

# 空间环境之光学探测

袁 桦

## 一、前言

自然界中多姿多彩、纷繁变幻的光学现象激励人们不断认知和探索丰富的未知世界。在地球大气层之外，存在一个叫做“空间环境”的领域，它涵盖从离地面大约 20 km 开始一直延伸到太阳的广阔

空间。空间物理学研究这一区域内千变万化的物理现象，探寻其中未知的物理规律，其研究结果将为人类的通信和航天活动提供基础数据和物理模型。空间环境中从离地面大约 20 km 开始到 300 km 高度的中高层大气区域内，就存在着多种多样的光学现象，引导人们去研究这



图 1 地球高纬地区的极光



图 2 中高层大气区域的气辉辐射

一高度区间的物理规律，提供了直接的求真目标。这些光学现象包括从早期人类肉眼所见的高纬地区的极光(图 1)，利用设备观测到的气辉辐射(图 2)，到 20 世纪 80 年代观测到中高层大气区域内的中间层和低热层高度上的闪电(图 3)。

人类将透过这些炫丽光影去探求其中的物理规律。这首先要从了解基本物理参量入手，在不同高度区间发生的物理过程，就是这些区间内的物质之间相互

作用以及与外界相互作用的过程，体现在物理研究中，就需要分析其密度、温度、压力、风速、光谱特性等物理参量的变化。

要获取这些参量的观测数据，就需要利用专业设备对不同的高度区间的物理参量进行观测。观测方法主要有两类，一类是天基观测，包括卫星观测，气球观测等，以卫星观测为主获得的地球空间环境监测的数据，能够提供较好的全球地域覆盖，为研究空间环境全球的演变提供较好的分析资料；另一类是地基观测，就是将设备安装在地面某个相对固定的观测点，经过不断的观测能够积累长期的观测数据，为研究空间环境的地域的时变规律提供很好的分析资料。在我国，“双星计划”的两颗卫星成功地进行了观测，提供了宝贵的空间环境的天基观测数据。

## 二、子午工程的光学探测手段

继“双星计划”之后，2008 年 1 月，国家重大科技基础设施项目——东半球空间环境地基综合监测子午链(简称“子午工程”)启动建设。子午工程沿东经 120° 子午线附近，利用北起漠河、经北京、武汉，南至海南并延伸到南极中山站，以及东起上海、经武汉、成都、西至拉萨的沿北纬 30° 纬度线附



图3 中间层和低热层高度上的闪电

近现有的 15 个监测台站，建成一个以链为主、链网结合的，运用地磁（电）、无线电、光学和探空火箭等多种手段，连续监测地球表面 20 km 以上到几百千米的中高层大气、电离层和磁层，以及十几个地球半径以外的行星际空间环境中的地磁场、电场、中高层大气的风场、密度、温度和成分，电离层、磁层和行星际空间中的有关参数，联合运作的大型空间环境地基监测系统。子午工程三大系统之一的空间环境监测系统包括光学监测分系统、无线电监测分系统、地磁（电）监测分系统和探空火箭综合监测分系统。其中光学监测分系统的光学监测设备能够与国际上先进的同类设备相媲美，除了直接引进国外技术领先的仪器之外，部分设备是在引进部分关键部件的情况下自主开发和集成的，观测能力达到国际先进水平。通过这些光学监测设备的观测运行，子午工程将提供密度、风场等一系列参量的观测数据，从而为研究我国上空的中高层大气的物理过程提供良好的地基观测数据资料。

子午工程空间环境监测系统

的光学分系统包含 4 类共 8 台监测设备：(a) 4 台激光雷达，分别安装在北京、武汉、合肥和海南；

(b) 1 台光学干涉仪，安装在兴隆站；(c) 2 台全天空辉成像仪，分别安装在兴隆站和海南富克站；

(d) 1 台极光光谱仪，安装在南极中山站。

### 1 激光雷达

激光雷达是一种光学遥感技术，以主动的方式，利用光束——通常是脉冲激光，来测量目标物的距离或者利用激光照射得到目标物的一些参数特性。其工作原理与无线电雷达相同，用于大气观测的激光雷达向大气发射激光光束，通过接收大气散射回波，可以实现 110 km 以下高层大气物理参数的测量，通过分析激光回波特性获取反射体的信息，包括位置、温度、速度、密度和成分等物理参量。图 4 模拟了利用激光雷达测距的过程。旋转反射镜将光束扫描，旋转方向如箭头所示，扫描光束遇到障碍物后，反射回波到探测器，确定回波时间即能得到目标物与光源之间的距离。探测器可以安装在反射镜附近，

图中没有画出。从图 4 可见，利用回波信号得到的障碍物的位置分布与目标物的实际位置分布非常相似。虽然前面提到的激光雷达是一种探测技术，但目前更多的用激光雷达来命名一种设备。按照探测的原理不同，激光雷达可以分为米散射、瑞利散射、拉曼散射、布里渊散射、荧光、多普勒等激光雷达，主要由激光发射单元，光学接收和后继光学单元，数据采集单元及自动控制单元四部分组成，其中激光发射单元包括 Nd:YAG 激光器，染料激光器，对光装置和 Na 泡波长标定系统等，可以采用脉冲或连续波两种工作方式；光学接收和后继光学单元包括望远镜、分色/光镜、滤光片、衰减片、导向镜；数据采集单元包括光电倍增管、放大器、A/D 采集卡、光子计数卡；自动控制单元主要是时间控制器以及工控机。

北京激光雷达获得近地面至 110 km 的大气后向散射回波信号，通过反演可得到地球空间环境的中高层大气的密度、温度、钠层密度等大气参数。其中低空米散射探测范围从近地面到 30 km；高空瑞利

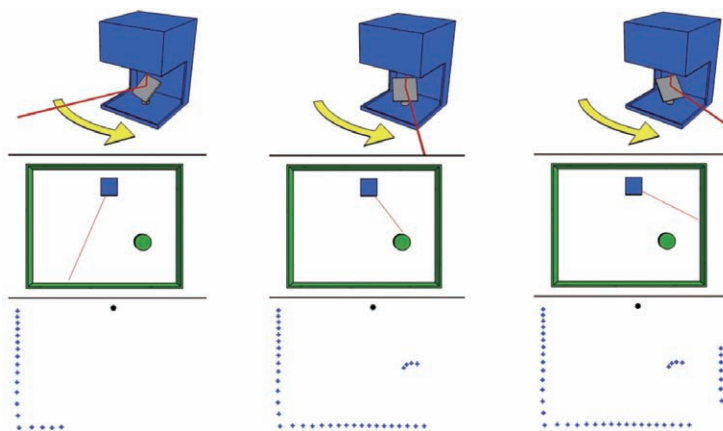


图4 激光雷达测距过程示意图 (图片来自 <http://en.wikipedia.org/wiki/File:LIDAR-scanned-SICK-LMS-animation.gif>)

散射探测范围 30 ~ 80 km; 高空钠层荧光探测范围 80 ~ 110 km。北京激光雷达安装在子午工程延庆台观测站 (39.8°N, 116.5°E), 夜景如图 5。图 6 是北京激光雷达观测到的钠层密度时空分布图, 从图中可以看出, 世界时 12 点到 22 点的观测期间内, 在观测点上空 75 km 到 105 km 的高度范围内钠密度的分布情况, 很明显看出钠层高度范围随时间的演变情况。

海南激光雷达用于观测海南地区上空中高层的大气气溶胶、大气温度、Na 层密度等特征。探测高度从近地面至 110 km, 观测所获得的数据资料, 包括可获得高质量的大气气溶胶、大气温度、垂直高度从 70 km 到 110 km 的 Na 层密度垂直廓线等。海南激光雷达安装在海口市海南师范大学校园内 (18.2°N, 109.5°E)。

武汉激光雷达观测站由多台激光雷达系统组成, 其中钠荧光 / 瑞利激光雷达能获取武汉上空 30 ~ 65 km 高度范围大气密度与温度以及 80 ~ 110 km 高度范围的钠原子密度。另外, 与武汉大学的其他已有及在建的无线电雷达一起, 能对武汉上空的大气进行多激光雷达、多无线电雷达组成的联合监测。钠荧光 / 瑞利激光雷达的观测, 能够获得武汉地区中高层大气的若干大气参量, 包括 30 ~ 65 km 大气密度和温度, 80 ~ 110 km 的钠原子密度。武汉大学激光雷达观测站, 位于武汉市珞珈山 (30.5°N, 114.4°E)。

合肥激光雷达观测站主要设备为瑞利 - 米 / 钠荧光激光雷达,

该雷达能获取合肥近地面至 30 km 高度气溶胶、30 ~ 65 km 高度范围大气密度与温度以及 80 ~ 110 km 高度范围的钠原子密度。另外对瑞利 - 米 / 钠荧光激光雷达进行测风功能拓展。合肥激光雷达观测台站位于合肥市中国科学技术大学校区 (31.9°N, 117.2°E)。

## 2 光学干涉仪

光学干涉仪利用法布里 - 珀罗 (Fabry-Perot) 标准具作为核心部件, 标准具中的固定间隔的两个反射面对入射光束的反射和透射能量进行分配, 入射光束通过 Fabry-Perot 标准具后形成等倾干涉图像, 如图 7 所示。干涉条纹的分布与入射光的波长有关, 在标准具温度和压强非常稳定的环境下, 入射光的波长或者频率的变化会引起干涉条纹圆环宽度和半径的变化, 因此, 分析条纹的变化就能够推知入射光的变化, 并由此反演出光源的相应的物理变化和化学变化。

用于中高层大气光学观测的

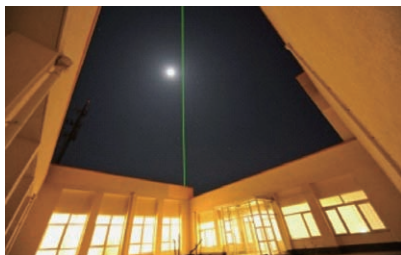


图 5 子午工程延庆激光雷达夜景

光学干涉仪, 能够测量大气气辉辐射的多普勒频移和展宽, 同时采用新的反演方法处理观测数据, 得到中高层大气的风场和温度数据。北京光学干涉仪安装在子午工程兴隆观测站 (40.5°N, 117.5°E)。图 8 是北京光学干涉仪观测得到的不同波段下的干涉条纹。进一步分析干涉条纹的强度分布的特性, 能够获得气辉高度区间的大气的风场和温度数据。

利用光学干涉仪在我国首次进行了中高层大气风场的地基观测, 图 9 是 2010 年 4 月 5 日 ~ 5 月 12 日期间观测的平均风场与同时段经验模式 HWM93 结果的比较, 结果表明, 87 km 和 98 km 高度的风场半日潮与 HWM93 预报的半日潮相当一致, 两者存在较好的一致性。

## 3 全天空气辉成像仪

全天空气辉成像仪用于观测中高层大气区域的气辉辐射强度, 直接记录的观测数据就是图像。这一过程就像是用照相机去拍摄一幅

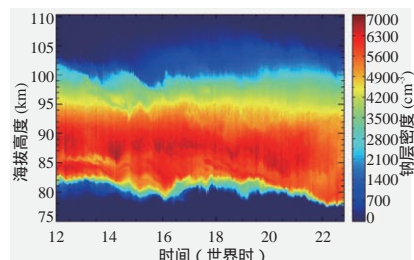


图 6 钠层密度时空分布图

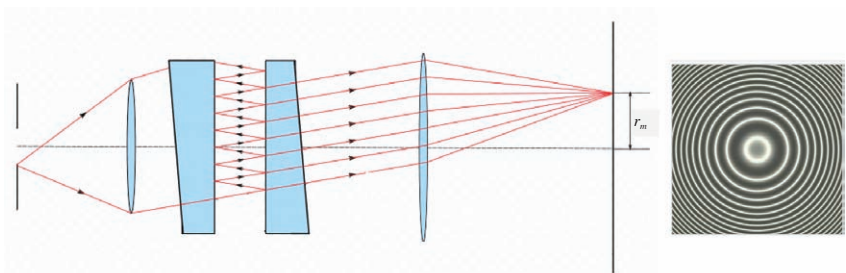


图 7 光束通过法布里 - 珀罗标准具后形成的干涉条纹

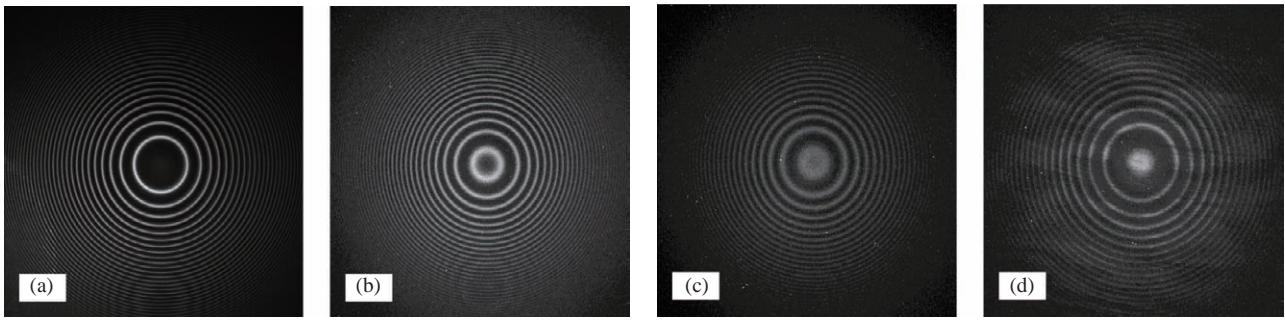


图 8 FPI 在 2010 年 5 月 7 日记录的不同波长的干涉条纹  
(a) 632.8 nm(定标) (b) 557.7 nm (c) 630.0 nm (d) 892.0 nm

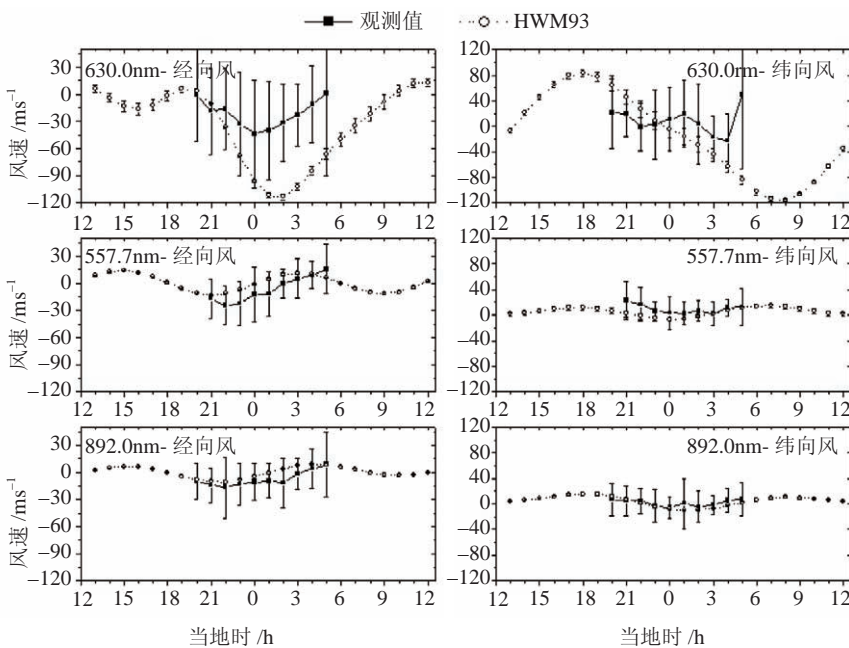


图 9 2010 年 4 月 5 日 ~ 5 月 12 日期间观测的平均风场与同时段模式 HWM93 结果的比较

一幅的照片。经过筛选和分析观测数据，能够提取出热层大气、中层顶区和上中层大气的波动特征数据。北京全天空气辉成像仪安装在子午工程兴隆观测站 (40.5°N, 117.5°E)。海南全天空气辉成像仪安装在子午工程海南富克观测站 (19.5°N, 109.1°E)。

全天空气辉成像仪由以下子系统构成：光学接收系统、滤光片选择系统、制冷型 CCD 探测器、信息放大处理系统和电机驱动电子模块。光学系统的前置接收镜采用

鱼眼透镜，视场角为 180 度，滤光片选择系统采用 8 位置滤波片轮，成像系统包括自动聚焦成像系统，电热制冷型 CCD 和对应的温控系统。设备在软件控制下可以进行自动观测和远程控制观测。

利用 2009 年 12 月至 2010 年 11 月兴隆全天空气辉成像仪的 OH 气辉辐射图像数据，通过研究短期的重力波特性，第一次报告了中国北方地区上空重力波的季节变化特性。结果表明，重力波的发生频率夏季和冬季要高于春季和秋季。

观测到的重力波水平波长主要集中在 10 ~ 35 km，观测周期主要集中在 4 ~ 14 min，水平观测相速度主要分布在 30 ~ 60 m/s。图 10 显示了一个波动事件的原始数据和处理结果。

#### 4 极光光谱仪

光谱仪是一种能够将成分复杂的光分解为光谱线的科学仪器。极光光谱仪是一种用于观测极光和气辉辐射的光谱观测设备，由全天空前置光学系统、Grism 色散单元、聚焦透镜、CCD 相机和采样计算机等部分组成。系统由全天空鱼眼镜头、狭缝和中间透镜组成，鱼眼镜头的采用可以实现子午线上 180° 视野范围的光学成像。狭缝位于鱼眼镜头的焦平面上，光路经全天空前置光学系统后入射到 Grism 色散单元。Grism 和其后的棱镜组成的色散单元将不同光谱的入射光线色散开来，棱镜的采用也是为减小前置光学系统和后面的聚焦光学系统的角度差。Prism 面向前置光学系统的一端开有等距离间隔的凹槽，选择适当的性能参数可以将所需观测的光谱范围色散到 CCD 相机的有效成像区域上。极光光谱仪安装在我国南极中山站空间环境实验室 (69.4°S,

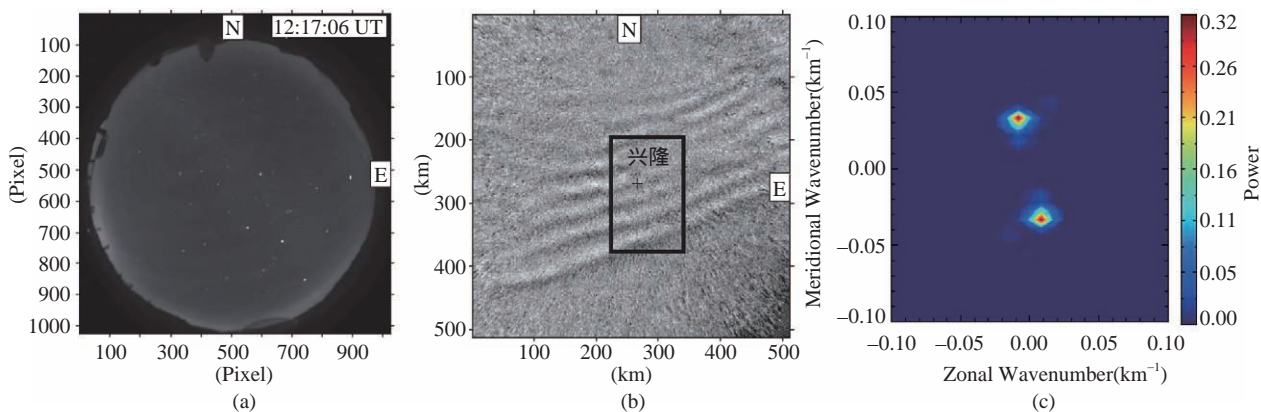


图 10 (a) 全天空气辉成像仪探测的原始图 (b) 图像处理得到的波动事件图 (c) 波动的功率谱图

76.4°E)，位于地球极隙区纬度，在极光观测方面地理位置优越。

极光光谱仪通过测量同一条子午线上的极光和气辉辐射光谱强度，可以研究极光和磁层物理、极风的逃逸过程、质子极光观测中的电子极光干扰等科学问题。极光和气辉辐射的光谱分辨率为 1.5 ~ 2 nm，视场角为 180°。

### 三、结语

光学探测是空间环境的重要

探测手段之一。子午工程光学监测设备分布在东经 120° 子午线上，监测高纬、中纬和低纬和南极上空中高层大气的温度、风场、密度和光谱特性等物理参量，利用我国自主的最新的地基观测数据得到了一些创新性的观测结果和研究成果，例如，目前的研究发现一些波动规律不能全部利用现有的国际参考经验风场模式来解释，这很可能是由于大气动力学的地域特性造成，为下一步的研究工作提出了思路，对我国上空大气动力学建模提供观测

基础。通过分析不断积累的观测数据获取的科学结论，将成为修正和改进中高层大气模式提供直接的理论依据，从而提高我国的空间物理研究水平奠定较好的基础。

(北京中国科学院国家科学中心 100190)

### 作者简介

袁骅，博士，中国科学院国家空间科学中心高级工程师，子午工程主管设计师，一直从事中高层大气相关的探测和研究。



### 科苑快讯

#### 给正在进食的黑洞称重

去年，天文学家在一个非常遥远的星系中心观测到一颗恒星被一个巨大黑洞撕碎时发出的遇难光焰。光焰因发现它的“雨燕”（Swift）卫星而被命名为雨燕 J1644+57，雨燕卫星给出了其位于天龙座的天体坐标。现在，正像研究者在《科学》网站上报道的那样，死去恒星的光焰仍然盘旋在黑洞周围，并放射出 X 射线，从而暴露了凶手的质量。

其他两个卫星也发现 X 射线每 200 秒就强烈波动一次。假设这是盘旋热气的轨道周期，天文学家推断这个巨型黑洞将比太阳重 45 万 ~ 500 万倍，与此前的估计一致。这个 390 万光年之外遥远星系中心



的黑洞完全可以媲美银河系中心、质量为 400 万个太阳的巨型黑洞。

(高凌云编译自 2012 年 8 月 2 日 www.sciencemag.org)