



月高几何

(中国科学院云南天文台 皮晓宇、李荣旺 编译自 Robert P Crease. *Physics World*, 2019, (7): 26)

1969年7月20日历史性的阿波罗11号登月半个世纪后, Robert P Crease 阐述了为什么当时任务中的激光测月试验目前仍然很活跃并不断探索新的领域。

几千年来,月球一直紧密围绕着地球运转,人类曾把这颗明亮神秘的天体视为奇迹的源泉和宇宙中的基本地标。古希腊人甚至相信有一个球承载着月球,将我们变幻莫测的凡间与亘古不变的天堂隔离开。

我们与这个近邻间的关系从1961年5月25日(星期四)开始发生了急剧的变化,这一天美国总统肯尼迪向国会发表演说,向国民承诺十年内实现人类登月。这么一个大胆的设想于1969年7月20日(星期日)成功实现,阿波罗11号的鹰号登月舱于静海着陆,尼尔·阿姆斯特

朗(Neil Armstrong)在月球上留下了首次、蹒跚的足迹。

这次登月是一个非凡的壮举,大约有6亿电视观众观看,阿波罗11似乎成为了当时时代精神的缩影。任何科学和技术的挑战,无论多么宏伟而遥不可及,只要投入足够的资源和专业知识,都可以克服。太空成为了新的前沿——科学和技术会使世界变得更好。即使在今天,身着白色太空服的巴兹·奥尔德林(Buzz Aldrin)、影子投射在月面上、阿姆斯特朗映照在面罩上的照片,仍是一张标志性的图片。

阿波罗11任务不仅将人类的技术、工程和努力推向极致,它还肩负着科学使命。特别地,有在月面安装反射镜的(大胆)试验。如果地基望远镜发出的光能够从这些反射镜反射回来,便能揭示地球和月球之间的精确距离。此前使用雷达研究表明,其距离约为385000 km(取决于月球轨道位置),误差范围在 ± 1 km。

为了改进对地月距离的测量而设计的阿波罗11实验,如期实现了它的目标。事实上,它成为了美国宇航局(NASA)最高性价比的实验。

但为何半个世纪之后，地月距离对物理学家仍然是一个挑战呢？

雄鹰之卵

测量月球距离的新方法源于20世纪50年代末，当时普林斯顿大学的物理学家罗伯特·H·迪克(Robert H Dicke)和他的合作者及其学生设想将反射镜安装在卫星上，如果它们能够从星载镜面上反射光线，研究人员不仅可以精确地测定飞行器的轨道特征，还能更深入理解各种基本的科学见解，包括验证广义相对论以及测量重力常数 G 是固定还是随时间变化，这些都可以通过卫星轨道的变化来体现。

在肯尼迪1961年的演讲后不久，迪克的学生们萌生出了一个方案，通过航天器在月球上安装反射镜阵列。激光刚好在一年前(1960年)被发明，他们认为或许可以用地基望远镜将激光指向反射镜阵列上并探测返回的光。光往返飞行所用的时间，即“距离”，就是地基望远镜和月球反射镜阵列之间距离的两倍。这就可以用来验证广义相对论和研究重力常数 G 可能会有有的变化。

1965年，迪克的学生们向NASA提出了月球激光测距(Lunar Laser Ranging, LLR)试验的想法。两年后在原理上获得了支持，然后学生们成立了月球激光测距实验(Lunar Laser Ranging Experiment, LURE)小组来实施该项目。LURE最初由10名实验物理学家组成，但是团队很快就不得不请来月球和行星轨道方面的专家。当时在维思大学，迪克在普林斯顿大学的毕业生之一，现年85岁的詹姆斯·法勒(James Faller)回忆道：“我们意识到靠我们自己搞不定那个(轨道)，那不是三个月就能掌握的技术。”

不幸的是，阿波罗宇宙飞船只给少量科学设备留有空间，以地震计、磁力计、超热量离子探测器、冷阴极测量仪和太阳风光谱仪为主，飞船上阿波罗月球科学实验包(Apollo Lunar Scientific Experiments Package, ALSEP)早早就已预订满了，似乎LURE并不能取得至关重要的首次登月资格。不过到了1968年秋天，离阿波罗11发射日期还有六个月稍多点的时候，美国宇航局工程师决定缩减其可运载的载荷。

因为没有人知道那里的安全程度，需要尽量缩短宇航员在月球表面工作的时间，为此阿波罗11的科学实验包必须完全重新设计和简化，它被重新命名为早期阿波罗科学实验包(Early Apollo Scientific Experiments Package, EASEP)，包括了简化版的地震计、太阳风和尘埃的探测仪器。重点是现在有空间可以搭载LURE了，因为它具有便捷安装的优势。

宇航员们所要做的就是将LLR装置拿出来，放在月球表面，然后摆好朝向。仪器简单、可靠、低维护。它没有活动部件，且有希望获得大量的科学产出。唯一的问题是，当鹰号从月面升起返回在轨飞

行的哥伦比亚号太空舱时，它是否会扬起尘埃或者碰掉模块的部件，如果尘埃或碎片落在LLR装置上，那么实验就被毁了。

工程师们决定放手一搏。

压力重重

当鹰号于1969年7月20日着陆月面时，宇航员们为了寻找平坦区域而与预定着陆点偏离了6 km，载荷包括了一个由100个二氧化硅角反射器组成、外形尺寸为46×46 cm的蜂窝型阵列，其中每个角反射器是由三个彼此垂直的反射面组成的光学棱镜，像三个方形镜子连接在一个顶点上，能够使入射光束准确地沿着它们入射方向的反方向出射。

1969年7月21日，阿姆斯特朗和奥尔德林将该装置(也称后向反射器)放置在距离着陆器不远的月球表面上。在接下来的几年中，其他的四个阵列反射器也被放上月面，两个稍大的装置由后续阿波罗任务(14和15)在1971年安放，两个法国设计的阵列由前苏联月球车分别在1970年和1973年放置。可是阿波罗11搭载LURE的机会出现得太突然，地球上还没有望远镜做好观测准备。

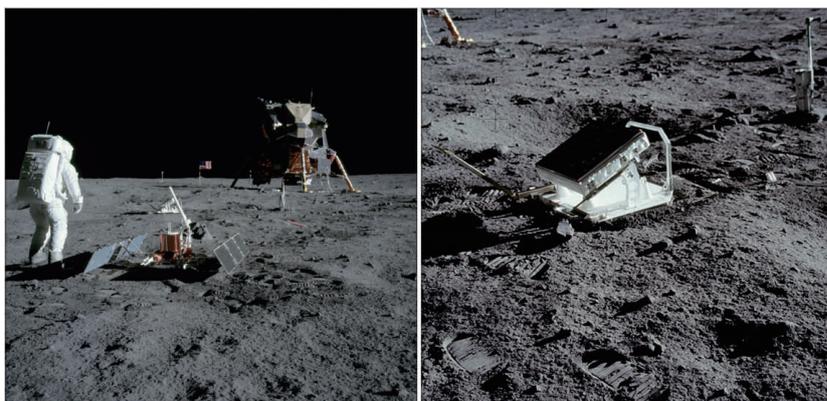


图1 试验时间。(左)巴兹·奥尔德林于1969年7月21日部署早期阿波罗科学实验包，前面是被动地震实验包，其后是激光测距后向反射器，用于测量从地球到月球的距离(细节参见右图)

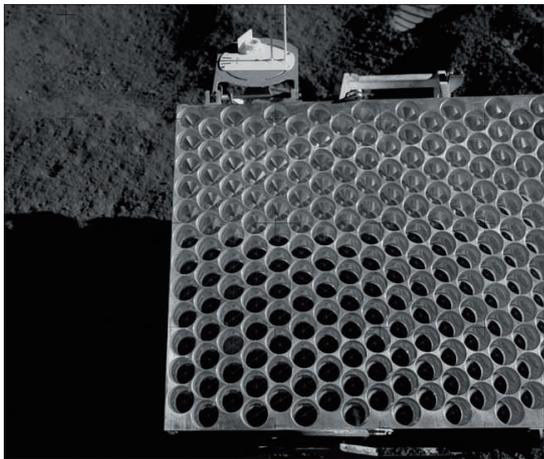


图2 更大、更亮、更好。用于月球激光测距试验的阿波罗15(A15)是由多个角反射器组成的阵列，是月球上四个此类设备中最大的一个。目前，一种新型角反射器计划在2020年登陆月球

用于测距的望远镜需要具备将激光束指向向后向反射器位置和探测回波光子的能力，这并不容易。况且大多数现有的望远镜都预先排满了其他的观测任务。但美国宇航局迫切希望能够在宇航员仍在月球表面期间开展月球激光测距试验，以验证其可行性。LURE团队的成员们瞬间感受到了极大的压力，急需找到一台可开展该试验的望远镜。

加利福尼亚的利克天文台(Lick Observatory)是一个选择，但因有其他预定的天文学研究观测任务，只能使用两周左右。为了确保万无一失，以防利克站的天气变为多云，发射前仅四个月时LURE团队与德克萨斯州麦克唐纳天文台(McDonald Observatory)的主任哈兰·史密斯(Harlan Smith)接洽，麦克唐纳天文台有一个由NASA资助的新建的2.7米望远镜，是用来做行星观测的，但史密斯同意任命迪克以前的另一位博士生道格·柯里(Doug Currie)来负责本次应急项目，为实现LLR的长期运行进行设计和实施相

关技术。

当鹰号着陆且角反射器安装完成时，利克天文台已经就绪，但麦克唐纳站还没有。在利克站，法勒尝试观测返回光脉冲，但没有成功。一个主要问题是没有人知道鹰号在月球上的准确坐标，法勒说：“上帝没有在着陆器那里划个X”。直到鹰号返回起飞时，利克站的天文学家仍然没有探测到任何信号。于1969年8月1日，台站分配的时

间即将用完，迪克到访，焦急询问法勒关于设备的事。

阿波罗11着陆后的第11个夜晚，他们看到了信号，那是首次从月球表面反射回来的激光脉冲。迪克后来称其为职业生涯的巅峰。1969年8月19日，另一位迪克的学生卡罗·阿里(Carroll Alley)使用麦克唐纳站的LLR设备进行了首次观测，该天文台成为1970年之后十五年间LURE项目的核心数据提供者，从20世纪80年代中期开始，则由法国里维耶拉天文台(Côte d'Azur Observatory)的研究人员提供更多的测量数据。

一旦LURE开始用厘米而非千米的分辨率来测量地月距离时，一系列影响该结果的新因素就体现出来了，天文学家想要正确理解测量结果，所有这些因素都需要考虑。在阿波罗11任务后不久，加利福尼亚州帕萨迪纳喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的吉姆·威廉姆斯(Jim Williams)及其同事因此开始构建一个整合了影响地月距离主要因素的模型，并从那时起

不断改进。

现已78岁仍在JPL做兼职工作的威廉姆斯，在我最近一次与他的交谈中特别提到了一些影响地月距离的因素，包括地球和月球的轨道、定向、旋转和摆动以及它们的内力和结构，还有大行星和主要小行星的大小和位置，以及来自太阳的扰动。

威廉姆斯解释说，该模型总共有140个参数，他指出“但还忽略了一些因素，而且可能还有其他因素。”在地月距离成为有意义的测量之前，所有这些因素都需要被整合到一个模型中，相关分析需要综合物理、天文、地球物理等要素，“这就要求我得去学习新东西，”威廉姆斯说。

反弹之际

在LLR之前，地月距离的精度大约在公里级，得益于LLR，地月距离分辨率在20世纪70年代中期提升至20—30 cm，到2000年提升至2—3 cm。同年，为了将地月距离的不确定性降低到约1 mm，一个雄心勃勃的项目在新墨西哥州的阿帕奇点天文台(Apache Point Observatory)落地，这其中一个核心人物是华盛顿大学的物理学家汤姆·墨菲(Tom Murphy)，当时他只有29岁，在阿波罗11宇航员安装第一个阵列时还没出生。

在华盛顿大学攻读博士后之前、获得加州理工学院博士学位的墨菲，与两位同事共同向NASA提议使用LLR以前从没用过的一些技术，包括用雪崩光电二极管阵列来放大信号。该项目称为阿帕奇点天文台月球激光测距计划(Apache Point Observatory Lunar Laser-Ranging Operation, APOLLO)，

于2005年开始执行。墨菲告诉我：“我们认为我们可以将LLR测量精度提升一个数量级，并为我们可以很多领域做出很多的改进而兴奋不已。”

事实证明这极具挑战，一方面，在毫米级精度水平上，所有已知的影响都必须更加认真的确定，从前在厘米分辨率时可忽略的较小影响现在也必须囊括其中。“我们就像一头扎进了各种效应的老鼠窝，”墨菲说，“必须考虑影响地基望远镜和安装在月面上的反射器之间距离的所有因素，才能达到一个新的高度。”

太阳摄动可以使月球轨道变动数千千米，金星和木星的摄动则分别会变动约1千米，这意味着墨菲的团队需要知道这些行星高精度的位置和速度，这是非常困难的。墨菲告诉我：“没有一个地方记录了太阳系中所有天体的位置，而且每个天体都有未知参数，包括三维位置、速度和质量，加剧了不确定性。”

太阳系中所有天体的位置和摄动影响还只是问题之一，在毫米级分辨率下，地面测站和月面反射器的精确坐标也显得很重要，它们都在不停的运动。“这令人大开眼界，”墨菲说，“你认为地球是静止的，但它一直在动，地壳还被地下水、大气层和海洋载荷(运动中的水体)推动着，如此等等。”事实上，当潮汐在加利福尼亚滨海上积起海水时，它会将新墨西哥州移动几个毫米。“地球上和月球上的每个地点都有自己独特的位移特性，”墨菲补充道。

地球和月球内部结构的更多信

息需要建模并考虑在内，这也是为什么现就职于加利福尼亚大学圣地亚哥分校的墨菲在近20年的时间里仍在研究该项目的原由。在毫米级的精度下，甚至是月面的反射镜也不是不变的。多年来，由于月球表面经常扬起的尘埃，角反射器的性能一直在缓慢下降。墨菲说：“我没看到，也不能百分百肯定，但尘埃是最合情理的解，尘埃吸收光线、减少了统计数据。”

尽管如此，新的分辨率使得LLR实现了它的许多目标，初期的目标之一就是等效原理，即惯性和引力质量是相同。如果它们不同，那么由于地球和月球的不同，太阳会以稍微不同的速率加速这两个天体，这将会以某种形式引起月球轨道半径的改变，变化量大到足以测量。没有看到违反等效原理的情况，也没有任何证据表明 G 的变化，这表明月球的距离和周期既没有增加也没有减少。新的分辨率还揭示了月球内部的许多信息，比如它具有某种流体核心，尽管尚不清楚具体是什么。

锐意进取的柯里是一个国际科学家小组的领导者之一，他们在策划下一代月球角反射器，计划于明年夏天由正在竞标NASA资助的商业承运公司运送到月球表面，旨在将测距的精度提高30倍，大大增加科学产出。

两大遗产

精密的基本物理量测量通常被认为可以提供有关自然界某些特征的信息，如质子自旋、中微子质量等，它们的测量与自然界的其他特

征无甚关联(或大部分是这样)。而用LLR测量的地月距离则不然，它无法在封闭的环境中完成，特别复杂。事实上，无论仪器精确到何种程度，这种复杂程度永远都不会消失且将随着每次新的测量愈发增长。

这种新的复杂性也影响了参与其中的科学家的工作方式，地月距离的测量需要天文学家、天体物理学家、地球物理学家之间的通力合作，以及建模者和测量者之间的合作。越来越多的关于天体位置和运动的详细信息，甚至天体的内部结构，都需要整合起来去理解每一次测量的意义，而要确切掌握所有的影响几乎是不可能的。这些合作同样也只会变得更加复杂。

距人类第一次登月至今已有五十年，阿波罗计划留下了两个迥然不同的遗产。一个是从阿波罗8开始的“地球升起”系列著名照片，部分被照亮的地球刚好位于月球地平线上方，如同从地球上看到的月亮一般静谧而冷酷。我必须强调，另一个就是LLR试验，它不断揭示了地球和月球之间的距离起伏变化，以及这两个天体之间、与太阳系中其他天体之间的相互作用。

哲学家经常区分“现象”和“本质”，前者是普通人类感知体系中描述的世界，而后者是科学框架所描述的世界。在地月关系中，没有什么比“地球升起”和LLR更能类比这种差异。举世闻名的阿波罗11登月50年后，那次任务唯一仍在运行的科学仪器就是LLR，对于物理学家们来说其众多的科学成果便是LLR依旧活跃的原因之一。