

2001年狮子座流星雨期间钠荧光激光雷达的观测

刘进波 易帆*

(武汉大学电子工程系, 武汉 430072. *联系人, E-mail: yf@whu.edu.cn)

摘要 报道国内大型激光雷达对流星尾迹的观测, 用共振钠荧光雷达观测到2001年11月武汉上空狮子座流星雨的4个长寿命尾迹. 数据显示, 观测到的狮子座流星雨尾迹的参数与普通的偶发流星有较大的差异, 而与已报道的1998年和1999年的狮子座流星雨的结果类似. 流星尾迹的平均消融高度为97.95 km, 与狮子座流星雨的进入速度(约72 km/s)吻合, 平均峰值密度为 $3380 \pm 2630 \text{ cm}^{-3}$, 柱含量为 $(2.33 \pm 1.49) \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$, 都高于普通偶发流星尾迹的相应参数, RMS宽度为360 m, 寿命81 min, 为长寿命尾迹. 狮子座流星雨爆发前后共5个晚上的观测数据显示, 狮子座流星雨的爆发对背景钠层的柱含量并没有产生显著的影响.

关键词 共振钠荧光雷达 狮子座流星雨 钠层

已有的研究表明, 流星消融是中间层和低热层金属层金属物质的来源^[1], 流星注入引起的钠物质的浓度变化与通常的偶发钠层有显著的区别, 因此我们可以用共振钠荧光雷达对流星进行观测. 2001年11月18日晚至19日凌晨爆发的狮子座流星雨, 是近30年中国能观测到的较大的一次流星雨, 为研究流星雨消融的特征以及研究流星注入对钠层的影响提供了难得的机会. 武汉大学激光雷达系统在2001年11月18日18:30至11月19日06:00对武汉(30°N, 114.4°E)上空的钠层进行了连续的观测, 得到了4个长寿命流星消融尾迹的剖面.

1 观测设备

武汉大学光雷达系统(WU-LIDAR)于2001年3月8日开始运行, 该雷达系统利用瑞利散射和共振钠荧光技术探测中层大气. 发射激光采用Nd:YAG激光器的二次谐波泵浦可调染料激光器产生, 为了将染料激光器的输出波长精确调至钠的D2共振线上, 我们采用钠泡进行定标. 接收系统采用望远镜, 光电转换管和计数器, 随高度变化的光子计数数据传到一台PC机上保存. 在夜间探测时, 该雷达的垂直距离分辨率为96 m, 时间分辨率为4 min, 其主要技术指标见表1.

2 观测结果与讨论

图1为由观测资料反演得到的钠层密度的夜间变化图. 从图1中可以看出, 前半夜钠层密度较低, 钠层基本上分布在82~100 km左右的高度上; 到了

0200LT以后, 钠层的密度开始增强, 而且上边沿向上扩展, 在0400LT到达105 km, 而下部边沿基本维持不变. 在0400LT时刻, 90 km高度上出现了一个比较强的偶发钠层, 随后它所处的高度开始慢慢下降, 一直到0600LT观测结束该偶发钠层仍然存在.

图2给出了11月19日03:05 LT的一个流星消融尾迹的观测结果, 96.5 km处的尖峰就是流星的消融尾迹, 该尖峰的密度为 7290 cm^{-3} , 远高于普通的背景钠层, 如果将该尾迹密度为峰值密度 $e^{-1/2}$ 的两处高度的间隔定义为RMS宽度, 则它的RMS宽度约270 m, 而武汉地区偶发钠层宽度一般约2 km^[2], 该流星尾迹的宽度要明显窄于偶发钠层的. 观测显示, 该尾迹的持续时间不超过4 min.

根据Asher^[3]的预测, 当晚的狮子座流星雨第1

表1 WU-LIDAR 参数

发射部分:		
	Nd:YAG 激光器	染料激光器
波长	532 nm	589 nm
线宽		1.5 GHz (1.73 pm)
脉冲能量	350 mJ	60 mJ
重复频率	20 Hz	20 Hz
脉冲宽度	6 ns	6 ns
光束发散角	0.5 mrad	0.5 mrad
接收部分:		
望远镜孔径	0.52 m	
视场角	1.0 mrad	
带宽	1.0 nm	
时间门宽度	640 ns	

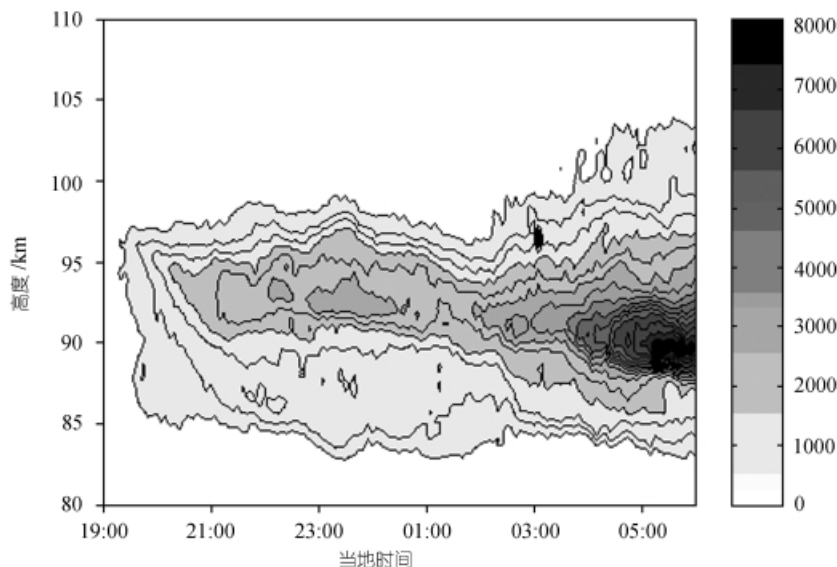


图 1 2001 年 11 月 18 日晚至 19 日凌晨的钠层

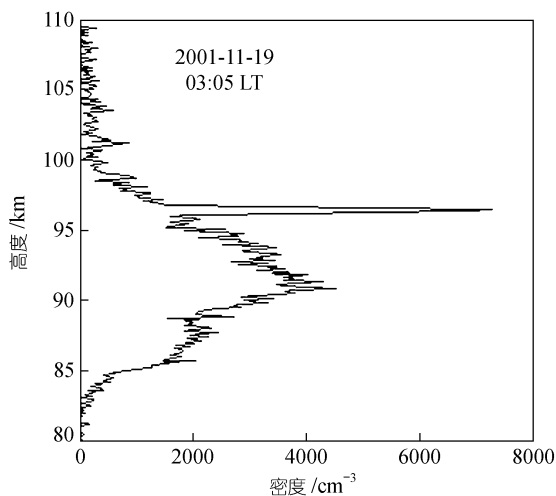


图 2 共振钠荧光雷达于 11 月 19 日 03:05 LT 探测到的武汉上空的流星消融的钠尾迹, 96.5 km 处的尖峰就是流星消融尾迹

次极大时间为 11 月 18 日 18:01 LT, 每小时天顶流星数 2500; 第 2 次极大时间 11 月 19 日 01:31 LT, 每小时天顶流星数 9000; 第 3 次极大时间 11 月 19 日 02:19 LT, 每小时天顶流星数 15000. 国际流星组织(IMO)的报道证实该预测与实际观测结果非常接近.

当流星进入大气层时, 流星物质和所经过处的大气将会被电离, 同时, 由摩擦热产生的高温会使流星物质气化. 由于流星轨迹上的电子浓度很高, 离子

将会很快中性化(时间短于 1 s). 起初的中性物质轨迹的直径只有几米^[4]. 随后分子扩散效应将会导致中性钠轨迹在垂直方向和水平方向都变宽. 假定中性钠的密度分布服从高斯分布, 而且均方半径($e^{-1/2}$ 半径, RMS 宽度的平方) σ^2 随时间线性增长^[5]:

$$\sigma^2 = 2Dt + \sigma_0^2, \quad (1)$$

其中 D 是分子扩散系数, t 是从流星开始消融起流逝的时间, σ_0 是初始消融半径. 流星尾迹的寿命定义为从开始消融到雷达观测之间的时间. 分子扩散系数主要依赖于大气密度和温度, 可以由模型精确地给出. 假设流星的初始消融半径可以忽略不计, 在已知流星尾迹的 RMS 宽度和分子扩散系数的情况下, 就可以估计出流星的寿命. 表 2 列出了该晚观测到的流星尾迹的一些特征参数.

表 2 中, 观测到的 4 个流星尾迹的寿命都在 50 min 以上, 属于长寿命流星尾迹, 而通常的流星尾迹由于分子扩散和湍流扩散作用的影响, 寿命不超过 10 min^[6]. 流星消融尾迹的平均峰值密度(如不指明, 都是指钠物质的密度)为 $3380 \pm 2630 \text{ cm}^{-3}$, Kane 等人^[6]在 1988 和 1989 年间观测到的 5 个长寿命流星尾迹的平均峰值密度为 $2400 \pm 500 \text{ cm}^{-3}$, 积累时间为 60 s; Chu 等人^[4]在 1998 年 11 月观测到的 7 个狮子座流星雨尾迹的平均峰值密度为 $(198 \pm 144) \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$, 积累时间为 10 s. 我们的观测值较 Chu 等人的小很多.

表2 2001年狮子座流星雨消融尾迹的特征

流星编号	时间(LT)	高度/km	背景钠层柱含量 /cm ⁻²	流星尾迹钠柱含量/cm ⁻²	流星尾迹峰值密度/cm ⁻³	RMS 宽度/m	寿命/s
1	02:55	98.12	3.05×10^9	1.84×10^8	2070	280	2860
2	03:00	97.73	3.14×10^9	1.18×10^8	1600	450	8370
3	03:05	96.49	3.14×10^9	4.52×10^8	7290	270	3130
4	05:35	99.46	5.47×10^9	1.79×10^8	2560	430	5130
平均值		97.95	3.70×10^9	2.33×10^8	3380	360	4870
均方差		1.22	1.18×10^9	1.49×10^8	2630	20	2540

这是由于我们的钠雷达积累时间设置得较长(240 s),而流星尾迹的持续时间一般都小于 240 s,会导致观测值偏小,为实际值的 1/240,加上钠雷达视场较小(在 100 km 高度半径约 100 m)以及风场的影响,可能导致流星尾迹不完全在雷达视场内,或者流星尾迹被风吹出视场,观测到的峰值密度会进一步偏小^[6].

4个尾迹的平均高度为 97.95 km, 出现高度的均方差为 1.22 km. Kane 等人^[6]用钠雷达和铁雷达在 1988 年和 1989 年观测到 101 个流星尾迹, 平均高度为 89.0 km, 高度分布的均方差为 3.3 km; Hoffner 等人^[7]用铁雷达观测到 1998 年狮子座流星雨的 3 个尾迹, 平均高度为 99.7 km; Chu 等人^[8]在 Starfire Optical Range 用钠雷达观测到 1998 年狮子座流星雨的 7 个长寿命尾迹, 平均高度为 94 km; Chu 等人^[4]在 Okinawa 用铁雷达观测到 1998 年狮子座流星雨的 18 个尾迹, 平均高度为 95.67, 均方差为 3.93 km. 我们报道的流星尾迹出现高度要明显高于 Kane 等人^[6]的, 但是与狮子座流星雨的报道结果相近, 这证实了当晚观测到的流星尾迹确实是来自狮子座流星雨. 这种高度差是由于狮子座流星雨的进入速度(72 km/s)较通常的偶发流星(约 30 km/s)要高得多造成的, Chu 等人^[4]指出, 如果假设流星的消融是在空气的拽力达到临界点是发生的, 那么消融的高度差与进入速度之间的关系由下式进行估计:

$$\Delta z \approx H \ln(V_1/V_2), \quad (2)$$

其中 H 是大气的标高, 在 100 km 高度附近, $H \approx 6.25$ km. 由(2)式, 狮子座流星雨将与普通偶发流星消融高度有 5.5 km 的高度差, 我们的观测到的高度差为 8.95 km, 在可以接受的范围之内.

流星尾迹中钠物质的平均柱含量为 $(2.33 \pm 1.49) \times 10^8$ cm⁻², 背景钠层平均柱含量为 $(3.73 \pm 1.18) \times 10^9$ cm⁻², 流星尾迹的钠柱含量占背景的 6.3%. Kane 等

人^[6]观测到的流星尾迹钠物质平均柱含量是 2.8×10^7 cm⁻², 背景柱含量为 5.4×10^9 cm⁻², 流星尾迹的钠柱含量占背景的 0.5%; Chu 等人^[8]的结果是流星柱含量 $(4.80 \pm 3.87) \times 10^9$ cm⁻², 背景柱含量 $(9.15 \pm 1.17) \times 10^9$ cm⁻², 流星尾迹钠柱含量占背景的 5.2%; Chu 等人^[4]铁雷达观测到的流星尾迹中铁的柱含量为 1.06×10^9 cm⁻², 依照流星物质中铁与钠原子数之比为 17 的估计^[6], 估算出钠的柱含量约为 6.2×10^7 cm⁻². 即使将积累时间较长而导致观测到的流星尾迹密度偏低的因素考虑进去^[6], 我们的结果仍比 Chu 等人^[8]的高很多, 这是由于在这种时间分辨率和高度分辨率的设置下, 激光雷达只对数密度较大和/或维持时间较长的流星尾迹敏感^[9]. 与配置接近的激光雷达的结果比较表明, 流星尾迹中钠柱含量的值在不同的时间, 不同的地点, 差异较大, 但狮子座流星雨的值总体而言都要大于普通的偶发流星, 我们的观测结果也证实了这一点.

图3显示了狮子座流星雨爆发当晚以及前后共5个晚上的背景钠层柱含量的时间变化趋势, 其中右下图为每晚 01:00 ~ 03:30 LT 钠柱含量的平均值, 进行 2.5 h 的平均是为了尽量去除潮汐和日变化的影响^[4]. 柱含量的时间变化趋势显示, 其中4个晚上钠层柱含量都有逐渐增加的趋势, 但这应该是由温度变化引起的^[10], 而且右下的图显示在狮子座流星雨爆发前后, 钠柱含量并无明显变化, 爆发前后两天反而要高于爆发当晚, 证明狮子座流星雨对背景钠层的柱含量并没有产生显著的影响.

3 结论

由共振钠荧光雷达观测到的 2001 年 11 月武汉上空狮子座流星雨的 4 个尾迹, 得到了柱含量、消融高度、峰值密度、RMS 宽度和寿命等流星尾迹的重要

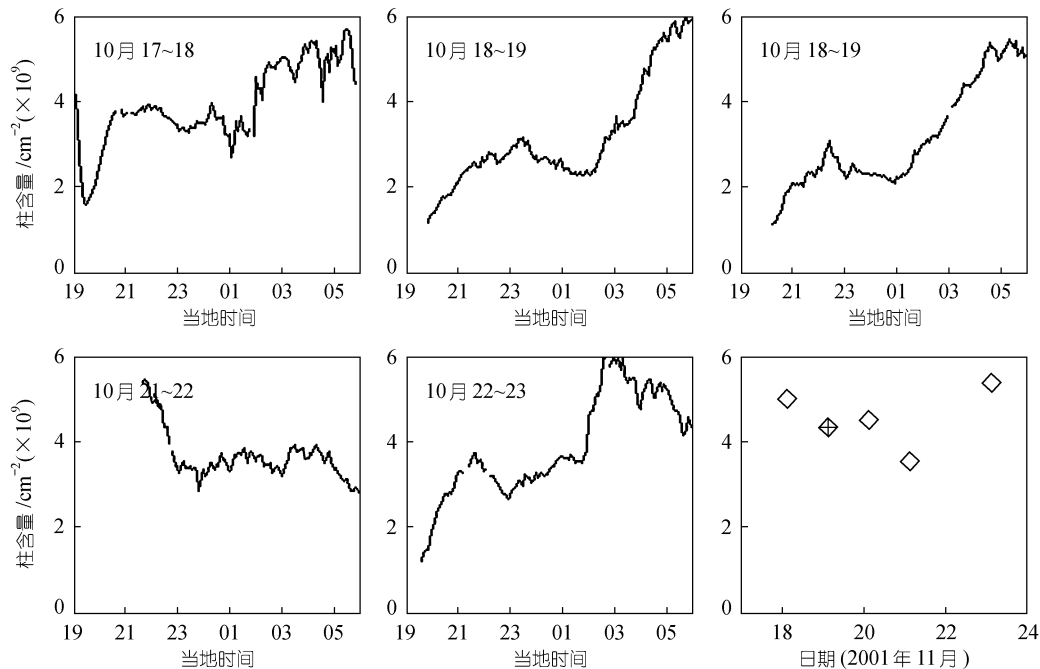


图3 2001年狮子座流星雨爆发前后几日的钠层丰度变化图

最后一个图用十字标出的是狮子座流星雨爆发的当晚

参数. 数据显示, 观测到的狮子座流星雨尾迹的参数与普通的偶发流星有较大的差异, 而与以往的(1998年和1999年)狮子座流星雨类似, 平均消融高度为97.95 km, 高于普通偶发流星的消融高度89 km, 这是因为狮子座流星雨的进入速度要高; 平均峰值密度为 $3380 \pm 2630 \text{ cm}^{-3}$, 柱含量为 $(2.33 \pm 1.49) \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$, 都高于普通偶发流星尾迹的相应参数; RMS 宽度为360 m; 寿命为4870 s (81 min), 远大于10 min, 为长寿命尾迹. 狮子座流星雨爆发前后共5个晚上的观测数据显示, 狮子座流星雨的爆发对背景钠层的柱含量并没有产生显著的影响.

致谢 感谢审稿者对初稿提出的修改意见. 本工作受国家自然科学基金(批准号: 40174044)资助.

参 考 文 献

- 1 Clemesha B R. Review Paper: Sporadic neutral metal layers in the mesosphere and lower thermosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1995, 57(7): 725~736
- 2 Yi F, Zhang S D, Zeng H J, et al. Lidar observation of sporadic Na layers over Wuhan (30.5°N, 114.4°E). *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(9): 59-1~59-4
- 3 Asher D J. Leonid dust trail theories. In: Arlt R, ed. *Proc International Meteor Conference*, Frasso Sabino 1999. International meteor Organization, 2000. 5~21
- 4 Chu X, Pan W, Papen G, et al. Characteristics of Fe Ablation Trails observed During the 1998 Leonid Meteor Shower. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(13): 1807~1810
- 5 Grime B W, Kane T J, Collins S C, et al. Meteor trail advection and dispersion; preliminary lidar observations. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26: 675~678
- 6 Kane T J, Gardner C S. Lidar Observation of the Meteoric Deposition of Mesospheric Metals. *Science*, 1993, 259: 1297~1300
- 7 Hoffner J, von Zahn U, et al. The 1996 Leonid shower as studied with a potassium lidar: Observations and inferred meteoroid sizes. *Journal of Geophysics Research*, 1999, 104: 2633~2643
- 8 Chu X, Kelley M, Drummond J, et al. Lidar Observations of Elevated Temperatures in Bright Chemiluminescent Meteor Trails During the 1998. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(13): 1815~1818
- 9 Grime B W, Liu A Z, Drummond J, et al. Meteor trail advection observed during the 1998 Leonid shower. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(13): 1819~1822
- 10 Helmer M J, Plane M C, Qian J, et al. A model of meteoric iron in the upper atmosphere. *Journal of Geophysics Research*, 1998, 103: 10913~10926

(2003-05-16 收稿, 2003-07-24 收修改稿)