

# 太阳/大气紫外光谱辐射测量

李福田\* 唐玉国

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

吕达仁

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要** 研制成太阳/大气紫外光谱辐射计, 工作波段 120nm 至 500nm, 光谱分辨率 0.08nm。它由标准光源, 积分球, 双光栅单色仪, 探测器及电子学—计算机系统组成。用这台仪器进行了长春地区不同大气条件及大气质量太阳/大气紫外(260~500)nm 波段光谱辐射测量。测量结果表明该仪器光谱响应稳定性好于 1%/年, 太阳/大气紫外波段光谱辐照度测量值(绝对值)不确定度好于 3~5%。

**关键词:** 光谱辐射测量; 光谱响应; 光谱辐照度

## 1 前 言

波长短于 320nm 的太阳紫外辐射, 通过地球大气层后, 绝大部分被臭氧吸收, 只有 290nm ~ 320nm 波段少量的紫外辐射能到达地面, 这部分紫外辐射被称之为 UV-B 辐射。UV-B 辐射只占全部太阳辐射的 1% 左右, 由于它具有强烈的光化效应, 对地球生物系统有重大作用。大气污染导致臭氧层的破坏及 UV-B 辐射的增强, 进而对地球生命活动造成破坏性影响。因此, 随大气污染的日益加剧, 对太阳/大气紫外光谱辐照度及其变化规律的研究显得十分重要。

近二十余年, 国外对太阳紫外光谱辐射观测研究十分活跃, 七十年代中期, 美国 Goddard 空间飞行中心研制成功太阳背向散射紫外仪器 SBUV 和 SBUV/2, 它们分别搭载 Nimbus7 和 NOAA-9 卫星, 完成了为期 10 年的太阳紫外光谱辐射及地球大气背向紫外散射研究, 取得引人注目的研究成果。在此基础上, 美国海军研究实验室又研制成功太阳紫外光谱辐照监视器 (SUSIM), 并于 1991 年末搭载 UARS 卫星开始了长周期、高精度太阳紫外光谱观测研究。与此同时, 国外太阳紫外光谱辐射地面观测研究也加快了步伐。在太阳昼光光谱分布地面观测研究的基础上, 先后开展了太阳紫外光谱辐照度及其变化规律的地面观测研究。挪威 Troms 大学极光观测台 Henriksen 利用双光栅紫外光谱辐射计研究了极地太阳紫外光谱辐射及其变化, 测得极地大气臭氧密度。日本高层气象台伊藤朋之等人<sup>[1]</sup>利用 Brewer 分光光度计对不同

大气条件和大气质量下 (290~325) nm 太阳紫外光谱辐照度及其变化规律进行了长周期研究, 取得十分有价值的研究成果。

本文描述我们研制的太阳紫外光谱辐射计的设计、结构和性能, 讨论高精度紫外光谱辐射计的定标方法和误差及标准光源的建立与比对, 给出 1992 年不同大气条件和大气质量下长春地区太阳紫外光谱辐照度测试结果实例。

## 2 太阳/大气紫外光谱辐射计

我们研制的太阳紫外光谱辐射计的配置示意图, 如图 1 所示。紫外—真空紫外光谱辐射传递标准光源为  $MgF_2$  窗口氙灯, 工作波段 120nm~350nm, 工作电压约为 70V, 工作电流为 300mA, 由高精度直流稳流电源供电, 电流稳定度好于 0.02%/h。该氙灯光谱辐射稳定性好于 0.1%/h, 老化率小于 0.01%/h。250nm~500nm 波段光谱辐照度传递标准光源为石英卤钨灯, 工作电压约 100V, 工作电流为 8.5 A, 以高精度直流稳流电源供电, 电流稳定性好于 0.02%/h。

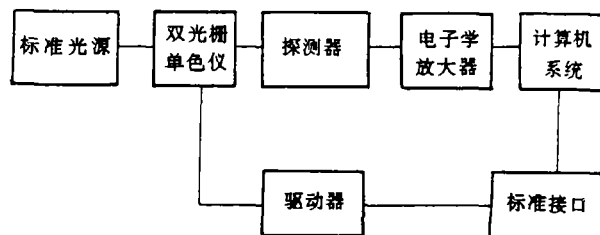


图 1 太阳/大气紫外光谱辐射计框图

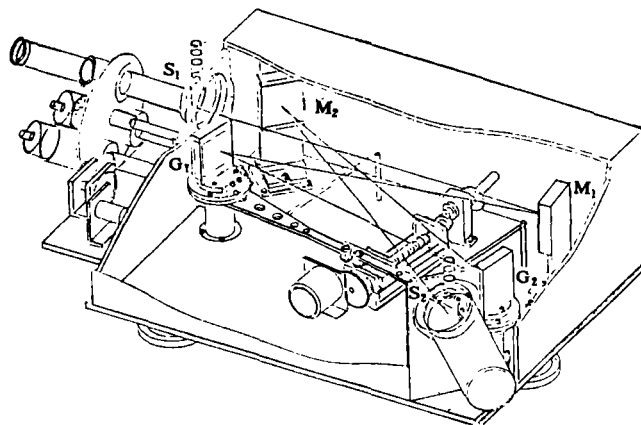


图 2 紫外—真空紫外双光栅单色仪

太阳紫外光谱辐射计采用无中间狭缝的双光栅单色仪, 如图 2 所示。其中  $S_1$  为入射狭缝,  $S_2$  为出射狭缝,  $M_1$  和  $M_2$  为两块相同的平面定向光栅, 闪耀波长为 150nm。光栅表面镀  $MgF_2$ , 刻线密度 1200 线/mm。在 150nm 处光栅效率达 46%。单色仪准光镜和聚光镜焦距同为 500mm。工作波段 (120~500) nm, 线色散 0.8nm/mm, 光谱分辨率 0.05nm, 波长精度 0.05nm。进行太阳/大气紫外辐射测量时入射和出射狭缝宽为 0.75mm, 相应光谱带宽为 0.6nm。在电子学

— 计算机系统控制下，步进电机驱动精密丝杠，同步旋转两块光栅实现波长扫描。在 (120~200) nm 真空紫外波段工作时，单色仪内充氩气，气压维持在 1.1 个大气压。

探测器为 R928 光电倍增管及 EMR541G 太阳盲型光电倍增管。R928 应用于 200nm 以上波段，EMR541G 应用于 (120~200) nm 波段。EMR541G 在 121.6nm 处，增益为  $10^6$  时，与暗电流等效的光流仅为 33 光子/秒。探测器输出经高稳定性电流放大器放大后，由 12 位 A/D 变换器数字化，送入 IBM 计算机。波长扫描，数据采集和处理，最终结果的存贮，打印和绘图全在计算机控制下自动完成。系统控制软件兼有谱图二次处理功能。

太阳或大气辐射经积分球进入单色仪。积分球内径 100mm，入射光通光口直径 30mm，出射光通光口直径 11mm，入射光与出射光通光口间夹角  $90^\circ$ 。测量大气辐射时，用一直径 40mm 遮光球挡住直接太阳辐射，遮挡角为  $\pm 0.5^\circ$ ，如图 3 所示。

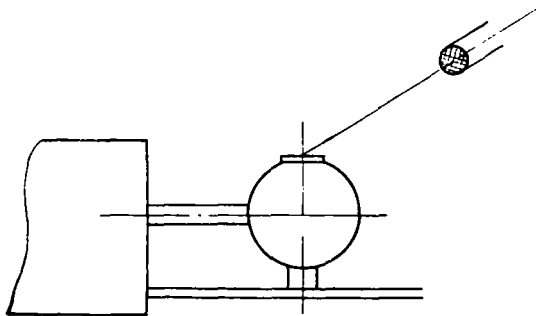


图 3 积分球引光系统

### 3 紫外光谱辐射标准及比对

在 250nm~400nm 紫外光谱波段我们有如下四种可以利用的光谱辐射标准光源：

- I. 10 kW 大功率壁稳氩弧紫外—真空紫外光谱辐亮度标准光源；
- II. 英国国家物理实验室 (NPL) 以同步辐射为标准标定的紫外—真空紫外光谱辐亮度传递标准光源— $MgF_2$  窗口氙灯；
- III. 合肥 800MeV 同步辐射；
- IV. 中国计量院紫外—可见 (250nm~800nm) 光谱辐照度标准灯—1000W 石英卤钨灯。

为检验这四种标准在 (250~400) nm 间的一致性我们进行了如下三项比对实验。

#### 1. 光源 I 与光源 II 的比对

我们研制的光源 I 最大工作电流 70A，相应工作电压约 130V，由大功率高精度直流稳流电源供电，电流稳定度好于  $5 \times 10^{-5} A/h$ 。工作气压  $1 \sim 2 \times 10^5 Pa$ 。曾用 Richter 方法、斯塔克加宽法，谱线相对强度及绝对强度法进行氩弧等离子体光谱学诊断，得到了不同工作电流时氩弧等离子体温度和电子密度。在处于局部热力学平衡条件 (LTE) 的氩弧等离子体中注入微量杂质气体，产生黑体谱线，这些黑体谱线可用作紫外—真空紫外光谱辐射标准。

在 (105~350) nm 间除少数 Ar II 线与杂质谱线外氩弧光谱辐射是连续的，可根据理论准确计算出。因此这一连续辐射也可作为紫外—真空紫外光谱辐射标准。E Schulz—Gulde<sup>[2]</sup>给出仅考虑氩原子自由—束缚，自由—自由跃迁时 (氩等离子的贡献较小，可以忽略) 光性薄的

氩离子体连续光谱辐射亮度，表示为：

$$I_c(\lambda \cdot T) = (C_u n e^2 / \lambda^2 \sqrt{T}) l \xi(\lambda \cdot T) \quad (1)$$

其中  $\xi(\lambda \cdot T) = [1 - \exp(-C_2/\lambda T)](g_+ / V_+) \xi f_0(\lambda T) + G \exp(-C_2/\lambda T)$ ,

$$C_u = (2\pi/3km^3)^{1/2} (e^6/24c^2\pi^3\epsilon_0^3),$$

$g_+$  = 离子的基态统计权重

$V_+$  = 离子的配分函数

$G$  = 自由—自由跃迁 Gaunt 系数

$Gf_0(\lambda \cdot T)$  = 自由—束缚系数

利用 *Hofsaess*<sup>[3]</sup> 给出的  $\xi(\lambda \cdot T)$  值和测得的不同工作电流下氩弧等离子体温度和电子密度由 (1) 式可求出 (165~350) nm 间氩弧连续光谱辐射亮度。图 4 给出氩弧工作电流为 40A，等离子体温度为 12650K 时氩弧 (165~350) nm 间连续光谱相对分布曲线。

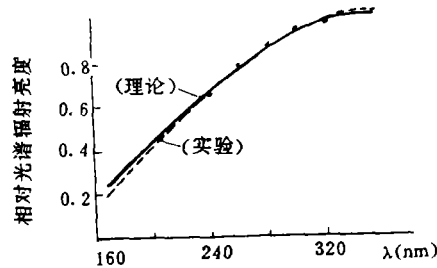


图 4 光源 I 与光源 II 的比对结果

在 McPherson 2253M5 三米真空紫外光谱仪上，以光源 II 作标准，测量了光源 I 在 (165~350) nm 间的光谱辐射分布，和理论计算相比较，一致性在 10% 以内，如图 4 所示。表明这两种光谱辐射亮度标准光源间有较好的一致性。

### 2. 光源 III 与光源 IV 的比对。

同步辐射的光谱分布和角分布可根据 *Schwinger* 理论准确计算。作圆周运动的单能电子在波长  $\lambda$  在与轨道垂直平面内  $\psi$  角方向上每秒辐射能量  $p$  可由下式给出<sup>[4]</sup>：

$$\frac{\partial^2 p(E, \lambda, \psi, R)}{\partial \psi \partial \lambda} = 8\pi e^2 c R / 3\lambda^4 (r^{-2} + \psi^2)^2 * [K_{2/3}^2(\xi) + K_{1/3}^2(\xi) \psi^2 / (r^{-2} + \psi^2)] \quad (2)$$

其中  $E$  = 电子能量

$R$  = 电子轨道半径

$\xi = 2\pi R / 3 (r^{-2} + \psi^2)^{3/2}$

$r = E / mc^2$

$K_{1/3}(\xi)$  和  $K_{2/3}(\xi)$  是二类修正贝塞尔函数。方括号中的两项分别为偏振方向与轨道平面垂直和平行的分量，合肥 800MeV 同步辐射装置偏转磁铁曲率半径为 22.22m，电子能量 800MeV，磁场强度 12kG，临界波长为 2.4nm。将 (2) 式积分可得到同步辐射光谱分布和角

分布。图 5 给出计算得的合肥 800MeV 同步辐射相对光谱分布。

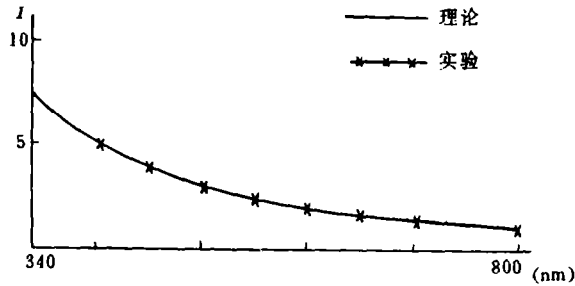


图 5 合肥 800MeV 同步辐射与中国计量院  
光谱辐照度标准灯的比对结果

1992 年 6 月以光源 IV 为标准, 测量了光源 III 的相对光谱分布。1000W 石英卤钨灯工作电流 8.5A, 电压约 100V, 由高精度直流稳流电源供电。测量装置由 Czerny-Turner 平面光栅单色仪, 漫反射板前置光学系统, 探测器、电子学放大器及微机控制系统组成。单色仪分辨率好于 0.1nm, 所用光谱带宽为 0.4nm。测量波段为 (340~800) nm。实验表明: 在 (340~800) nm 间理论与实验结果一致性好于 1%, 即在这个波段光源 4 与光源 3 之间的一致性达 1%。180nm~340nm 紫外波段比对在筹备中。

3. 光源 IV 与光源 II 在 (250~350) nm 波段的比对。进行 (250~350) nm 波段光谱辐亮度与光谱辐照度标准比对的实验装置如图 6 所示。

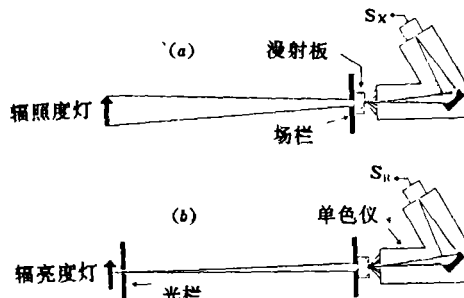


图 6 光谱辐亮度标准光源与光谱辐照度标准光源比对实验装置

设光谱辐照度标准灯光谱分布为  $E_x(\lambda)$ , 辐射计响应为  $S_x(\lambda)$ , 光谱辐亮度标准灯光谱分布为  $L_R(\lambda)$ , 相应光谱辐射计响应为  $S_R(\lambda)$ , 则

$$E_x(x) = r \frac{S_x(\lambda)}{S_R(\lambda)} L_R(\lambda) \quad (3)$$

其中  $r$  是与光谱辐亮度标准光源方面的光栏尺寸, 光谱辐射计方面的场栏尺寸及两光栏距离有关的几何参量<sup>[5]</sup>。在适当波长  $\lambda_0$  处利用已知光谱辐照度的光谱辐照度标准灯再次定标可求出  $r$ 。

$$r = \frac{E_I(\lambda_0)}{L_R(\lambda_0)} \frac{S_R(\lambda_0)}{S_X(\lambda_0)} \frac{S'_I(\lambda_0)}{S'_I(\lambda_0)} \quad (4)$$

其中  $S_X'(\lambda_0)$  和  $S_I'(\lambda_0)$  分别为光谱辐射计对待校准的光谱辐照度标准光源及已知光谱辐照

度标准光源的响应。 $E_0(\lambda_0)$  为标准光源的光谱辐照度。

利用上述原理我们以光源 II 为基准求得 (250~350) nm 间光源 IV 光谱辐照度相对分布值和中国计量院给定值相比, 280nm~350nm 间一致性好于 1%, (250~280) nm 间差别很大。

三项比对结果表明, 280nm~800nm 光源 IV 在 1~2% 不确定度范围内 (相对值) 分别与光源 III、光源 I 及光源 II 相一致。在 (250~280) nm 间, 这三种标准差别较大的原因在探讨中。以下给出的 (250~500) nm 太阳/大气紫外光谱辐照度值暂以中国计量研究院标准灯数据为准。

#### 4 太阳/大气紫外光谱辐射测量

图 7 给出 285nm~325nm 及 255nm~400nm 太阳和大气紫外光谱曲线例。太阳/大气紫外光谱辐射计由光谱辐照度标准灯定标。每使用 8 小时后标定一次。太阳/大气紫外光谱辐射计光谱响应度年变化率仅为 1%。

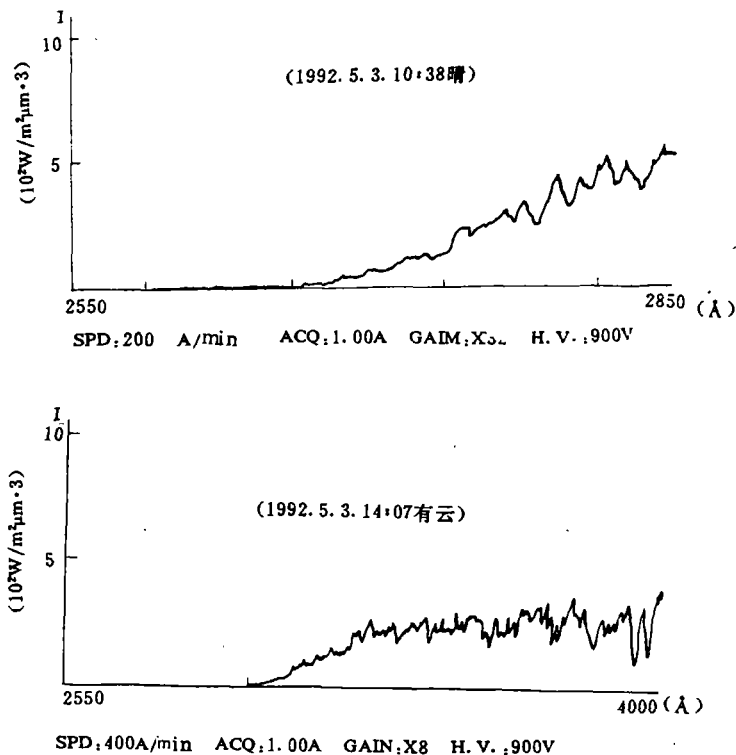


图 7 大气紫外光谱辐照度分布曲线

测量从 1992 年 4 月份开始, 持续了三个季度。得到了长春地区不同大气条件, 不同大气质量太阳/大气紫外光谱辐照度的变化。

我们对影响太阳/大气紫外光谱辐射相对和绝对测试精度的诸因素进行了分析, 结论如下:

1. 用光谱灯检查了光谱辐射计波长重复性和精度, 表明光谱辐射计波长重复性优于

0.02nm, 波长精度优于 0.05nm;

2. 用染料激光检查了光谱辐射计紫外波段杂光, 表明杂光小于  $10^{-7}$ ;

3. 用自行研制的微机控制的探测器线性仪检测了光电倍增管线性, 表明探测器线性度好于 0.02%;

4. 用高精度电压源检测了直流放大器非线性, 表明放大器线性度优于 0.1%;

5. 中国计量院提供的光谱辐照度标准灯相对光谱辐照度标称不确定度 280nm ~ 800nm 间好于 1~2%, 绝对光谱辐照度不确定度好于 3~5%;

6. 用 *McPherson 2253M<sub>5</sub>* 紫外—真空紫外三米凹面光栅谱仪和太阳/大气紫外光谱辐射计测量同一强光源并以同一光谱辐照度标准灯定标, 测量结果一致性优于  $\pm 0.5\%$ ;

7. 对影响定标精度的诸因素如: 标准灯位置和距离, 遮光筒尺寸和形状等进行了分析和控制, 太阳/大气紫外光谱响应度年变化小于 1%。

综合上述误差、太阳/大气紫外光谱辐照度测试结果, 相对值不确定度为 1~2%, 绝对值不确定度为 3~5%, 主要由标准灯误差决定。

### 参 考 文 献

- [1] Tomyuki ITO et al., *Journal of Meteorological Research*, 1991, Vol. 43, No. 5
- [2] E. Schulz-Gulde, *Z. Phys.*, 1970, 230, 449
- [3] D. Hofsacs, *J. Quant. Spectrosc. Radia. Transfer*, 1978, Vol. 19, No. 3, 339
- [4] J. Schwinger, *Phys. Rev.*, 1949, Vol. 75, 1912
- [5] W. R. Ott et al., *Optics letters*, 1980, Vol. 5, No. 6, 225

## Solar/Atmosphere UV Spectral Radiation Measurement

Li Futian, Tang Yuguo

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)*

Lu Daren

*(The Institute of Atmosphere Physics Chinese Academy of Sciences, Beijing 10029)*

### Abstract

A high performance solar/atmosphere UV spectroradiometer with spectral band 120nm — 500nm and spectral resolution 0.08 nm has been developed in this Institute. It consists of standard sources, integrated sphere, double grating monochromator, detectors, and electronics — micro-computer system. The solar UV atmosphere UV spectral radiation at different atmosphere condition and mass were measured during 1992 in Changchun. The measurement results show that the stability of the spectroradiometer responsivity is better than 1% /year, and the uncertainty for the solar/atmosphere UV spectral irradiance measurement is less than 3—5%。

Key words: Spectroradiometer, Spectral responsivity, Spectral irradiance