

文章编号: 1001-3806(2011)02-0268-04

热层氦辐射线大气吸收系数的理论分析

贺 健, 张庆国

(河南科技大学 物理与工程学院, 洛阳 471023)

摘要: 为了实现激光雷达对热层氦浓度的探测, 采用理论分析和计算机模拟的方法, 计算了组成亚稳态氦 1083nm 的 3 条共振辐射线的大气吸收系数, 得到了大气吸收系数的数量级为 10^{-3} 。结果表明, 对于同一光谱线, 大气吸收系数与原子浓度成正比, 与温度的 1/4 次方成正比, 而与压强成反比; 对不同光谱线, 大气吸收系数与中心波长成正比; 在谱线半宽度内, 平均大气吸收系数和谱线中心大气吸收系数成正比。最后指出了大气吸收系数在光谱分析中的应用。此分析讨论对于激光雷达对热层氦浓度的探测具有一定的参考意义。

关键词: 大气与海洋光学; 亚稳态氦; 激光雷达; 大气吸收系数; 光谱分析

中图分类号: P412.25 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.034

Theoretical analysis of the atmospheric absorption coefficient of He emission line in thermosphere

HE Jian, ZHANG Qing-guo

(School of Physics and Engineer, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: In order to detect the helium density in thermosphere with a laser radar, after theoretical analysis and computer simulation, the atmospheric absorption coefficients for the three resonance lines making up metastable He 1083nm emission line were calculated, and the atmospheric absorption coefficient was found at the order of magnitude of 10^{-3} . The results show that for the same spectral line, the atmospheric absorption coefficient is proportional to the concentrate of atoms and the fourth root of the temperature, however it is inversely proportional to the pressure. For different spectral lines, the atmospheric absorption coefficients are proportional to the central wave length. In the half width of the spectral line, the average atmospheric absorption coefficient is proportional to the atmospheric absorption coefficient at the line center. Finally, the application of atmospheric absorption coefficient in spectrum analysis was pointed out. This calculation has some reference significance to realize the detection of the helium density in thermosphere.

Key words: atmospheric and ocean optics; metastable He; laser radar; atmospheric absorption coefficient; spectrum analysis

引 言

利用亚稳态氦 1083nm 共振辐射线研究太阳的性质, 以及反演遥远星体的速率、温度、成分等得到了广泛应用。最近, 人们利用气辉观察到被热成层散射的太阳光中的 1083nm, 388.9nm 和 311.8nm 的氦共振辐射线^[1]。这就允许通过这些辐射线估计大气热成层氦的浓度, 从而研究热成层大气的特性。这种方法开始用 F-P 干涉仪孤立 OH 米氏散射线, 并且取得了初

步的结果。但随着激光技术和探测技术的快速发展, 人们设想利用共振激光雷达来实现热成层氦的浓度的探测, 现在还处于理论研究阶段。作者对此也进行过一些基本的理论讨论^[2]。

在热成层(电离层), 温度高达 1125K 左右, 其内部粒子均处于等离子体状态, 这就可以运用等离子体的知识, 对热成层氦 1083nm 的共振辐射线进行理论分析, 从而为热成层氦的浓度的测量提供必要的理论根据。在从热成层观测到的光谱中, 通常有亚稳态氦 1083nm, 388.9nm 和 311.8nm, 而亚稳态氦 1083nm 共振辐射线最强, 所以对该共振辐射线研究较多^[3]。

由于热成层温度很高, 一般认为谱线展宽为多普勒线型; 而一般吸收光谱仪对于谱线的展宽为洛伦兹线型; 所以, 一般认为观测到的谱线展宽为多普勒线型和洛伦兹线型的卷积-佛克脱线型。在谱线的测量中,

基金项目: 河南省教育厅自然科学研究计划资助项目 (2008B140005; 2010B140004)

作者简介: 贺 健(1978-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为空间光学探测。

E-mail: hejian405@163.com

收稿日期: 2010-06-10; 收到修改稿日期: 2010-06-29

不仅存在热运动导致的多普勒线型,还存在着大气和测量仪器的吸收导致的洛伦兹线型,所以,认为谱线为佛克脱线型^[4]。故本文中重点讨论佛克脱线型下不同因素对氦 1083nm 共振辐射线的大气吸收系数的影响,从而为热成层氦浓度探测提供必要的理论依据。

1 亚稳态氦辐射线

亚稳态氦 1083nm 辐射线实际上由 3 条非常接近的辐射线 1083.034nm,1083.025nm 和 1082.908nm 组成。这些辐射线产生于氦 2³P-2³S 的电子跃迁。图 1 中显示了低能级氦原子的能级图,图 2 中显示了轨道

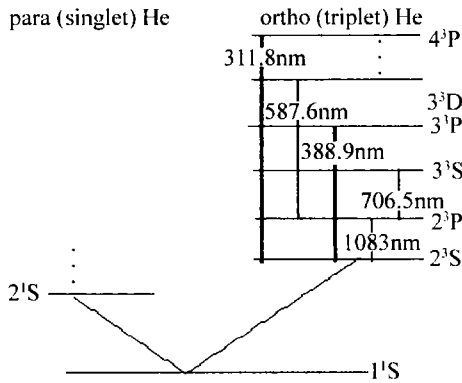


Fig.1 The energy diagram for the lower levels of the He atom

Table 1 The transition characteristics of five metastable helium resonance emission lines

| | metastable He line values | | | | |
|----------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | 1083.034nm | 1083.025nm | 1082.908nm | 388.9nm | 311.8nm |
| g_2 | 5 | 3 | 1 | 9 | 9 |
| g_1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| A_{21}/s^{-1} | 1.022×10^7 | 1.022×10^7 | 1.022×10^7 | 0.948×10^7 | 0.564×10^7 |
| t_{21}/s | 9.785×10^{-8} | 9.785×10^{-8} | 9.785×10^{-8} | 10.55×10^{-8} | 17.73×10^{-8} |
| g factor (airglow) | 16.8 | 16.8 | 16.8 | 0.1 | small |

2 佛克脱线型的大气吸收系数

光辐射到达地面激光雷达前,被大气吸收、散射和反射,造成光辐射的减弱,减弱程度用大气吸收系数表示。某条光辐射谱线的大气吸收系数一般可以表示为^[6]:

$$k(\nu) = \frac{e^2}{4m\epsilon_0\nu_0^2} N f_{ij} P(\nu - \nu_0) \quad (1)$$

式中, f_{ij} 为共振线的碰撞强度,下标 i 和 j 分别表示第 i 和第 j 能级, N 为基态原子数密度, ϵ_0 为真空电容率, e 为电子电荷, m 为电子质量, $P(\nu - \nu_0)$ 为归一化线型函数, ν 为频率, ν_0 为中心频率。

佛克脱线型函数定义为:

$$P(\nu - \nu_0) = \frac{f' y}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-t^2)}{y^2 + (x-t)^2} dt \quad (2)$$

式中, $y = \frac{\Delta\nu_L}{\Delta\nu_D} (\ln 2)^{1/2}$, $x = \frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_D} (\ln 2)^{1/2}$, $f' = \frac{1}{\Delta\nu_D} \times (\ln 2)^{1/2}$, $\Delta\nu_L$ 和 $\Delta\nu_D$ 分别为洛伦兹展宽和多普勒展宽的半峰全宽。

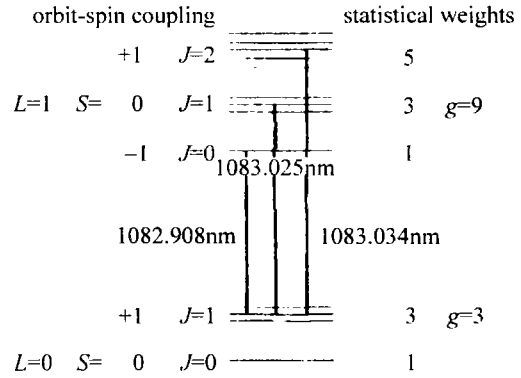


Fig.2 The individual lines that make up the 1083nm triplet line

自旋耦合条件下组成 1083nm 辐射线的各独立的辐射线^[3]。轨道自旋耦合又称为 LS 耦合,其中, L 和 S 分别表示电子的总轨道角动量和总自旋角动量。2³S 态是 3 重态氦的最低能级,它是一个亚稳态。可以看到也有其它到 2³S 态的跃迁,亚稳态氦 388.9nm 和 311.8nm 线,它们分别来自于 3³P-2³S 和 4³P-2³S 的电子跃迁。

亚稳态氦 1083.034nm, 1083.025nm, 1082.908nm, 388.9nm 和 311.8nm 5 条共振辐射线的跃迁特性如表 1 所示^[7]。

从(1)式可以看出,不同频率对应不同的吸收系数。在原子吸收光谱分析中,佛克脱线型谱线基态原子数密度 N 和峰值吸光度 k_m (其中,下标 m 表示峰值)的关系为^[7]:

$$N = \frac{k_m}{4\lambda_0^2 f_{ij}} \left(\frac{1}{\Delta\nu_L} + \frac{1}{\Delta\nu_n} \right) \frac{1}{\Delta\nu_D} \sqrt{\frac{\pi}{\ln 2}} \frac{mc^3}{e^2} \quad (3)$$

式中, c 为真空中光速, λ_0 为谱线中心波长, $\Delta\nu_n$ 为自然展宽的半峰全宽,其只与激发态寿命有关,要讨论大气吸收系数和温度及压强的关系,忽略含有 $\Delta\nu_n$ 这一项,佛克脱线型谱线基态原子数密度 N 和峰值吸光度 k_m 的关系可写为:

$$N = \frac{k_m}{4\lambda_0^2 f_{ij} \Delta\nu_L \Delta\nu_D} \sqrt{\frac{\pi}{\ln 2}} \frac{mc^3}{e^2} \quad (4)$$

式中,峰值吸光度 k_m 和原子浓度成正比,即^[8]:

$$k_m = \partial C \quad (5)$$

式中, ∂ 为系数, C 为原子浓度。多普勒展宽的半峰全宽为:

$$\Delta\nu_D = \nu_0(7.1623 \times 10^{-7})(T/M)^{1/2} \quad (6)$$

式中, T 为气体的绝对温度, M 为氢原子的摩尔质量。

洛伦兹展宽的半峰全宽可利用下式进行计算^[9]:

$$\Delta\nu_L = 2r_{\text{air}}c(296/T)^n p \quad (7)$$

式中, n 为温度系数, 对于一般气体, $n=0.75$, $r_{\text{air}}=3.34 \times 10^{-9} \text{m}^{-1}/\text{Pa}$ 为大气展宽系数, p 为大气压强。

共振线的振子强度, 其一般由下式表示^[3]:

$$f_{ij} = [\epsilon_0 mc / (2\pi e^2)] (g_2/g_1) (\lambda_0^2 / \tau_{21}) \quad (8)$$

式中, g 为不同能级的统计权重, τ_{21} 为激发态原子的平均寿命, 下标 21 表示高能级 2 和低能级 1。

3 结果和讨论

从(1)式可以看出, 大气吸收系数 $k(\nu)$ 与基态原子数密度 N 成正比; 而从(4)式到(7)式可以看出, 基态原子数密度 N 与原子浓度 C 成正比, 与温度 T 的 1/4 次方成正比, 与压强 p 成反比。

所以, 可以得出, 对同一辐射光谱线, 不同频率处的大气吸收系数 $k(\nu)$ 与原子浓度 C 成正比, 与温度 T 的 1/4 次方成正比, 与压强 p 成反比。

另外, 从(1)式到(8)式可以发现, 对于不同辐射线, 大气吸收系数和中心波长成正比。峰值吸光度 k_m 的数量级一般为 10^{-3} , 假定峰值吸光度 $k_m=0.006$, 若热层某层大气压强为 10^4Pa , 当温度从 700K 到 1500K 变化时, 对于亚稳态氦 1083.034nm, 1083.025nm, 1082.908nm 3 条辐射线, 谱线中心的大气吸收系数和温度的关系如图 3 所示。

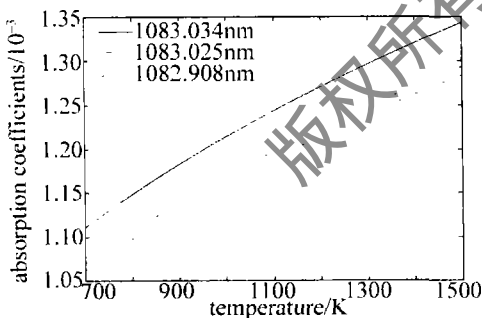


Fig. 3 Curve of atmospheric absorption coefficients at line center with temperature

若热层某层大气温度为 1000K, 当压强从 $0.5 \times 10^4 \text{Pa}$ 到 $1.5 \times 10^4 \text{Pa}$ 变化时, 对于亚稳态氦 1083.034nm, 1083.025nm, 1082.908nm 3 条辐射线, 谱线中心的大气吸收系数和压强的关系如图 4 所示。

实际测量时, 由于各种因素, 测量的不是单色光, 而是具有一定谱线展宽。前面提到过, 一般假定谱线分布为高斯(多普勒)线型, 其可以表示为:

$$P(\nu - \nu_0) = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp\left[-\frac{4\ln 2}{\Delta\nu_D^2}(\nu - \nu_0)^2\right] \quad (9)$$

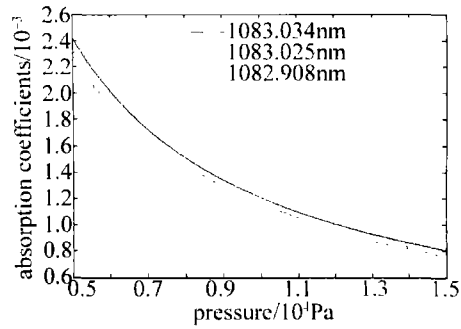


Fig. 4 Curve of atmospheric absorption coefficients at line center with pressure
在谱线半峰全宽内, 可以根据下式计算其平均大气吸收系数:

$$\bar{k} = \frac{\int_{\nu_0 - \Delta\nu_D/2}^{\nu_0 + \Delta\nu_D/2} k(\nu) d\nu}{\Delta\nu_D} \quad (10)$$

经过计算, 可以得到:

$$\bar{k} = \frac{\exp(-\ln 2)}{2\sqrt{\pi \ln 2}} k(\nu_0) \quad (11)$$

式中, $k(\nu_0)$ 为谱线中心的大气吸收系数。可见, 谱线半峰全宽内的平均大气吸收系数正比于谱线中心的大气吸收系数, 所以, 上面讨论的谱线中心大气吸收系数和原子浓度、温度和压强的关系也适用于平均大气吸收系数。

4 大气吸收系数的应用

上面讨论了峰值吸收系数随温度、压强和基态原子数密度的关系, 其在实际热层氦浓度探测方面有重要应用。

若讨论出大气吸收系数, 根据下式可计算谱线不同频率光学厚度^[6]:

$$\tau = k(\nu)l \quad (12)$$

式中, l 为等离子体的有效长度。

如果知道了光学厚度, 可以进行谱线逃逸因子和等效宽度分析, 简单分析如下。

(1) 逃逸因子分析^[10]

逃逸因子表示从高能级向低能级跃迁中, 辐射光子传输到等离子体表面而不被捕获的总概率。对于高斯线型和洛伦兹线型, 逃逸因子分别可以表示为:

高斯线型:

$$\Lambda = \frac{1 + 1/\tau}{1 + \tau \sqrt{\tau \ln(\tau + 1)}} \quad (13)$$

洛伦兹线型:

$$\Lambda = \frac{1 + (1 + \tau)/(2 + \tau)}{1 + \sqrt{\pi\tau}} \quad (14)$$

(2) 等效宽度分析^[11]

在光谱分析中, 等效宽度也称为总吸收, 通常把吸

收线等效成一个矩形,该矩形的宽度称为等效宽度。

对于厚度为 l 的稀薄气体层,其定义为:

$$w(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \tau d\nu \quad (15)$$

经过推导,可以得到其计算公式为:

$$w(\nu) = [\pi e^2 / (mc)] N f_j l \quad (16)$$

和(1)式相比较,会发现原子浓度、温度和压强对等效宽度的影响和其对大气吸收系数的影响相类似,因此,可以得到结论,对同一辐射光谱线,不同频率处的等效宽度 $w(\nu)$ 与原子浓度 C 成正比,与温度 T 的 $1/4$ 次方成正比,与压强 p 成反比。

5 结论

为了实现激光雷达对热层氦浓度的探测,讨论了组成亚稳态 He 1083nm 3 条共振辐射线的大气吸收系数。得到结论如下:(1)对同一辐射光谱线,不同频率处的大气吸收系数与原子浓度成正比,与温度的 $1/4$ 次方成正比,与压强成反比;(2)对于不同辐射线,大气吸收系数和中心波长成正比;(3)谱线半峰全宽内的平均大气吸收系数正比于谱线中心的大气吸收系数,谱线中心大气吸收系数和原子浓度、温度和压强的关系也适用于平均大气吸收系数。

通过计算机模拟,计算了对于组成 He 1083nm 的亚稳态氦 1083.034nm, 1083.025nm, 1082.908nm 3 条辐射线的大气吸收系数随温度和压强的变化关系;最后简单讨论了大气吸收系数在光子逃逸因子和等效宽度中的应用,并讨论了原子浓度、温度和压强对等效宽度的影响。

参考文献

- [1] KERR R, NOTO J, LANCASTER R S, *et al.* Fabry-Perot observations of helium 10830Å emission at millstone hill [J]. *Geophysics Research Letters*, 1996, 23(22):3239-3242.
- [2] ZHANG Q G, HE J. Numerical simulation for the detection of He density in thermosphere by resonant lidar [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2):171-173 (in Chinese).
- [3] GERRARD A J, KANE T J, MEISEL D D, *et al.* Investigation of a resonance lidar for measurement of thermospheric metastable helium [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1997, 59(16):2023-2035.
- [4] ZHANG Q G, HE J. Theoretical analysis of the optical depth of laser produced plasma for the voigt profile [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(10):2740-2744 (in Chinese).
- [5] HE J, ZHANG Q G. The calculation of the resonance escape factor of helium for Lorentzian and Voigt profiles [J]. *Physics Letters*, 2006, A359(4):256-260.
- [6] MOLINO G J C, BOTTICHER W, COCK M. Oscillator strengths of KrI and XeI resonance lines [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1996, 55(2):169-179.
- [7] HABIB A A M, EL-GOHARY Z. The resonance escape factor for Voigt and Lorentz line profiles in atomic absorption measurements [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2002, 72(4):341-347.
- [8] THORNE A P. *Spectrophysics* [M]. 2nd ed. London: Chapman & Hall Ltd, 1986:323.
- [9] MA W G, YIN W B, HUANG T, *et al.* Analysis of gas absorption coefficient at various pressures [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2004, 24(2):135-137 (in Chinese).
- [10] DRAWIN H W, EMARD F. Optical escape factors for bound-bound and free-bound radiation from plasmas I. Constant source function [J]. *Plasmaphysik*, 1973, 13(3):143-168.
- [11] HABIB A A M. Equivalent width of copper and potassium resonance lines at 3247.54Å, 7665Å for Voigt profile by atomic absorption measurements [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2004, 84(3):261-269.

(上接第267页)

- [3] YU J, JIA Z, YI L. Optical millimeter-wave generation or up-conversion using external modulators [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(1):265-267.
- [4] WANG Q, RIDEOUT H, ZENG F, *et al.* Millimeter-wave frequency tripling based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(23):2460-2462.
- [5] LIN C, WEN H, WEN S H, *et al.* A novel radio-over-fiber system with wavelength reuse for upstream data connection [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(6):387-389.
- [6] HAI L, LIN C. Extraction of feed forward information for polarization mode dispersion compensation [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(5):484-486 (in Chinese).
- [7] PENNINGCKX D. Optical differential phase shift keying (DPSK) direct detection considered as a duobinary signal [C] // 27th European Conference on Optical Communication 2001. Berlin, Germany: VDE VERLAG, 2001:11-13.
- [8] CIARAMELLA E, CONTESTABILE G, ERRICO A D. A novel scheme to detect optical DPSK signals [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(9):2138-2140.
- [9] QI C, YAO J, SEREGELYI J, PAQUET S, *et al.* Optical generation and distribution of continuously tunable millimeter-wave signals using an optical phase modulator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(9):2687-2695.
- [10] CHEN L, WEN H, WEN S H. A radio-over-fiber system with a novel scheme for millimeter-wave generation and wavelength reuse for up-link connection [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(19):2056-2058.
- [11] YU J J, JIA Z, XU L, *et al.* A DWDM optical mm-wave generation for ROF downstream link using optical phase modulator and optical interleaver [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(13):1418-1420.