

激光雷达观测的武汉上空钠原子层形态特性

艾 勇 张训械* 鲁 述 龚顺生*

(武汉大学电信学院无线电物理系 武汉 430072 * 中国科学院武汉物理与数学研究所 武汉 430071)

提要 对 1996 年 3 月 1 日至 3 日钠荧光散射雷达获得的观测数据进行了分析与处理,得到了钠原子密度随高度的剖面分布和随时间的变化关系。分析结果指出,武汉上空中高层大气钠原子剖面具有强烈的时空变化特点。钠层主要分布在 80~ 105 km 高度,钠层最大密度高度位于 92~ 95 km 范围,在不出现流星雨时,其值在 $1\sim 3\times 10^9$ 原子每立方米之间变化。

关键词 激光雷达, 钠原子层, 重力波

激光雷达探测技术对具有不同谱特性的大气成份的探测十分有利。第一例激光雷达观测高层大气中的微量金属元素(例如钠)的实验是由 Bowman 等^[1]于 1969 年完成的。后来又有一些小组进行了更多的探测研究,发现钠层的空间尺度和结构是时变的,即发现了钠层具有季节和日变化的特征。流星的陨落可引起钠原子数的短期急剧增加,潮汐和重力波的动力学过程对钠层结构也产生影响。

通过地面或探空气球和探空火箭载有的仪器对气辉现象的观测也可以了解到中层顶附近钠原子的一些情况。1979 年以前对钠层的观测主要集中于钠层总含量的长期演化情况和钠层宽度及峰值分布情况。随着激光技术和电子接收系统的迅速完善,1969 年提出的共振散射光雷达技术直到在 80 年代才得到发展和广泛应用,人们开展了钠层短期演化观测与研究^[2~4]。Namboothiri 等对潮汐和重力波对钠层垂直分布的影响作了大量研究^[5]。另外,钠原子还可以作为某些大气参数(例如温度、湍流系数和风场等)的示踪物^[6],因此钠层的观测研究具有很重要的意义。

1 钠荧光共振散射雷达

钠荧光共振散射雷达的基本结构与瑞利散射雷达的结构类似。由于中层顶大气分子密度很低,瑞利散射信号十分微弱。该区域内的钠金属原子层,由于共振荧光截面很大,比瑞利散射截面高数个量级,因此利用钠荧光雷达研究钠层以及将它作为示踪物研究大气和电离层参量提供了一种有效的观测手段。

钠共振荧光雷达的原理框图示于图 1。YAG 激光器发出的脉冲激光经染料 Kiton red 调谐后通过发射棱镜射向空中。钠荧光泡、PMT 与示波器一起构成对发射激光的波长监视。回波信号经接收望远镜收集后通过窄带滤波以提高信噪比,然后经光电倍增管和前置放大后送

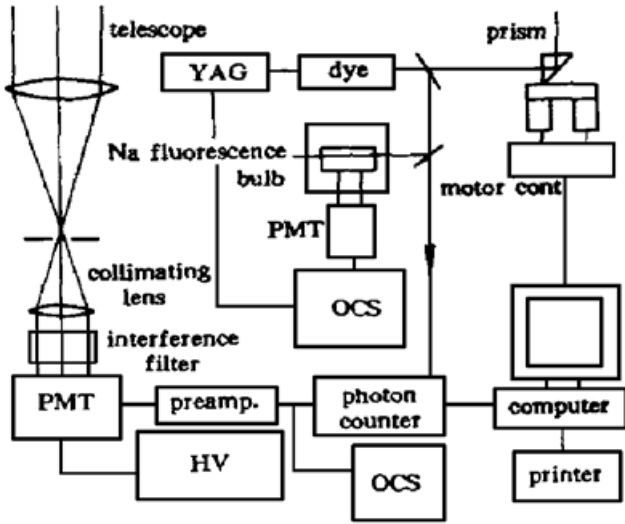


图 1 钠荧光共振散射激光雷达原理图

Fig. 1 Block diagram of the Na resonance fluorescence lidar system

入光子计数器,最后存入计算机中以便分析处理。

该设备系统具有如下技术特点:

1) 接收部分采用自制 40 cm 非球面透射式接收望远镜,具有很高光学质量(最小可控视场 < 1 mrad)和比同尺寸反射式望远镜高约 20% 收光率的效果;

2) 雷达整机按“准双站”方式工作;

3) 雷达具有能在大于 1.26 μs 的采样门中实现单光子计数(即光检测能力 < 10⁵ photons/s)和采样中本底噪声小于每炮一光子的水平。

通过比较^[7]证明该雷达各技术性能指标达到了国外 90 年代初同类设备水平。雷达主要性能指标,包括工作波长 λ, 脉冲能量 E, 重复频率 R, 脉冲宽度 ΔP, 光束发散角 θ, 激光线宽 Δf, 接收口径

Φ, 最小视场 ω, 高度分辨率 Δz 等见表 1。雷达探测方式为光子计数。

表 1 钠荧光共振散射雷达性能指标

Table 1 The specifications of the Na resonance fluorescence lidar system

λ/nm	E/mJ	R/Hz	Δp/ns	θ/mrad	Δf/GHz	Φ/cm	ω/mrad	Δz/m
589	50	20	8	1	3	40	2	192

2 观测数据处理

观测实验于 1996 年 3 月 1 日至 3 日的 3 天晚上在武汉地区(30°32'N, 114°22'E)进行,这 3 天都是晴好天气。每 4800 个发射激光脉冲的回波信号组成一组数据,即每组光子信号的积分时间为 4 min,每天实验连续进行 144 min,共采集 36 组数据,3 天共得到 108 组数据。由这些数据和根据激光雷达方程可求出钠原子密度分布等有关参数。

由于大气透射系数随天气而变,并且不容易测量,通常是将钠原子散射光子对无气溶胶分布高度的瑞利散射光子数作归一化而求出绝对钠原子数密度。一般 30km 以上已不存在气溶胶分布。将归一化高度选为 30km,并选用了 1986 年中层大气参考模式的 3 月份北纬 30°的大气温度和压力数据进行计算。钠原子数密度可由下式求出^[8]

$$\rho_s(z) = \frac{z^2 \sigma_R \rho_a(z_R) [N_s(z) - N_B R_L \Delta t]}{z_R^2 \sigma_{eff} [N_R(z_R) - N_B R_L \Delta t]} \quad (1)$$

式中, $N_s(z)$ 为在高度 $(z - \Delta z/2, z + \Delta z/2)$ 范围内,包括背景噪声的探测光子数; $N_R(z_R)$ 为在高度 $(z_R - \Delta z/2, z_R + \Delta z/2)$ 范围内,包括背景噪声的瑞利散射光子数; N_B 为单个雷达分辨率高度内由单个激光脉冲所产生的背景噪声; $\rho_s(z)$ 为高度 z 处的钠密度(m^{-3}); $\rho_a(z_R)$ 为归一化高度 z_R 处的大气密度(m^{-3}); σ_{eff} 为有效钠原子后向散射截面(m^2); σ_R 为瑞利散射截面; Δz 为雷达最小分辨高度; R_L 为脉冲重复频率; Δt 为信号积分时间。

由(1)式和接收到的光子数据可计算出钠层的钠原子数密度分布情况。图 2 是 3 月 1 日晚北京时间 20 点 08 分~ 20 点 11 分 LST 接收到的光子数与高度间的关系图。110 km 以上的非

零光子数是由月光和星光引起的。由图可见 60 km 以下时光子数急剧增加, 这是因为高度越低, 空气密度越大, 瑞利散射和 Mie 散射越强的缘故。图 3 为 1996 年 3 月 1 日晚上测得的钠原子数密度随高度的分布与时间之间的三维变化曲线。曲线簇是按线性时间轴画出的, 每条曲线之间的时间间隔是 4 min。从图中可明显地看到钠原子数密度随时间变化很大, 这说明钠层由“基本钠层”和“时现钠层”组成, 这个结果与文献[2, 3]一致。图 4 给出了钠密度随时间变化的剖面结构图。激光雷达每隔 4 min 测出一条钠密度剖面结构图。图 5 是 3 月 1 日晚 19 点 56 分 ~ 20 点 0 分 LST 探测到的钠密度剖面分布, 图中波状结构是由重力波引起的, 长期观察证明未受到扰动的钠密度分布近似于高斯分布^[8]。

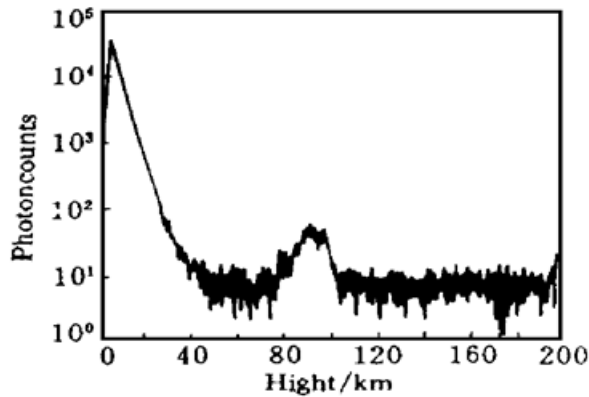


图 2 接收光子数随高度分布图

Fig. 2 Lidar photon count profile

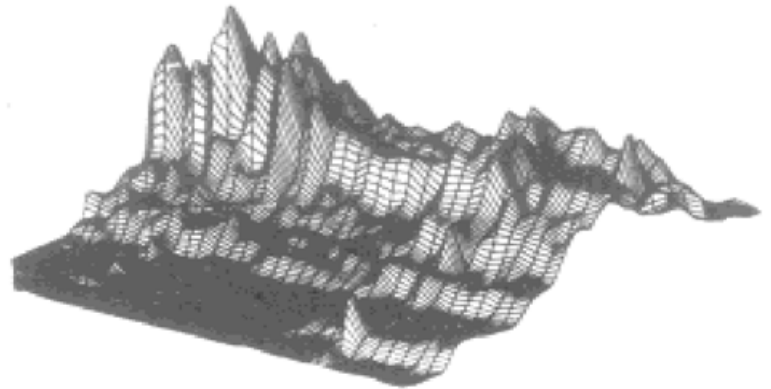


图 3 钠密度分布随时间变化图

Fig. 3 The change of the distribution of the Na atoms density

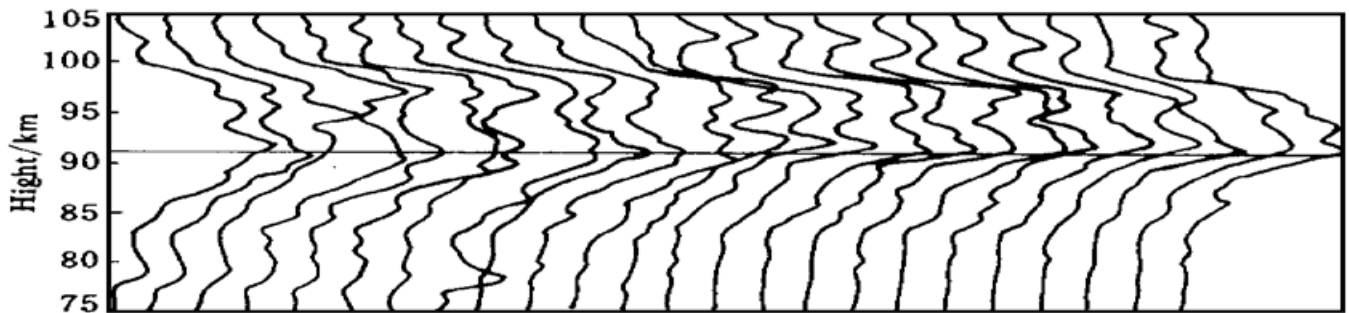


图 4 钠密度剖面分布随时间的变化关系(相邻两曲线间隔为 4 min)

Fig. 4 Na density profiles vary with time

3 结果及讨论

从图 4 可见, 由于重力波的影响, 钠密度剖面结构是时空变化的, 钠层的起伏相当大。图中画出了重力波等相面, 它是向下的, 从重力波传播理论表明能量是从下面大气层向上传播的。钠层剖面结构随时间变化是因为中层顶附近上存在各种波动, 特别是各种小尺度波叠加在上面。我们对这三天的 k_p 指数进行了分析。资料表明, 这三天地磁场是非常平静的, 因此钠层剖面扰动不可能是由于磁扰动引起的。同时从国内天文台观测证实, 这几天没有流星雨出现, 这种扰动主要是由大气波动引起的, 这说明大气动力学行为对钠剖面结构有重要影响。

从图 5 可看到, 钠层主要分布在 80~ 105 km 的范围内, 钠密度最大值约为 1.36×10^9 原子每立方米且位于 93 km 处。关于钠层钠原子的来源, 现在一般认为有两个: (1) 流星来源, 这个来源在一年中应为常数, 与夏季的低柱浓度比相当。偶发的流星雨和碱金属原子含量增加之间的相关性证明这个来源是确实的; (2) 地球来源, 这是从较高的高度上含盐粒子通过扩散混

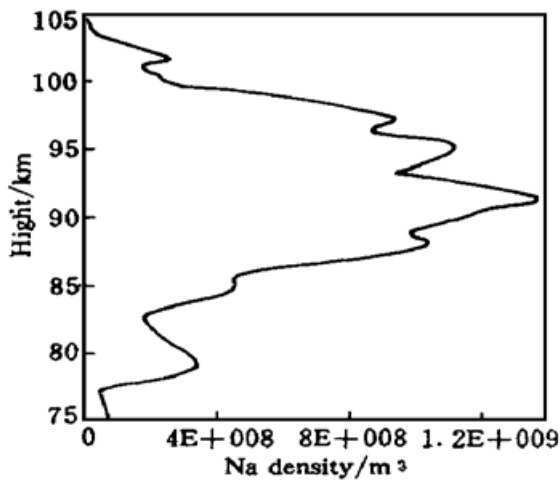


图5 钠密度剖面分布图

Fig. 5 Na density profile

合过程垂直输送过来的。不过此来源只在冬季当极地平流层环流崩溃时才起重要作用。关于时现钠层有几种解释, Von Zahn 等^[2]认为通过电子反应一些相对简单的含钠原子分子能够释放出中性钠原子(例如: $\text{NaHCO}_3 + e^- \longrightarrow \text{Na} + \text{HCO}_3^-$); Mathews 等^[3]认为当大量电子流流入钠层高度的离子层时会产生加热效应而导致钠密度突然上升; Kane 等^[4]从化学反应角度考虑了此问题,认为中性钠原子产生率正比于电子与含钠原子分子的浓度之乘积,而反比于钠原子与中性含钠原子分子的浓度之乘积。目前人们对钠层的光化学和化学过程还了解很少,深入讨论还有困难。

钠层的活动无疑也会对整个中层、热层及平流层的活动产生一定的影响,因此详细了解钠层的活动对整个大气科学的发展是十分必要的。

参 考 文 献

- 1 Bowman M. R., Gibson A. J., Sandford M. C. W.. Observation of mesospheric Na atoms by tuner laser radar. *Nature* (London), 1969, **221**: 456~ 457
- 2 Von Zahn V., Hansen T. L.. Sudden neutral sodium layers: a strong link to sporadic E layers. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1988, **50**: 93~ 104
- 3 Mathews J. D., Morton Y. T., Zhou Q.. Observations of ion layer motions during the AIDA campaign. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1993, **55**: 447~ 457
- 4 Kane T. J., Gardner C. S., Zhou Q.. Lidar, radar and airglow observations of a spectacuar sporadic Na/sporadic E layer event at Arecibo during AIDA-89. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1993, **55**: 499~ 511
- 5 Namboothiri S. P., Tsuda T., Tsutsumi M. *et al.*. Simultaneous observations of mesospheric gravity waves with the MU radar and a sodium lidar. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**: 4057~ 4063
- 6 Bills R. E., Gardner C. S.. Lidar observations of the mesopause region temperture structure at Urbana. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**: 1011~ 1021
- 7 Ai Yong, Lu Su, Zhang Xunjie. The measurements of the atmosphere at altitude of 30~ 100 km region by using lidar. *Proceedings of Asia-Pacific conference on Environmental Electromagnetics*, Xi'an, China, 1996. 160~ 163
- 8 Gardner C. S., Voelz D. G., Sechrist C. F. *et al.*. Lidar studies of the nigh time sodium layer over Urbana, Illinois, 1 seasonal and nocturnal variations. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**: 13659~ 13673

Characteristics of the Sodium Layers Observed by the Laser Radar in Wuhan

Ai Yong Zhang Xunjie* Lu Su Gong Shunsen*

(Department of Radio Physics, Wuhan University, Wuhan 430072)

* Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071)

Abstract In this paper, the mesospheric sodium data, observed from Mar. 1 to Mar. 3 1996 in Wuhan (30°32'N, 114°22'E) by a laser radar, have been analyzed, and the distribution of the Na atoms density with the altitude and the relation of the profiles of the Na atoms density with time have been got. The results point out that the distributions of the Na atoms density change vs time apparently. The sodium layers lie between 80~ 105 km, and the maximum Na density lies between 92~ 95 km, its value varies from 1×10^9 to 3×10^9 atoms/m³ when there are no meter rains.

Key words laser radar, sodium layers, gravity waves