占 50%, 英国占 25%, 加拿大占 15%, 智利占 5%, 阿根廷占 2.5%, 巴西占 2.5%), 该工程于 1993 年 9 月开始启动。它由两个 8 米望远镜组成, 第一台放在北半球, 1998 年 7 月在夏威夷开光。第二台于 2000 年 9 月在智利赛拉帕琼台址开光, 整个系统是在 2001 年验收后开始使用。

南非大望远镜 (SALT) 是南半球最大的天文望远镜, 2005 年正式启用。SALT 项目建设历时 5 年, 由南非、德国、新西兰、波兰、英国和美国共同出资。SALT 有一个直径为 11.1 米 (36.6 英尺) 的主球面镜, 由 91 片六边形镜面组成, 是南半球最大的光学望远镜。坐落在南非萨瑟兰的南非大望远镜能够在全世界最著名的望远镜中脱颖而出, 关键在于它的镜片尺寸, 它能够观测到比肉眼观测到的最弱光线还要弱十亿倍的星系和类星体的反射光。虽然南非大望远镜凭借 11 米的物镜排名第一, 但它的一部分设计遮挡了镜片边缘, 它的有效尺寸为 9.2 米 (30.18 英尺)。目前凯克望远镜的有效物镜尺寸还是最大的, 南非大望远镜可谓全球第二大天文望远镜。

麦哲伦望远镜 (Magellan telescopes) 是位于智利拉斯坎帕纳斯天文台的两台 6.5 米口径光学望远镜, 是华盛顿卡内基研究所天文台 (OCIW) 与美国亚利桑那大学、哈佛大学、密歇根大学、麻省理工学院合作建造的, 由华盛顿卡内基研究所天文台负责管理运行。其中第一台望远镜以美国天文学家沃尔特·巴德的名字命名, 第二台以慈善家兰顿·克莱的名字命名。麦哲伦望远镜计划始于 20 世纪 80 年代中期, 1993 年华盛顿卡内基研究所与亚利桑那大学开始建造第一块主镜。1995 年 12 月哈佛大学的加入和 1996 年 2 月密歇根大学、麻省理

工学院的加入使得该计划有能力建造第二台望远镜。1999 年 11 月, 第一台望远镜的主镜从亚利桑那大学史都天文台镜面实验室运抵拉斯坎帕纳斯天文台, 2000 年 9 月 15 日开始观测, 同年 12 月 9 日正式开始运行。第二台望远镜的主镜于 2001 年 7 月运抵目的地, 2002 年 9 月 7 日开始观测。

加那利大望远镜 是由 36 片六角形的小镜片组合而成, 望远镜口径 10.4 米 (34.3 英尺), 拉丁文名称为 Gran Telescopio Canarias, 简称 GTC; 也有人称为 Great Canary Telescope, GCT, 耗资 1.8 亿建造, 是迄今世界最大的拼接镜面望远镜, 2007 年 7 月投入使用。位于西班牙外海的大加纳利群岛拉帕尔马 (La Palma) 岛的一座山上。这台号称世界上最大望远镜使用自适应光学系统, 能够捕捉到遥远的在早期宇宙诞生的星系、黑洞和系外行星等。

七个大望远镜相连接的计划

分辨率是说明望远镜性能的重要指标之一。望远镜的分辨率越高, 代表其观测目标精细部分的能力就越强。望远镜的口径是指用于收集光线的透镜或镜头的直径。口径越大的望远镜, 其性能也会越好。代表望远镜观测目标精细程度的“分辨率”和望远镜的口径大小是成正比的。事实是, 望远镜口径的大小是有一定限制的。望远镜的透镜尺寸越大, 其自身的重量也越大, 由此镜片会产生形变, 要把光线精确地聚集在焦点处就会比较困难。那么, 有没有突破望远镜口径限制的办法呢?

光干涉仪是提高分辨率的突破口。2006 年 3 月, 由日本国立天文台等组成的国际研究小组采用了“光干涉仪”的方法进行的科学实验获得了成功。他们用光缆把位于莫纳克亚山顶的大型天文望远镜群中的凯克 I 和凯克 II 连接在一起, 观测结果表明, 其分辨率比单独一个望远镜的情况有了大幅度的提高。这两台望远镜之间距离 85 米, 科学家把它们之间的距离称为“基线”, 如果能使每个望远镜收集到的光会聚在一点并产生干涉增强现象, 就可以达到建设一台约 100 米口径的巨大望远镜分辨率, 这就是光干涉仪。事实上, 当初凯克 I 和凯克 II 原来就是当作光干涉仪而设置的。这两台望远镜采集到的光线, 通过地下隧道会聚到一点并产生干涉现象。由于光线是沿着光缆的方向传播, 而光缆可以弯曲, 因此能够把光线精确地引导到指定的地点, 并使其产生干涉增强现象。日本国立天文台等组成的国际

研究小组的成功，无疑是朝着实现世界最高分辨率的望远镜计划迈进了一大步。对于连接 3 台以上望远镜的情况，对分辨率有贡献的是距离最远也就是基线最长的两台望远镜，而比最长基线短的那些望远镜对分辨率没有贡献，只是起到更容易看到昏暗天体以及描绘正确天体图像的作用。

预计在 2011 年之前，科学家有望实现把莫纳克亚山的七个大型望远镜都通过光缆连接在一起，据说这相当于一台 800 米口径的望远镜，可以观测到银河系中心猛烈喷发出来的气流及其巨大的黑洞，也许还能够看到围绕黑洞的盘状漩涡，或者应当能够观测到刚刚诞生的恒星以及正在形成的行星的真实场景。

未来的大望远镜计划

“加利福尼亚极大望远镜”（CELT）和大麦哲伦望远镜（GMT）

近年，美国一些新的竞争参与者包括 30 米口径的“加利福尼亚极大望远镜”（California Extremely Large Telescope，简称 CELT）；21.4 米口径的大麦哲伦望远镜（Giant Magellan Telescope，简称 GMT）。它们的倡议者指出，这些新的望远镜不仅可以提供像质远胜于哈勃望远镜照片的太空图片，而且能收集到更多的光，对 100 亿年前星系形成时初态恒星和宇宙气体的情况有更多的了解，并看清楚遥远恒星周围的行星。

2007 年 12 月 9 日，美国加利福尼亚理工学院证实，美国英特尔公司创始人之一戈登·摩尔和他妻子日前向该校和加利福尼亚大学捐赠两亿美元，号称用以建造世界最大的天文望远镜——“加利福尼亚极大望远镜”（California Extremely Large Telescope，简称 CELT）。据报道，如果加上从其他地方募集到的 1 亿美元，目前两所学校已有 3 亿美元，它们将利用这笔资金建造一个观测直径达 30 米的天文望远镜，有效面积要比目前世界最大的天文望远镜大 8 倍以上。这个创历史纪录的 30 米口径望远镜由 492 个独立的六角镜组成，这些小镜子会在计算机控制下协同工作，效果就像一面单一的大镜子。它采用了先进技术，能排除大气层云雾干扰而准确地观测天象，其清晰度将超过哈勃太空望远镜。按计划，它的设计将于 2009 年 3 月完成，到 2017 年建造完毕。项目负责人加里·桑德斯说，目前科研人员正在选择安放这架天文望远镜的地点，其中

其中有 3 个备选地点在智利，一个在加州，另一个在夏威夷，选址工作计划在 2008 年完成。

在接受《纽约时报》采访时，夏威夷大学天文学系主任鲁夫-彼得·库德里斯基（Rolf-Peter Kudritzki）说：“借助这样的天文望远镜，你能够第一次探寻到大爆炸第一秒与宇宙中生命形成之间的联系。”不仅如此，新的望远镜还能够对另外的一些天文望远镜起到非常重要的辅助和校验作用，如定于 2011 年发射升空的詹姆斯·韦伯空间望远镜（James Webb Space Telescope），以及美国与欧洲共同在智利建造的射电望远镜——阿塔卡马大型毫米波天线阵（Atacama Large Millimeter Array）等。然而，这些新的巨型望远镜也伴随着高昂的建造成本。根据《今日物理》的调查，建造这样一架大型天文望远镜，装配必要的观测设备并在 20 年的时间内维持其正常运转，所需的费用在 10 亿美元左右，超过最近一代全部大型天文望远镜（包括凯克天文望远镜在内）造价的总和。

大麦哲伦望远镜是加利福尼亚极大望远镜的一大竞争对手。为了在智利建造口径 21.4 米的下一代望远镜，卡内基天文台联合史密森天体物理观测台和哈佛大学、麻省理工学院、亚利桑那大学和密歇根大学，成立了大麦哲伦望远镜联盟。大麦哲伦望远镜的设计镜面口径虽然只有 21.4 米，但因为使用了多项最新技术，设计人员预计它将成为拍摄图片质量最高、误差最小的天文望远镜。早在 1948 年，当帕罗马天文台海尔反射望远镜完工时，许多人都认为它是地面天文望远镜的一个极限，因为更大的镜面会因为太重而变形。20 世纪 90 年代，技术进步使建造更轻的更大的（口径 8 米）镜面成为可能，但它要依靠计算机不断调整支撑点，以保证镜面不会被自身的重量扭曲。后来，在加州大学圣克鲁兹分校粒子物理学家杰瑞·尼尔森的启发下，凯克望远镜改变了思路。它的 10 米口径的镜面是由 36 块小的六角形镜面彼此拼接而成的，这样就把镜面自重问题很好地解决了。

大麦哲伦望远镜的思路与凯克望远镜是类似的。它的主镜面将由 6 块大的圆形镜面围绕一个中心镜面构成。但加利福尼亚极大天文望远镜则与此不同。在设想中，30 米口径的镜面很可能会由数千块六角形的小镜面所构成。目前，两个望远镜的筹建人员都开始了设计和选址的初步工作。如果一切

顺利,加利福尼亚极大天文望远镜将在 2012 年投入使用,而大麦哲伦望远镜的竣工时间定在 2016 年。

“大麦哲伦”望远镜将坐落于智利拉斯卡姆帕纳斯地区,其造型就如一朵盛开的花一般,主镜片由 7 个直径均为 27.6 英尺(约 8.4 米)的巨幅镜片组成,其中一枚镜片居中,其他 6 枚镜片则像花瓣般拥簇于中心镜片的周围,它的聚光能力相当于一面口径为 21.4 米的巨型完整镜面。此外,由于“大麦哲伦”上还将装备一套光学适应系统,借助该仪器这台望远镜的成像清晰度将达到“哈勃”太空望远镜的 10 倍。担任该巨型望远镜镜片制造领导工作的是罗杰·安吉尔,他在美国亚利桑那大学史都华天文台的铸镜实验室工作。虽然铸造这几面前所未有的镜子还存在着很多悬而未决的难题,安吉尔在接受采访中却表现的很有信心。他说,我希望大麦哲伦望远镜的每一面镜子与数学的完美表面相比,都能维持差距在百万分之一英寸内。不过棘手之处在于,我们必须知道在打磨过程中该磨哪里、该用多少力道。

在西方国家,一项科学研究成果的诞生往往是多个层面合作的结果,其中既包括大学的研究室,也包括企业等社会力量。“大麦哲伦”望远镜的研发项目也不例外。为了顺利建造这台巨型望远镜,美国的加州卡内基天文台、哈佛大学、史密松天文物理台、亚利桑那州立大学、密歇根州立大学、麻省理工学院、得克萨斯州立大学和得克萨斯农工大学组成了一个团队,共同推进这项计划。

美国《发现》杂志报道了该镜面制作的过程,首先将 20 吨玻璃均匀倒入一个表面分布着成千上万个陶瓷光纤蜂巢容器中;玻璃在温度高达 1260°C 的旋转熔炉中变为液态,流入下层 3 米高的模具(它飞快地旋转)产生的离心力把多余的玻璃液体分离出去,形成一个凹面镜坯;冷却后,科学家们把蜂巢容器撤去,用研磨设备打磨镜面。看上去,安吉尔实验室铸造炉内,温度高达 1260°C 的液态玻璃散发出橙色的光芒,钢架、电缆如同八爪鱼的触手一样四处延伸,指示灯不停地闪烁着。液态玻璃从六角柱孔缓缓溢出,铸成了一面巨大的蜂巢镜,由此预示着直径 8.4 米、高约 1 米、平均厚度却不到 3 厘米,由多孔的硼硅酸盐组成的“大麦哲伦”的第一面镜片成型。

虽说“大麦哲伦”的成功将为天文学界带来一

个里程碑式的跨越,但就项目组目前的资金及科技水平,没有人能保证这个梦想最终能实现。因为目前制造“大麦哲伦”需要的很多核心技术尚处于研究阶段,它最终能不能由图纸转化为实体仍需拭目以待;另一方面,因为推动整个项目需要 5 亿美元的经费,而目前项目组仅筹到 1700 万美元。因此安吉尔不得不为了经费时不时离开实验室赶赴各地游说,让投资人相信“大麦哲伦”巨型望远镜物有所值。

欧洲将建口径 42 米的大望远镜

据欧洲南方天文台(ESO)2006 年 12 月 11 日宣布,他们将耗资 5 亿~10 亿欧元、用 10 年时间打造口径达 42 米的“最大望远镜”(缩写为 E-ELT,也有人翻译为极大望远镜)。这架 42 米口径的抛物面望远镜主镜将由 984 块六边形小镜片拼接而成,每块小镜片直径 1044 米,厚 5 厘米、重 150 千克。它的观察距离将远至 130 亿光年以外,成为世界上观测能力最强的望远镜。

图 2 是一张欧洲南方天文台发布的口径 42 米望远镜光路图。由于这 984 块小镜片都十分重,当主镜移动时,在重力的作用下其位置很可能发生轻微的改变,因此在每块小镜片下面都有 3 个触动器,这些触动器能以 10 次/秒的频率进行运动,保证小镜片能够很好地拼接在一起。星光照射到主镜后,会被反射到直径 6 米的 A 镜上。A 镜聚集并反射光线,将通过 C 镜上的孔照射到直径 4.2 米的 B 镜上。B 镜在将光线向上发射到 C 镜的反射面上。C 镜是一个厚两毫米的薄壳结构,5000 多个触动器能以 1000 次/秒的频率推、拉镜面,改变它的形状。这些快速的运动部件即自适应光学系统,它能重新调整被大气扭曲的光线,形成锐利的图像。在工作时,天文学家会通过明亮的参考星来计算如何对光线进行修正。在经过自适应光学系统修正后,光线被反射到直径 2.7 米的 D 镜。D 镜会根据参考星进行 20 次/秒的校正,以修正风吹到结构上带来的振动。随后 D 镜会将光线反射到探测器上,在那里会有一架照相机捕捉图像。同时,光线还会被传递到科学家用来判断宇宙膨胀速度的仪器上。如何校准这架巨型望远镜呢?大气扰动和空气中的微粒会使照射到望远镜上的光线发生偏转,因此天文学家必须通过与目标星体在同一个视场内明亮的参考星对该望远镜进行校准。被扭曲的光线照射到 C 镜不同像素上

的时间会有轻微的不同，而自适应光学系统会改变镜面的形状，让各个像素点上的光线到达的时间相同，从而得到清晰的图像。但是假如目标星体周围没有可用的参考星，那么天文学家会自己制造参照物——5 或 6 束激光。这些激光由激光导引系统生成，能激发 9 万米高空的钠离子，形成人造参考光线。

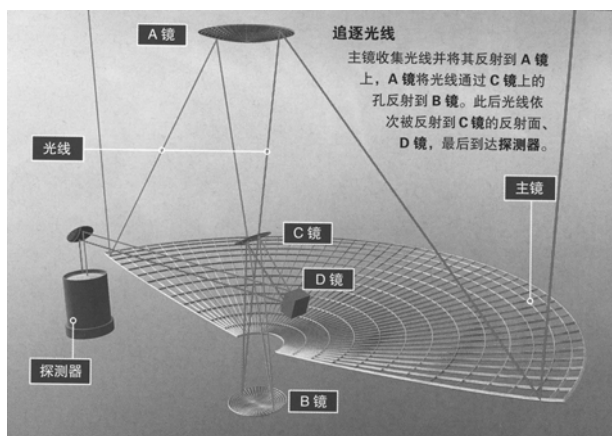


图2 欧洲南方天文台发布的口径42米望远镜光路图

天文学家们相信，ELT 将可以搜寻到约 100 颗与地球体积相当的星体，甚至还能观察到这些星体是否具备生命存在的所需条件，比如液态水和甲烷等。同时，ELT 还将能够观察到 130 多亿光年以外的星系，那里有“宇宙大爆炸”初期的产物。位于智利北部阿塔卡马沙漠安第斯山脉塞罗·帕拉那山峰的帕拉那天文台海拔 2500 米，据说那里是 E-ELT 的首选建造地址；因为该地区年降水量仅 3 毫米，气候干燥，能确保每年有 90% 的夜晚适合天文观测；其他候选建造地址分别为南非、摩洛哥、夏威夷和中国西藏，另外还包括南极洲。

酝酿中的欧洲空间局 100 米口径“绝大望远镜”

与美国不同，由欧洲南方天文台倡议、多个欧洲国家共同参与、建造 100 米口径绝大望远镜显得更有创意，望远镜建好后设置在智利塞罗·帕拉纳山（Cerro Paranal）。其主镜将由 3048 块尺度为 1.6 米的球面镜拼接而成；副镜直径 25.6 米，是一个由 216 块直径 1.6 米的平面镜拼装而成，副镜把光线折返回主镜方向，然后添加改正镜以改正球差和其他像差；改正镜由两块 8 米、一块 4 米和一块 2.4 米的反射镜组成。该望远镜的总转动重量达 14800 吨。欧洲南方天文台的天文学家罗伯特·吉尔默兹称，100 米口径是在一颗邻近恒星的地球大小的行星上

搜寻生命所需的最小望远镜镜面口径。为了实现这个目标，天文学家们将采取一种创新的手段来建造这架望远镜。首先，超大望远镜将会被设计为球形，这样，它就有了不断扩大的空间，并且也可以分阶段的建造。望远镜主镜面的所有部分都是一致的，天文学家们会先建造一个 60 米口径的望远镜，看它是否能够正常工作，然后再将其余的部分逐渐拼接上去，组成一个 100 米口径的望远镜。

上述所有这些大型望远镜都意味着，天文学已经进入了探索天体和宇宙起源的新时代。400 年前，当伽利略第一次将他简陋的小型望远镜指向夜空，他吃惊地看到，原来整个银河竟由数以百万计的星星所构成。从这一刻开始，人类不断刷新自己对宇宙和自我的认识。现代天文学家将借助于新兴的大望远镜，观测最早的星系的诞生，恒星的形成，找出与太阳系相邻的所有行星系，找出能孕育生命的行星，了解生命是否存在于太阳系外，从而了解整个宇宙的起源。人们现在面临的挑战，就是绘出未来太空探索的路线图，并且获得对大宇宙、河外星系、恒星、行星……乃至生命是如何起源的深入了解。展望未来，一个大型天文望远镜时代即将来临，或许会让人们最终发现，在浩瀚的宇宙中人类并不孤独。有的天文学家指出，20 米或 30 米口径的望远镜是能否寻找到类似地球的行星的底线，利用 100 米口径的望远镜，人们将能对这样的行星进行光谱分析，检测它们的大气成分构成，发现宇宙生命的征兆。

（北京天文馆 100044）

