

塑造光流：光子学在天文中的应用

1608年, Hans Lippershey 发明了望远镜, Galileo 将其运用于天文观测中, 由此开启了现代天文学的历史. 今天的最大光学望远镜口径超过 10m, 10 年之后, 将会有多个新一代极大望远镜 (ELTs) 观测星空. 望远镜收集的光束在会聚到望远镜焦面之后, 将重聚焦进入终端仪器进行数据分析和处理.

光子学被描述为具有塑造光束的能力, 光子学的诞生可以追溯到 1841 年 Jean-Daniel Colladon 的演示实验. 然而, 1970 年高质量光纤的发明才使光子学得以应用到天文仪器中, 从那以后, 天文仪器专家们又花了 10 年时间才认识到它的潜力. 光纤最显著的优点是优异的光束传导能力, 它能够将在传输 1km 的距离而损耗低于 1dB, 而相等厚度的玻璃透镜则完全无法透过光线.

直到上世纪 70 年代, 望远镜的观测模式仍是一次观测一个目标源, 然而天文学家发现, 采用光纤可以同时观测多个目标——一条光纤对应一个目标. 光纤的一头对准观测源, 另一头与光谱仪相连, 因而诞生了多光纤光谱仪. 90 年代以来, 多光纤光谱仪提供了超过 100 万颗恒星和星系的光谱, 对恒星天文学和宇宙学的发展具有深刻影响¹⁾. 而今, 单根光纤被光纤束所替代, 可以得到具有空间信息的星系光谱, 已获取超过 1 万个星系的此类光谱. 光子学的应用不仅是简单地将焦面上的光传送到终端仪器, 下一代采用拼接镜面的大望远镜的主镜口径可达 40m 以上, 其中的光学设计方案更为复杂, 例如运用配备激光导星的自适应光学技术来校正大气湍流造成的图像畸变. 与传统光学元件相比, 光子学的应用将使下一代终端仪器结构更紧凑, 复杂性降低, 制造成本更低.

天文光子学是一门天文学和光子学的交叉学科, 2001 年, 天文学家开始考虑下一代大望远镜与噪声抑制技术、积分视场光谱技术、恒星光干涉技术、自适应光学的新发展, 由此诞生了这门新兴学科. 我们将重点介绍使用了“光子灯笼”(photonic lantern)(图 1)的新一代光谱仪.

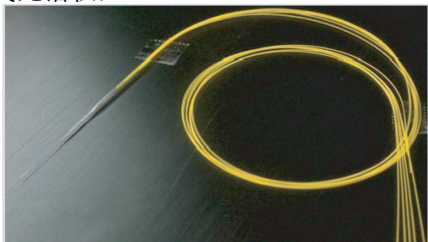


图 1 “光子灯笼”(Photonic lantern)能将光束从多模传播转变为多个单模传播

由于天体是暗弱源, 在焦面一般使用较大芯径的多模光纤(直径约 $100\mu\text{m}$), 因为它比起小芯径的单模光纤能够在最大范围内接收传导光束²⁾. 然而, 小芯径单模光纤在恒星光干涉等技术中也有重要应用. “光子灯笼”能够将光的多模传播模式转变为多个单模传播.

天文光子学最早成功应用在噪声抑制之中. 地球上层大气中存在的羟基(OH)被激发后会产生几百条明亮的窄发射线, 严重影响波长为 800—1800nm 的红外观测, 因此, 过滤背景辐射是天文学观测的一项长期目标, 目前唯一可行的方法是基于光纤光栅技术(FBG)的复数滤波器. FBG 的原理为光束在光纤中传导时, 将按写入纤芯的多个折射率进行反射³⁾. 光栅可分为周期幅度调制型和复相位调制型, 向前传播和向后反射的光场进行干涉从而产生滤波效果. 光场的相干叠加要求使用单模光纤, 这是因为单模光纤中传播矢量均沿光纤轴向, 而多模光纤中由于每一种模对应波矢方向不同, 将造成光谱模糊, 解决这一问题的方法是采用“光子灯笼”, 将光束从多模光纤中转化到平行排列的多根单模光纤中. 在新南威尔士州 4m 的 Anglo-Australian 望远镜的 GNOSIS 仪器中采用了“光子灯笼”技术, 结合 FBG 进行 OH 滤波. 然而, “光子灯笼”技术尚处于实验室阶段, 目前可替代的方法是使用多芯光纤技术, 将多根单模光纤沿芯径轴线集成, 在其中写入均匀布拉格光栅已经实验成功.

光子积分多模微型光谱仪(PIMMS)是“光子灯笼”的另一项突破性应用. 在光谱分辨率一定的情况下, 光谱仪的尺寸和狭缝宽度成比例, 反过来狭缝宽度又与望远镜口径成比例, 常规的现代光谱仪可长达 6m 以上, 这是因为狭缝宽度需要和望远镜的点扩散函数匹配, 望远镜本身支撑结构变形和大气湍流等因素使得望远镜不能达到衍射像质, 表现为点扩散函数展宽, 因而要求光谱仪具有更宽的入射狭缝. 光子灯笼的多模端能接收望远镜焦面上的入射光, 将其转变

- 1) 我国创新性设计和自主研制的目前国内最大的望远镜“郭守敬望远镜”(LAMOST)就是一台大视场多目标光纤光谱望远镜, 其光谱观测能力是国际上同类项目 2dF、SDSS 的 6—10 倍, 现已进入正式巡天观测阶段. ——译者注
- 2) 焦点光纤芯径大小须与入射星光斑和台址视宁度(即大气湍流扰动的程度)共同决定的光束照射范围相对应. ——译者注
- 3) 光束经过光纤光栅时, 其波长满足光纤光栅布拉格条件的一部分光将产生反射, 其余光束继续传输, 达到窄带滤波的目的. ——译者注

为单模出射,单模端提供达到衍射极限的像斑点源,并进入衍射极限光谱仪中,因此 PIMMS 仅有鞋盒大小.衍射极限光谱仪的光谱分辨率 $R \equiv \lambda/\delta\lambda \sim mN$,其中 m 代表干涉级, N 代表精细度,约等于相干光的数目,对于长度为 10mm,2000 线对/mm 的光栅,一级光谱分辨率 R 可达 20000,整个仪器仅有 10cm 长.假设“光子灯笼”的多模端芯径为 $100\mu\text{m}$,单模输出端数量为 100 个,这要求有效缝隙的长度是多模光纤的 10 倍,这意味着缝隙方向的探测器的长度是常规光谱仪的 10 倍,这就增加了像素,因此仪器噪声和制造成本也随之增加,设计薄矩形像素探测器可以解决这一问题,其像素沿隙缝方向排列,不会增加额外的噪声,此项技术正在发展当中.处理几百根单模光纤似乎会增加光谱仪的复杂性,然而,来自爱丁堡的 Heriot-Watt 大学的研究人员 Robert Thomson 采用“固体灯笼”极大地改善了这种情况,运用极速激光注入,他在一小块玻璃上制造了 100 根单模管,每一根单模管沿相同轨迹进入微型光谱仪的入射狭缝.

积分光子光谱仪采用了被称为阵列光导光栅的特殊的光谱色散元件(由荷兰的艾恩德霍芬科技大学的 Meint Smit 在 1991 年发明),从单模光纤入射的光束经过二维波导后进入嵌套阵列曲线波导管,然后在出射端进行干涉形成光谱.这种光谱仪非常接近 $R = mN$ 的衍射极限,通光效率达 60%,此外,与增大入射角获取高阶光谱的光栅不同的是,它可以通过简单地增加临近波导管之间的长度差得到高阶光谱,从而避免了大入射角造成的光能损失.在波导管的前端,加入“光子灯笼”,光束从多模光纤中色散,为了避免波导平面内光谱重叠,光束的色散方向必须垂直于波导平面,这种设计已经在近期用于临近恒星的高分辨率光谱观测.

另一种采用特殊色散和探测方式的光子光谱仪是驻波积分傅里叶变换光谱仪(SWIFTS),在单模波导中相向传播的光束形成干涉驻波,经由傅里叶变换提取光谱信息.驻波的探测是采用在波导外设置散射纳米探测器阵列来探测渐逝的边沿场,每个探测器获取极少光束,沿波导管长度方向就可提取干涉信号. SWIFTS 分为两种操作模式: Gabriel Lippmann 模式和 Dennis Gabor 模式.在 Lippmann 模式中,驻波由光导末端的反射镜产生的反射光束产生,干涉条纹位于镜面端.在 Gabor 模式中,光束等分后从两端相对入射,然后进行干涉.这两种模式都产生入射辐射光谱,但 Gabor 模式也能通过将干涉条纹从精确的中心位置移动来获取相位信息.基

于 Gabor 模式,可以设计出将远距离的两个望远镜获取的光束进行合成的仪器.

在天文光子学诞生的同时也出现了空间光子学,这主要是由激光通信的发展推动的.空间飞行器数量的增加要求数据的集中能力远超过微波通信.近期, NASA 和 ESA 的卫星验证了空间激光通信的可行性,虽然目前光子学在空间仪器中的应用受到限制,但在未来几年里,它的应用可能会逐渐增加.面临的主要挑战在于,虽然空间环境极其稳定,但在发射阶段,仪器将会受到强烈震动,此外,设计者还应考虑极端温度、高辐射、真空条件的影响.领导过先驱性的宇宙背景辐射探测实验的 John Mather 指出,在空间环境中,相对论性运动的粒子在通过一对光纤时产生的 Cherenkov 辐射将会使实验失败,然而,可以采用辐射加固物质使得 Cherenkov 辐射低于有效数据.明年悉尼大学将发射 PIMMS 型的微型光谱仪,其重量仅 100g,卫星重 1kg,这是随后几年将发射一系列光子仪器中的首个.在这些仪器中,其中一个是基于光纤的辐射测量器,在大芯径光纤两端设置普通探测器来记录沿光纤轴向产生的 Cherenkov 辉光.光子学最具有革命性的应用之一是目前正在飞往火星的好奇号搭载的 ChemCam 仪器,该仪器由美国和法国科学家研制,采用脉冲激光液化岩石表面,通过多光纤光谱仪接收透过液体的光束来研究岩石的成分.机械挖掘获得的土壤采样将使用光子波导管进行分析,这种波导管本身利用了土壤粒子的微流体传输原理.下一代火星探测器也将考虑搭载 SWIFTS 微型光谱仪.

迄今为止,光子学已经运用到光束传输、滤波、噪声抑制、光干涉和激光导星中,然而还有很多应用有待发掘.虽然目前这些应用大多局限在光学和近红外波段,但有迹象表明,在紫外和中红外中将会有重要应用.未来在空间科学中的应用将包括卫星间的激光测距,行星内的激光通信,信号传输和自适应光束校正,我们也将期待应用激光频率梳的频率计量的重要发展.

Victor Veselago 在 1967 年提出的关于负折射系数材料的理论得到了证实.着眼于未来,我们希望光子学展示它巨大的潜力,或许在某些情况下,它可以超越光学系统的衍射极限,当然这也要求在奇异材料的研制方面取得突破性进展.

(中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所 白华
编译自 Joss Bland-Hawthorn, Pierre Kem. *Physics Today*,
2012, (5):31, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)