

# 如何精确测量地球与月球之间的距离

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Mark Buchanan, *Physics*, June 27, 2025)

对地月距离的高精度测量在月球地质学研究和广义相对论检验中起着关键作用。使用最先进的脉冲激光器系统，精度可以达到5—10 mm。最近一位研究人员提出了一种方法，通过使用连续的高功率光束取代激光脉冲，可以显著提高测量精度。他相信新方法在此后几年内可达到亚毫米级的精度，进而提供一种探测隐藏在月球内部的细节以及探测超低频引力波的技术。

目前测量地月距离的最佳技术需将一束激光脉冲射向月球表面，在那里，脉冲从一个叫做角反射镜(corner-cube reflector)上反射，将光向来时的方向返回。测定脉冲往返的时间便得到距离。

当激光脉冲到达月球时，光束将有几公里宽，所以反射镜的大小决定了反射光的数量。较小的反射镜可提高精度，因为减少了几种误差的来源，包括因月球晃动带来的误差。但代价是：较小的反射镜返回的光较少，降低了信号噪声比。



研究人员现在可以使用激光脉冲以毫米级的精度测量地月距离。改用连续激光操作将使精度提高10—100倍，从而可以对广义相对论进行更严格的检验，并改善对月球内部结构的认识

最新的反射器(其中一些是3月份由“蓝幽灵”任务放置在月球上的)直径只有10 cm，所以它们返回的光可能只有原来米级装置的1%。

加州理工学院的Slava Turyshev说道：“现今的脉冲系统每个脉冲仅反射回少量的光，测距的精度限制在5—10 mm。”作为替代方案，Turyshev提出使用一种不同的测量技术，使用高功率连续波激光器。他估计，使用千瓦激光器系统收集光的时间可以长达100 s，使反射回的光子数量增加1万倍，可能达到亚毫米甚至几十微米的精度。

连续波测距系统使用无线电波所熟悉的技术——调幅(AM)或调频(FM)来对信号编码，从而测量距离。通过将反射信号与本地“参考”激光进行比较，标准的信号处理技术能够估计从月球反射的光所经历的时间延迟。

一个关键的挑战是克服来自大气湍流的扭曲，这在光收集时间更长时会变得更糟。地球大气的湍流会使光路的长度变化几十到几百微米。Turyshev认为，为了克服这一问题需要对一些误差做修正，在某种程度上，可以通过改进对大气中温度、压力和湿度梯度的实时监测来实现。他还计算出，同时在多个波长上进行激光测量(这可以帮助研究人员监测大气的光学特性)可以将误差

降低10倍左右。

另一个挑战是控制机械漂移和热膨胀。振动和微小的温度变化可以使望远镜、反射镜或光学平台移动几微米，这可能会在AM或FM光学信号编码中引入误差。Turyshev认为，通过系统地使用极其稳定的光学元件和由热不敏感材料制成的支架，克服这些问题应该是可行的。或者，可以主动控制光学设备的温度，例如使用冷水冷却，将变化限制在0.1 °C以内。

最后，实现这种精度所涉及的先进光学和电子学需要参考激光器具有极精确的定时和很高的频率稳定性，参考频率必须在整个测量期间保持不稳定性小于 $10^{13}$ 分之一，测量时间可能需长达100 s，以获得几十微米的精度。实现这种精度的挑战包括实时补偿月球靠近地球或远离地球的运动，大约每秒1公里。

德国莱布尼茨大学的地球—月球动力学专家Jürgen Müller表示，若能攻克Turyshev提出的挑战，将对未来的科学探索产生重大影响。“如果月球跟踪能改进到亚毫米甚至数十微米级别，”他指出，“我们将能够开展一些全新的科研项目。”Müller特别提到，其研究团队通过模拟发现，月球核心与月幔的分界线以及核心自转规律，都能更精准地测定。Turyshev预计，月球测距精度的提升将为广义相对论中的等效性原理提供更严格的检验，并有望探测到超低频随机引力波背景。

DOI: 10.7693/wl20250808 CSTR: 32040.14.wl20250808