

望远镜参数的选择

1 望远镜的几个重要参数

口径 D 。天文望远镜的口径多数情况下指的是光学系统的第一个镜面，即天文望远镜光学系统中决定其收集光能量多少的光学元件的直径。天文望远镜收集光的能力与 D^2 成正比，由此可见天文望远镜的口径越大，其能够聚集的光子越多。天文望远镜的理想空间分辨角可由(1)式计算得到，其中 θ 以弧度为单位， λ 是入射光的波长。从(1)式中也可以看到，望远镜的口径越大，也能得到更高的空间分辨率。但望远镜口径的增大也会直观地带来一些问题，例如，镜片更大意味着更重，在望远镜设计时需要考虑其在重力影响下的变形；另外，望远镜的造价也直接和望远镜的口径相关，大致与 D^4 成正比。

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (1)$$

光谱分辨率 R 。这里所指的望远镜的光谱分辨率实际上是其配套的光谱仪或任何频率谱测量装置的光谱分辨率，表征的是其分辨电磁波谱的能力。光谱分辨率与光谱仪的分辨能力密切相关，其可由(2)式计算得到，其中 $\Delta\lambda$ 为该装置可区分的最小波长差。现在光谱仪的光谱分辨率一般在 10^3 到 10^4 这个量级上，一个高分辨率摄谱仪的例子则是欧洲南方天文台的甚大望远镜中的红外阶梯光栅，其光谱分辨率可达到 100,000。而低分辨率的光谱通常只是形式上的光谱，其构成可能来自于多波段的测光的结果，即谱能量分布图。

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (2)$$

透光效率 η_{qe} 。一般来说，望远镜镜面接收到的光子不会完全转化为可读出的信号，这可能来自望远镜光路设计上的损失，也可能来自于光子接收系统的响应效率。望远镜的透光效率是望远镜本身决定的，为了简单考虑，我们不考虑其随波长的变化，而认为其对于所有波段是一致的。因此在计算光谱时，还需要乘上这个参数。

除此之外，望远镜还有很多其他重要的参数，例如视场、指向精度、带宽等。这些在实际的望远镜设计或数据处理中都有其重要的意义。不过对于初步的望远镜参数选择来说，可以从几个较为简单的参数入手。

2 望远镜选择的基本原理

以解决一个具体的科学问题为目标，选择最合适的望远镜，是做天文观测的最主要的准则。在本实验中，我们要对系外行星的大气做光谱观测，那么我们应该选用足以让我们探测到系外行星大气吸收信号，且该信号高于一定阈值的信噪比的望远镜。假设我们已经计算过凌星窗口，且已经在综合考虑了包括是否夜晚、能否看到目标、天气在内的，各个可供选择的台站是否适合观测的问题后，选择了正确的观测地点，则我们面临的问题变成了我们要在这个地点用多大口径的望远镜观测，用多少分辨率的光谱仪比较合适。

当然，由于在实际中各个台站的可供选择的望远镜也是固定的，且这些选择通常也是因台站而异，所以这个问题放在实际观测中会复杂得多，一般要结合台站选择综合考虑。不过，在本实验中我们对此做了简化，假设各个地点可供选择的参数选项是一致的，这等同于把这个问题独立于观测地点选择的问题，在做出选择时只需要考虑目标系外行星的宿主恒星的光谱流量和望远镜的参数组合，对系外行星大气吸收信号的信噪比 $[S/N]_p$ 的影响。

探测系外行星大气光谱的原理是，大气在不同的波段上的吸收强度不同，在某些波段上可能是透明的，但在另一个波长位置完全吸收或散射，吸收是具有最大值的，即完全不透明。那么当行星凌星时，可以进行多次短曝光并探测光谱，用未凌星时恒星的光谱与其作差，就

可以获得行星的光谱。行星光谱可以分为一个较为平均的吸收部分和其上的起伏部分，平均吸收的部分是行星的固体部分遮挡，可以用凌星信号得到的行星半径等参数扣除，起伏部分则是我们感兴趣的行星大气光谱信号。

假设我们探测的目标系外行星在某个波段上不透明，则相当于在凌星时，是一颗半径为 $(H + R_p)$ 的行星凌过恒星表面，其中 H 是大气标高，与该行星的平衡平衡温度及物理特性相关。相较于行星原本的半径 R_p 而言，多出来的部分是一个环面，面积近似于 $2\pi HR_p$ ，我们要探测的就是这一部分的吸收信号光谱。这个波段上的大气吸收信号的信噪比可以近似用(3)式表示，其中 R_s 是恒星的半径， Φ_s 是恒星的光谱流量。若仅考虑光子的泊松噪声，可以将其表示为(4)式，其中 $[S/N]_s$ 为恒星光谱在该波段上的信噪比。

$$[S/N]_p = \frac{2HR_p\Phi_s}{R_s^2\sqrt{\Phi_s}} = \frac{2HR_p}{R_s^2}\sqrt{\Phi_s} \quad (3)$$

$$[S/N]_p = \frac{2HR_p}{R_s^2}[S/N]_s \quad (4)$$

恒星的光谱的量级可以近似用(5)式计算，其中除了用到望远镜的各项参数之外，还有一项 η_{at} ，这一项是针对地面观测考虑的，其意义为地球大气的透过率。当在空间观测时，该参数可以假定为 1；在地面观测时，该参数可由两部分组成，一个是因 airmass 导致的全波段上的大气消光，另一部分是地球大气的吸收，后者与波长相关。不过在近似计算时可以将 η_{at} 简单的定为一个定值，例如 0.6，且与波长无关。需要注意的一点是，行星的凌星造成的恒星光度的下降最大只是在 1% 的量级，所以计算 Φ_s 时用到的恒星流量 F_s 并不需要细致地扣去行星的遮挡，做量级估计时， F_s 可以从恒星的星等出发估计，或者使用黑体谱及恒星的距离等参数来计算。

$$\Phi_s(\lambda) \cong \eta_{qe}\eta_{at}(\lambda)F_sD^2\frac{\lambda}{R}t \quad (5)$$

为了确认探测到的光谱中能够分辨出某个分子的吸收，例如水的 1.4 μm 吸收线，一个方面是需要足够的光谱分辨率，这个与分子吸收的平均带宽和光谱的总带宽相关，例如假设水的吸收在 1.3 μm – 1.5 μm 上较为明显即带宽为 0.2 μm ，而光谱的探测范围为 0.3 μm – 3.3 μm ，则光谱分辨率至少应大于 15 才能确保探测到的吸收线来自我们期望的波段。另一个方面是需要信噪比超过一定的阈值，一般而言，可以将该阈值定位 3。通过设置这个阈值，我们就可以反推出我们为了达到预期的科学目标，需要的望远镜的最小口径，能够接受的最低通光效率或最低大气透过率。

在做科学问题时，我们总是期望用最低的成本获得最大的科学产出，所以并不是选择越大口径的望远镜就是越好的。我们还需要考虑我们支出的成本是否符合我们得到的科学收获。因此在理论上，我们应该选择满足要求的最小口径的望远镜。