

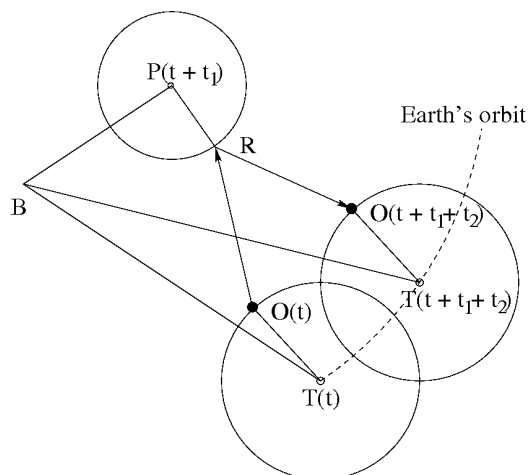
雷達測距與月球雷射測距

金升光

雷達在二次大戰結束後就成為天文學研究的工具。1946 年接收到月球反射的回波，1961 年金星，稍後更延伸到水星、火星、甚至於木星系統等太陽系天體。原則上，由於時間可以精確的測量，計算電磁波信號傳播所需要的時間，再乘上電磁波的速度，也就是光速，可以決定距離。實際上，當信號發射、反射、接收時，地球也移動到新的位置，其中的變化可透過天體力學軌道計算來比對。另一方面，透過雷達測定金星等天體的距離和運動，可以準確決定「天文單位」的大小。「天文單位」即 Astronomical Unit，簡寫為 au，最初定義為地球到太陽的平均距離，是測量太陽系內大小天體運動和太陽近旁恆星視差的基礎。國際天文聯合會 IAU 在 2012 年重新定義 $1 \text{ au} = 149,597,870,700$ 公尺。

實際的雷達測距 (Radar Ranging) 需要考慮包括大氣的折射、電子電路和光學系統的延遲、是否通過日冕或太陽風的路徑、相對論的影響、發射與接收兩端相對運動所產生的都卜勒效應等等。觀測精度小於 1 公里，最大的誤差來源是行星的半徑。1961 年，Victor 和 Stevens 使用 13 千瓦的雷達，頻率 2,388 MHz，照射到金星表面只剩 10 瓦，其中的 90% 被金星吸收，其餘往各方向散射，以致於地面上直徑 26 公尺的天線收到信號時僅剩 10^{-20} 瓦。

雷射在 1960 年誕生後，美國阿波羅計畫太空船 11 號、14 號、15 號和前蘇聯的無人太空船 Lunokhod (月球漫步者) 1 號、2 號在月球上五個不同的地點設置了倒反射器 (retroreflectors)，平均面積小於 0.15 m^2 ，迄今多半仍順利運作。雖然使用的高能脈衝雷射光束在大氣中擴散角大約只有 4 角秒 (1 度 = 3600 角秒)，照射到月球上卻能涵蓋幾公里寬的區域，再經由倒反射器反射回來，地球接收站望遠鏡所收到的信號，強度差不多只剩下幾個光子。月球雷射測距 (Lunar Laser Ranging) 的精度小於 2 公分，和月球的距離相比，相對誤差達 4×10^{-11} ，可以用來研究海洋、大氣等地球物理模型，甚至於驗證愛因斯坦的廣義相對論。



行星雷達測距示意圖：

T 是地心的位置，P 是行星的位置，O 是雷達和接收天線的位置。信號在時間 t 發射，經過時間 t_1 後由行星表面 R 點反射，又經過時間 t_2 後被天線收到。行星軌道運動和時間計算以太陽系重力中心 B 點為準。

參考文獻：

Kovalevsky, J., *Modern Astrometry*, 2nd Ed., Springer, Berlin, New York, 2002

Victor, W. K. & Stevens, R., 1961, "Exploration of Venus by Radar", *Science*, 134, 46

Pettengill, G. H. & Shapiro, I. I., 1965, "Radar Astronomy", *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 3, 377

IAU 官網 <http://www.iau.org>, (Resolutions adopted at the General Assemblies)

(正文及圖說原文刊載於中央研究院天文及天文物理研究所《天聞季報》2012 年冬季號)