

近共振激光在钠蒸气中激发的角锥辐射

夏宗炬 邹英华

(北京大学物理系)

提要: 用一个近共振的染料激光束照射钠蒸气后, 我们观察到一个角锥型辐射。实验中钠原子密度约为 10^{14} 原子数/厘米³, 激光波长调谐在 D_1 或 D_2 线短波边。这一角锥辐射的空间、光谱和偏振特性得到了测量。测量结果与在钡蒸气中的类似实验作了比较。

Conical emission from near-resonant laser excited sodium vapor

Xia Zongju, Zou Yinghua

(Department of Physics, Beijing University)

Abstract: We have observed a conical emission from sodium vapor ($N \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) illuminated by a near-resonant dye laser (detuning on the short-wavelength side of D_1 or D_2 line). Spatial, spectral and polarization characteristics of this emission have been measured. The results are compared with the experiments using barium vapor.

1979年 C. H. Skinner 等人报导^[1]了他们用一氮分子激光泵浦的染料激光入射钡蒸气时, 当激光调谐到 Ba 原子 $6s^2^1S-6s6p^1P$ 共振跃迁的短波边约 10 \AA 时, 观察到一个反常的角锥辐射。尽管这一效应很强, 并且对其特性作了系统的测量, 至今其机理仍得不到满意的解释。看来还需要进行更多的理论和实验工作。本文报导了我们在钠蒸气中观察到的类似现象, 我们进行的测量, 以及与 Ba 蒸气中的结果进行的比较, 或许是有益的。

实验装置

实验装置如图 1 所示。

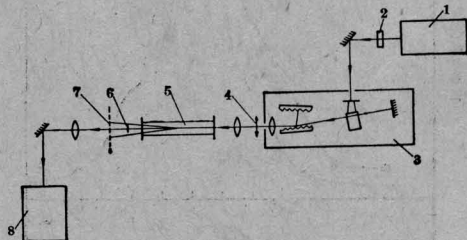


图 1 观测角锥辐射的实验装置简图

1—YAG: Nd^{3+} 脉冲激光器; 2—碘酸锂倍频晶体; 3—染料激光器; 4—偏振片(水平偏振); 5—Na 蒸气热管炉; 6—中心挡光圆片; 7—纸屏(摄谱时移去); 8—摄谱仪

钠蒸气由一热管炉产生, 其结构在[2]中介绍过。热管炉中放有 10 克钠, 充入 6 托氩气。钠蒸气的等温区长约 6 厘米。用铜-康铜热偶测量中部不锈钢管外壁温度, 并由测得

收稿日期: 1981年5月8日。

温度计算出钠原子密度^[3]。热管炉用JWT-702温度控制器控温,控温精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

激光器是一个由YAG:Nd³⁺二次谐波横向泵浦的掠角入射光栅染料激光器。染料为若丹明6G的酒精溶液,浓度为 5×10^{-3} 克分子/升。掠角光栅是一块1800条/毫米全息光栅(TF-26),掠角大于 89.6° 。另一块1200条/毫米复制光栅Littrow入射作调谐用。染料激光线宽约 0.15 厘米^{-1} ,调谐精度约 0.3 厘米^{-1} ,峰功率在多数实验中约为5千瓦。输出激光为水平偏振,另加一水平偏振棱镜进一步改善偏振特性,并且减少了染料激光器的自发发射背景光。

激光束先用一块 $f=26.5$ 厘米透镜变换,再用一块 $f=85$ 厘米长焦距透镜聚焦于热管炉的中部。焦点处的光束半径为0.24毫米。

采用两种方法观测角锥辐射:在热管炉出光一端置一屏,在屏上直接观察角锥辐射光斑图形和测量其半角;也可以在屏的位置上放一感光胶片拍摄角锥的横向光场分布。当需要观察角锥辐射的光谱特性时,去掉屏而采用一WP₁型一米平面光栅摄谱仪。摄谱时,用一焦距为40厘米的透镜将热管炉中心成象于摄谱仪入射狭缝处,入射狭缝宽约10微米。

为了更好地观测角锥辐射特性,在作以上两种观测时,都用一不透明的圆片挡去激光束和其大部份弥散光。圆片直径9毫米,离热管中心约52厘米。

在热管炉的出口处置一偏振器,就可以作角锥辐射偏振特性的观测。

实验结果

一、空间特性

控制热管炉中部温度在 $250 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 内,并调谐染料激光波长至钠 D_1 或 D_2 线短波边(失调量约 0.5 至 1.5 \AA)。观察从钠蒸气

出来的辐射,发现有两个明显的特征:激光束光斑发生弥散;围绕中心弥散光斑出现角锥型辐射。

图2表示辐射的横向分布照片。中部圆形暗区是挡光圆片的象,在暗区边缘可以看到未能完全挡去的中心弥散光。

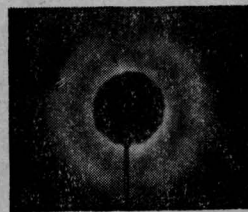


图2 角锥辐射的照片

Na原子密度: $N=1.9 \times 10^{14}$ 原子数/厘米³; 染料激光波长相对于Na D_1 线的失调量: -0.35 \AA ; 对4个激光脉冲曝光

这种角锥辐射的空间分布具有以下特性:

1. 角锥辐射只出现在染料激光调谐到Na D_1 或 D_2 线短波一边的情况下。
2. 在我们的实验条件下,角锥辐射的半角与激光功率无关。
3. 角锥辐射的半角随钠原子密度增加而增大。

图3表示角锥辐射半角与钠原子密度的关系,实验中染料激光波长分别调谐到 5895.6 \AA 和 5889.2 \AA 。由图可见,染料激光调至 D_2 线短波边(即波长为 5889.2 \AA)时,角锥辐射半角稍大,并且与 5895.6 \AA 时相比,角锥辐射可以在更高的钠原子密度下出现。

4. 角锥辐射的半角随染料激光器的波长变化。波长越短(即失调量绝对值越大)时,半角越小。

图4和图5分别表示角锥辐射的半角与染料激光相对Na D_1 、 D_2 线失调量的关系。实验时,钠原子密度保持在 1.0×10^{14} 原子数/厘米³。

二、光谱特性

图6显示了一个典型的光谱照片。摄谱

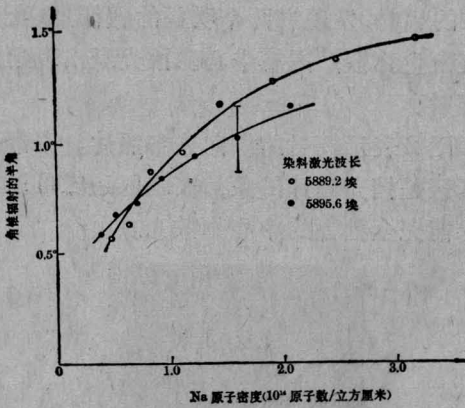


图3 Na 原子密度与角锥辐射半角的关系

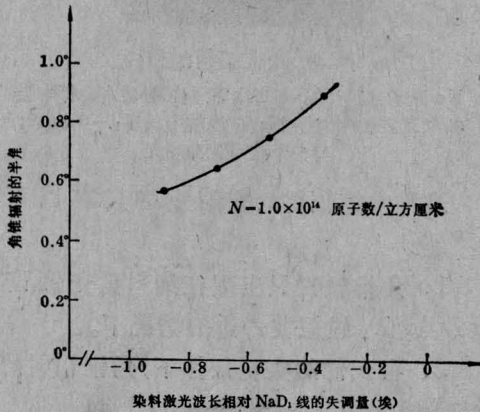


图4 染料激光波长相对 Na D₁ 线失调量与角锥辐射半角的关系

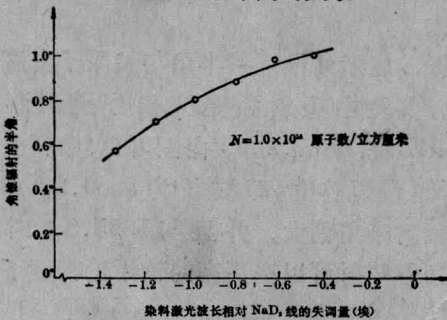


图5 染料激光波长相对 Na D₂ 线失调量与角锥辐射半角的关系

染料激光
波长相对
NaD₂ 线
的失调量

-2.09 -1.73 -1.56 -1.38 -1.20 -1.02 -0.85 -0.67 -0.49 -0.32 -0.14(Å)

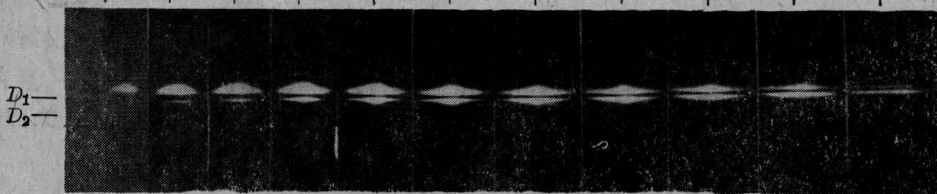


图7 连续调谐染料激光器波长时的角锥辐射光谱

上: 角锥辐射; 下: 中心光斑的弥散光; Na 原子密度: 1.9×10^{14} 原子数/厘米³

时染料激光的波长为 5889.1 \AA , 钠原子密度为 1.9×10^{14} 原子数/厘米³。钠灯的 D_1 、 D_2 线也同时拍下用作波长标尺。由照片可见, 光谱分为两部份, 它们被 D_2 线的强吸收隔开。仔细判断后, 发现在 D_2 线长波一边是角锥辐射的光谱; 短波一边是中心弥散光的光谱。两者的谱宽远比入射激光线宽 (0.05 \AA) 为宽 (角锥辐射谱宽可达 $5 \sim 6 \text{ \AA}$)。由于热管炉中心已成象于摄谱仪的入口狭缝, 光谱照片的垂直方向显示了热管炉中发光面的线度。

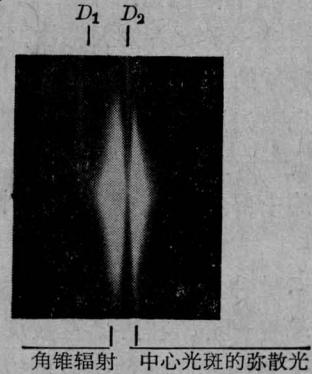


图6 角锥辐射的典型光谱

染料激光波长相对 NaD₂ 线的失调量: -0.85 \AA ;
Na 原子密度: 1.9×10^{14} 原子数/厘米³

图7表示连续调谐染料激光器波长时, 拍得的一系列角锥辐射光谱。实验中钠原子密度为 1.9×10^{14} 原子数/厘米³。当染料激光器失调量绝对值增加时, 角锥辐射光谱中心波长向长波移动; 而中心弥散光光谱的中心波长向短波移动。两者在热管炉中发光面的线度不断缩小以至消失。

图8是用密度计测得的角锥辐射的中心波长失调量 $\Delta\lambda_c$ 与染料激光失调量 $\Delta\lambda_L$ 的关

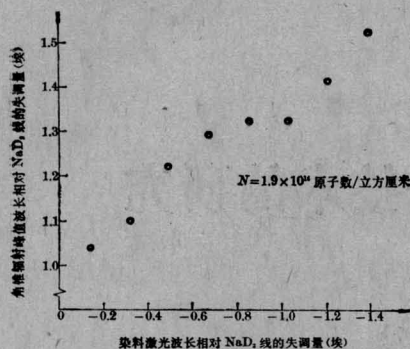


图8 染料激光和角锥辐射峰值波长之间的关系

系,测量时用钠灯 D_1 、 D_2 线作波长标尺。由图可见在我们的实验中不存在[1]中报导过的 $\Delta\lambda_C = \Delta\lambda_L$ 的规律。

染料激光调谐到 D_1 线短波一边时,可得到类似的光谱照片,只是角锥辐射仅出现在一个较小的染料激光失调量范围内。

三、偏振特性

角锥辐射的偏振方向与入射染料激光偏振方向相同,未发现有垂直方向偏振的角锥辐射。

讨 论

一、由以上描述的角锥辐射的各种特性可以得出结论,我们观察到的与 C. H. Skinner 等人在 Ba 蒸气中观察到的角锥辐射是属于同一类物理现象。不同的地方是,除了上面曾指出的在 Na 蒸气的情况下不存在 $\Delta\lambda_C = \Delta\lambda_L$ 的规律外,角锥辐射出现时的原子密度和染料激光失调量都比 Ba 蒸气情况低约一个量级。

角锥辐射或许是一定条件下,一个近共振激光通过气态介质传播时的普遍现象。由于钠原子的光谱数据已为人所知,进一步仔细地研究钠蒸气的角锥辐射,可能会有助于这一现象本质的揭露。

二、自观察到这一现象的一开始^[1],人们就想到角锥辐射特性似乎反映了非线性混频过程的相位匹配条件,推测角锥辐射是一

个四波混合的结果。但是一个致命的问题是,除了染料激光外,找不到其它参与四波混合的光场。C. H. Skinner 等人从紫外直到远红外千方百计去寻找这一光场而毫无结果。我们认为角锥辐射是近共振激光激发的现象,如果存在参与该过程的其它光场,它也在近共振的频谱范围内出现。但在这个范围内,我们没有探测到任何可能参与过程的其它光场。

附注:本文完稿寄出后,我们陆续看到了一些有关角锥辐射的实验和理论工作的报导。实验工作有 G. Brechignac 等人^[4] 在铯蒸气中; Y. E. Meyer^[5] 和 D. J. Harter 等人^[6] 在钠蒸气中观察角锥辐射的报导。Y. E. Meyer 在 300°C 以下观察到的现象与本文报导的类似。我们注意到他也观察到 $\Delta\lambda_C \neq \Delta\lambda_L$ 的规律。但他的文章没有报导详细的结果和实验数据,我们无法与之比较。D. J. Harter 等人报导了钠 D_2 线附近角锥辐射的光谱和角锥半角变化的实验数据。这些基本特性和我们的结果相似,但是,他们是在更高的原子密度($10^{15} \sim 10^{16}$ 厘米⁻³)和更大的激光失调量(1.5~3 Å)上观察到角锥辐射,角锥半角也大些(2~6°)。有关角锥辐射的理论工作 M. Leberre-Rousseau 等人^[7] 的看法是:原子系统受近共振激光激发,会在原子共振频率处产生一个瞬态的辐射场,它与入射激光四波混合产生了角锥辐射。但是,在我们实验中和大多数报导中^[1,5,6] 都未探测到这个瞬态辐射场。D. J. Harter 等人提出了一个 Rabi 边带四波参量放大的理论。基于这一理论,他们解释了角锥辐射的一部份实验事实,如角锥辐射半角与原子密度和入射激光失调量的关系。但是有关角锥辐射的其它实验结果仍得不到合理的解释。

参 考 文 献

- [1] C. H. Skinner *et al.*; *Phys. Rev.*, 1980, **A21**, 151.
- [2] 邹英华等;《激光》,1980, **7**, No. 2, 20.
- [3] R. B. Miles *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1973, **QE-9**, 470.
- [4] G. Brechignac *et al.*; *Opt. Commun.*, 1980, **35**, 87.
- [5] Y. E. Meyer; *Opt. Commun.*, 1980, **34**, 439.
- [6] D. J. Harter *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1981, **46**, 1192.
- [7] M. Leberre-Rousseau *et al.*; *Opt. Commun.*, 1981, **36**, 31.