揭开星光中隐藏的信息

(北京大学 朱 星 编译自 Gabriel Durkin. *Physics*, August 29, 2016)

1879年瑞利提出光学成像分辨本领的判据。最近新加坡国立大学的Tsang等人提出一个挑战性新结果，他们认为长期以来制约天文观测成像精度的瑞利判据仅仅是个特例。运用量子计量技术，他们展示了对于两个互不相干的点状光源(如两个星体)的观察可以达到任意精度，甚至在它们之间间距减少到零时也是如此。

量子计量学是上世纪60年代末由Carl Helstrom建立的，这是一个20世纪40年代由统计物理学家发展起来的量子力学与经典估计理论的奇妙组合。这种方法将用于优化估计的基本变量与基本常数的数据源进行量化。这些数据源包括处于纠缠态的量子系统的预处理，然后进行仔细的测量，由此获得某一个参数。

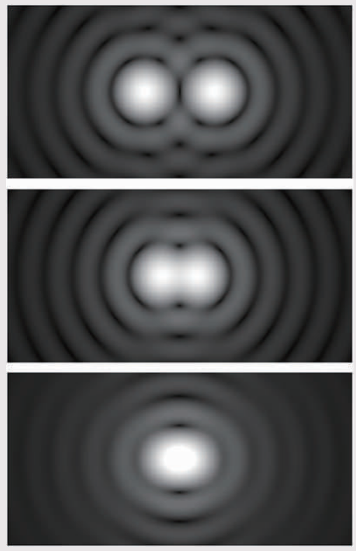
比如在遥感领域，对于夜空中的物体进行成像时，不存在为一个物理体系准备最优的状态。当被测物体间距非常接近时，对于这类光源的成像受到衍射极限的限制。光的波动性使得它在空间传播时发散，在障碍物附近弯曲，如同光通过一个望远镜的光阑时。这样产生的衍射花样可以用像平面的点扩散函数(PSF)描述。瑞利判据描述两个间距很近的物体刚刚能够分辨的条件是，当某一个物体的衍射花样中心(或者PSF的峰位)刚好与另外一物体衍射花样的极小值重合。

一些天文学家说，他们能够分辨出比瑞利判据所允许的间距稍微近的物体。自然而然的，当物体之间的角距离减小时，就很难用直接观测获得物体间距信息，尽管有些乐观的天文学家采用最复杂的信号处理技术，但也无助于事。当物体间距接近于零时，任何对于间距误差的直接估算将变成无限大，这是从伽利略时代的星体成像时就受到的角分辨率极限的限制。这是Tsang等人所称的“瑞利困扰”。

运用量子计量方法来减小估计误差，他们研究工作最初的成果是，当估算一维条件(即光源位于一条直线上)两个PSF的间距时，不存在原则上的困难。当两个PSF间距接近于零时，可以获得的信息成为常数。

或许有人说，这仅仅是理论证明。但量子计量学处理方法表明，总是存在一种优化的测量，可以将间距参数的估计误差降低到最小值。然而自相矛盾的是，这种优化测量依赖于这个间距参数的值。为了回避这种担心，Tsang等人提出一种思路，运用最新的量子光学技术可以得到最小的间距变量估算误差，与人们的直观感觉相反的是，假定所有PSF都是高斯形状的，对于所有的间距值，这一误差将保持为常数，作者将这种方法称为空间模式多路化(SPADE)，即将来自两个来源的光分成不同的光学波导，其横截面具有二次型的折射率。从数学上，这种SPADE测量是将叠加的PSF分解为Hermite函数的完备集，这如同傅里叶变换将一个实函数分解为正弦与余弦项的叠加。由此，人们或许可以直观地解释为什么这种Hermite完备集测量法能够规避瑞利困扰。

另外这个结果是使用量子领域的技术应用于经典结果。在不存在量子相关的情况下，这种方法仍能给出最佳可能的测量策略，以及最小的估算误差。



瑞利判据：在对两个光源直接成像时，仅当它们衍射花样的中心间距，或者是它们点扩散函数峰的间距远大于其峰宽时才能够分辨。(上)两个光源的距离大于瑞利判据间距；(中)两光源间距符合瑞利判据；(下)间距小于瑞利判据

量子计量方法另外的好处是，它允许发展普适的不确定关系，如系统处于平衡状态时的温度和能量，或者在一个干涉仪两臂之间光子数差及路径差。Tsang的结果可以表示为光源的间距与“动量”之间一种普适不确定关系。与间距估算相应的均方根误差和相互叠加的PSF动量空间变量成反比。

这一研究将量子涨落的压缩及量子纠缠的作用拓展到测量精度的提高，并且可以应用到对光源实行控制的其他领域(如光学显微镜)中。

更多内容详见 Mankei Tsang et al. *Phys. Rev. X*，2016，6：031033。