

用激光感应荧光法测量钇原子束中的原子速度分布

杜清 朱利洲 李世芳 熊夏幸 周志尧 林福成

(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 本文用激光感应荧光法测量了钇原子束的速度分布曲线。其最可几速度为 820 m/s, 速度分布半宽度为 510 m/s。由等熵关系, 估计此时钇原子源的温度为 1587 K。

关键词: 激光感应荧光, 速度分布, 钇原子束

Measurement of velocity distribution of atoms in an yttrium atomic beam by using laser induced fluorescence

Du Qing, Zhu Lizhou, Li Shifang, Xiong Xiaring, Zhou Zhiyao, Lin Fucheng

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: The velocity distribution of atoms in an yttrium atomic beam was measured by using laser induced fluorescence. Its most probable velocity was 820 m/s and the FWHM was 510 m/s. The temperature of the yttrium atomic source was estimated to be 1587 K from the iso-entropic relation.

Key words: laser induced fluorescence, velocity distribution, yttrium atomic beam

原子束中原子的速度分布是原子束诊断的一个重要内容, 可为研究原子的碰撞过程提供基本的数据。最常用的方法是利用机械斩波器来分析速度分布或选择一特定速度的原子群。激光器的发展提供了探测原子速度的新方法, 其分布曲线可通过 Doppler 频移的感应荧光而获得。已经证明这种激光感应荧光法较机械斩波法测量更为方便, 且分辨率更高, 尤其是对超声速的束流^[1, 2]。

本文报道了用这种方法测量钇原子束的速度分布。由得到的速度分布曲线拟合分布函数, 得到与 Kantrowitz-Grey 公式相同的结果, 在近似条件下由实验数据可定出钇原子源的一些参量。

一、束流的基本性质

1.1 热力学描述

从真空度较低的静滞热库通过一狭缝喷向真空度较高区域的原子, 经膨胀后形成一束稳定流动的原子束。在这过程中, 原子与外界基本上没有热交换, 可视为等熵膨胀。准静态的实

收稿日期: 1988年12月5日。

• 本工作系国家自然科学基金资助项目。

现是通过原子间的碰撞完成的。在热传导模型中考虑平行和垂直于束流流线的方向有不同的速度分布,用两个不同的平动温度 T_{\parallel} 和 T_{\perp} 来分别描述^[3],它们经碰撞弛豫耦合趋近于平均温度。随着膨胀的继续,温度、原子密度和碰撞率都随离源的距离下降。直至某一点,这些效应可以忽略不计,此时可认为原子束已经基本上变成了自由原子流,即不存在碰撞。则 T_{\perp} 按离源距离的平方倒数下降,趋于零;而 T_{\parallel} 则“冻结”于极限温度 T_T 处,不再变化 (Sudden Freeze Model)^[4]。

在连续等熵膨胀中,能量守恒给出静滞热库焓 H_0 (也称为驻点焓) 与流场某处的定向质心流动的动能 $\frac{1}{2} mu^2$ 之间的关系^[5]。

$$H_0 = H + \frac{1}{2} mu^2 \quad (1)$$

其中 $H = PV + u$ 是此处的剩余焓, u 是内能, P 是压强, V 是体积。

记定压比热为 C_p , 热库温度为 T_0 , 此处沿束流流线的温度为 T 。得到

$$C_p T_0 = C_p T + \frac{1}{2} mu^2 \quad (2)$$

$$T = T_0 \left[1 + \frac{1}{2} (\gamma - 1) M^2 \right]^{-1} \quad (3)$$

其中 $M = u/a$ 是此处的马赫数, $a = [\gamma KT/m]^{1/2}$ 是此处的声速, γ 是气体定压比热 C_p 与定容比热 C_v 的比值, K 是玻耳兹曼常数, m 是原子的质量。

在极限温度处, 则有

$$T_T = T_0 \left[1 + \frac{1}{2} (\gamma - 1) M_T^2 \right]^{-1} \quad (4)$$

此时, $M_T = u_T/a_T$, 其中的量都是极限温度处的值。

1.2. 速度分布

Kantrowitz-Grey 给出经准直后的束流在远离源处的沿束流流线方向的速度分布^[6]:

$$f_n(v) = N_n v^n \exp[-m(v - u_T)^2 / 2KT_T] \quad (5)$$

其中, N_n 是归一化常数。 $n=2$ 相应于密度的速度分布, $n=3$ 是通量密度的速度分布, $n=5$ 则是能量的速度分布。

1.3 测量原理

实验中, 光电倍增管接收来自一个固定区域中的原子散射的荧光信号, 多普勒位移使得对应于一个激光频率, 只有某一个速度的原子发生共振散射, 从而得到的信号正比于这个固定空间区域中所有这个速度的原子的贡献, 所以用激光感应荧光法测量的是原子密度的速度分布, 即信号为

$$f_2(v) = N_2 v^2 \exp[-m(v - u_T)^2 / 2KT_T] \quad (6)$$

或用 M 表示为

$$f_2(v) = N_2 v^2 \exp \left[-\gamma M_T^2 \left(\frac{v}{u_T} - 1 \right)^2 / 2 \right] \quad (7)$$

而 Doppler 效应给出频率差:

$$\Delta\nu = \nu_{res} - \nu = \nu_{res} v \cos \theta / C \quad (8)$$

$$v = \lambda_{res} \Delta\nu / \cos \theta \quad (9)$$

其中 $\nu_{res} = c/\lambda_{res}$ 是静止原子的共振频率, ν 是速度为 v 的原子的共振频率, θ 是激发光与束流之间的夹角。本实验中, 激光与原子束严格共线, 则 $\theta = 0$, 所以原子的速度为

$$v = \lambda_{res} \Delta\nu \quad (10)$$

二、实验测量

实验装置如图 1 所示。

实验是用电子枪加热金属钇, 产生钇原子蒸气。它们经 $3.5 \times 9 \text{ mm}^2$ 长方形狭缝和 $\phi 8.5 \text{ mm}$ 圆形光阑准直后形成束流, 其发散角约为 10 mrad (准直狭缝与准直光阑间的距离为 20 mm)。

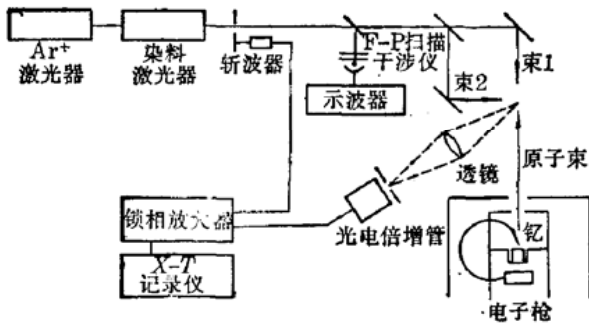


图 1 实验装置图

束 1 是探测光束, 束 2 是参考光束

用 Ar^+ 激光器泵浦的连续可调单模染料激光器输出的激光作为激发源。该激光器可在稳频后作 30 GHz 的连续频率扫描, 输出功率约为 100 mW 。

测量中将激光分成两束: 一束与钇原子束垂直, 作为参考光, 提供钇原子的共振激发频率标准; 另一束与原子束共线反向传播, 作为探测光, 利用 Doppler 频移效应选择性地激发某种速度的钇原子。在与这两束光垂直的方向用光电倍增管通过透镜 L 接收激光与原子束共振相互作用产生的荧光, 送入锁相放大器放大, 由 $X-T$ 记录仪记录。激光扫描的频率, 用共焦 F-P 扫描干涉仪标定, 其自由光谱程是 2 GHz , 线宽为 10 MHz 。

测量中, 激光在真空室壁散射引起较大的杂散光背景。采取一系列措施, 使得背景信号减小到最小, 其信噪比可达 100。

实验中, 我们还从主激光束中分出约 10% 功率的激光束来激发钇-氩空心阴极放电灯中的钇原子, 并比较了它们的跃迁频率及线型。

三、结果与分析

实验测量了电子枪加热功率为 420 W 时的速度曲线, 如图 2 所示。

其共振跃迁频率为 602.511 nm , 线宽为 140 MHz 。这主要来源于钇原子的超精细结构分裂(四条跃迁谱线, 其频率差依次为 76 MHz 、 114 MHz 和 189 MHz , 其中 76 MHz 和 114 MHz 为强线), 束流的发散角很小, 即在探测区中束流已处于“冻结”状态。

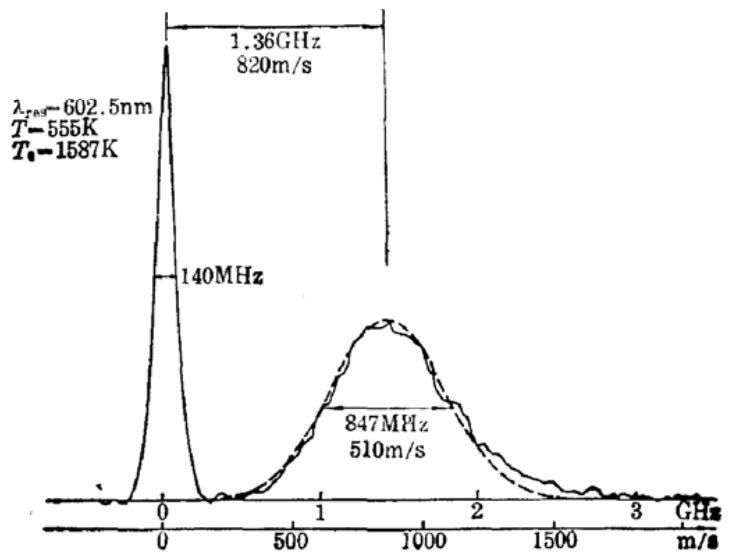


图 2 钇原子束中原子的速度分布
其中实线是实验曲线, 虚线是拟合曲线

Doppler 频移谱线的峰值与共振线之间的频率间隔为 1.36 GHz, 则峰值速度为 $v_p = 820$ m/s, 分布的半宽度为 510 m/s。

图 2 也给出了用函数

$$y = Cx^2 \exp[-B(x-1)^2] \quad (11)$$

拟合所得的曲线。参数为 $C = 1.20$, $B = 4.65$ 。故此曲线的极大点为

$$x_{\max} = 1/2 + \sqrt{1/4 + 1/B} = 1.18$$

对应于(7)式的分布, 有 $v_p/u_T = x_{\max} = 1.18$, 所以极限流速 $u_T = 695$ m/s。

由 $\gamma M_T^2/2 = B = 4.65$, 得极限马赫数 $M_T = 2.36$ (已设 $\gamma = 5/3$)。由 $a_T = u_T/M_T = [\gamma K T_T/m]^{1/2}$, 得极限温度 $T_T = 555$ K。把 T_T 和 M_T 代入(4)式得到静滞热库温度 $T_0 = 1587$ K。

为了说明我们所用公式的正确性, 采用 Ashkenas 和 Sheman 的结果^[7], 来进一步分析钇原子束是否已达到“冻结”状态。他们给出关于马赫数随离源距离 L 的变化关系为

$$M = A \left[\frac{L - L_0}{D} \right]^{\gamma-1} - \frac{1}{2} \left[\frac{\gamma+1}{\gamma-1} \right] / A \left[\frac{L - L_0}{D} \right]^{\gamma-1} \quad (12)$$

对于 $\gamma = 5/3$, 由实验所得到的常数为 $A = 3.26$, $L_0/D = 0.075$, 其中 D 是准直狭缝的长度。

当 $M = 2.36$ 时, $L/D \approx 1.0$, 即在离准直狭缝 $L = D \approx 9$ mm 处原子已达到了马赫数为 2.36 的超声流速。本实验探测区离准直狭缝距离为 80 mm, 而马赫数仍为 2.36, 从而证实了在探测区原子的确已达到“冻结”状态。

从图 2 还可知, 理论拟合的曲线与实验曲线在很大范围内很好地符合。但是在曲线的尾部, 出现较大的偏差。对 Maxwell 速度分布的这种偏离可能是由于对等熵膨胀中复杂的冷却过程作了简化考虑 (Sudden Freeze Model) 所引起的。更为准确的拟合函数是^[8]

$$f(v_f) = f^0(x_f) [1 + v_f H_4(x) + \dots] \quad (13)$$

其中 $x_f^2 = mv_f^2/2KT_f$, $H_4(x)$ 是第四阶厄米多项式, $f^0(x_f)$ 是 Maxwell 分布。平行速度 v_f 是和流速相关的, v_f 则是一参数。

图 3 给出了钇-氦空心阴极放电灯中放电电流为 $I = 17.5$ mA 时测得的线型。其峰值频率为 602.511 nm, 与原子束中测量的跃迁中心频率几乎一致。图 3 中还给出了与高斯函数 $P_0(v)$ 拟合所得的结果, 其拟合温度 $T = 557$ K。两曲线符合得很好。

最后讨论一下实验的误差。这主要来自钇原子的超精细结构分裂 $\Delta\nu_{HF}$ (约 100 MHz), 相当于速度不确定性 $\delta v = \Delta\nu_{HF} \cdot \lambda_{res} \approx 60$ m/s。探测光

与原子束的夹角 θ , 在实验中可能的最大误差约 $\theta = 3$ mrad, 其造成的误差可忽略不计。激光功率的起伏 (约 3%) 和激光线宽 (约 2 MHz) 的误差也可忽略。

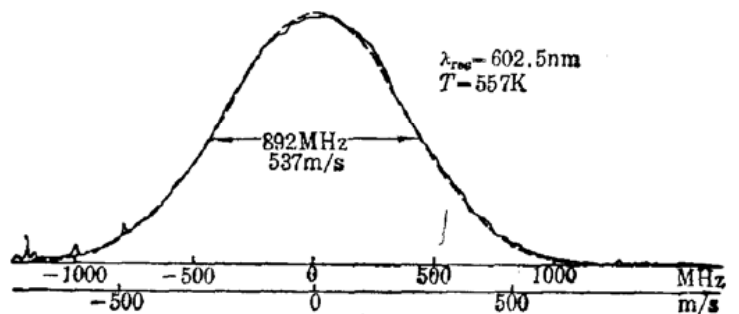


图 3 钇-氦空心阴极放电灯中钇原子的速度分布
其中实线是实验曲线, 虚线是拟合曲线

参 考 文 献

- 2 K. Bergmann *et al.*, *Appl. Phys.*, **8**, 65(1975)
- 3 B. B. Hamel *et al.*, *Phys. Fluids*, **9**(5), 829(1966)
- 4 J. B. Anderson *et al.*, *Phys. Fluids*, **8**(5), 780(1965)
- 5 H. Haberland *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **56**(9), 1712(1985)
- 6 A. Kantrowitz *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **22**(5), 328(1951)
- 7 H. Ashkenas *et al.*, 4th RGD, **2**, 84(1964)
- 8 C. E. Klots, *Chem. Phys.*, **67**, 75(1982)

第十届全国激光学术报告会在呼和浩特市召开

1990年7月25~28日在呼和浩特市召开了全国第10届激光学术报告会暨纪念激光器诞生30周年。这次会议是由中国光学学会激光专业委员会、中国光学行业协会和中国电子学会量子电子学与光电子学学会联合举办的。240多名科学家出席了会议。

会议收到论文518篇,经过节目委员会的评审,录取了253篇论文。其中属于激光器与激光技术的116篇,约占45%,激光基础理论研究的75篇,约占30%,激光应用62篇,约占25%。激光器件方面的论文报告以CO₂激光器和Nd³⁺:YAG激光器居多,华中理工大学和中国科学院上海光机所报告的连续波千瓦CO₂激光器和5kWCO₂激光器,代表了我国CO₂激光器的研究水平。在激光技术应用方面,主要有激光加工(打孔、切割、检测)、激光信息处理、激光医疗和激光育种方面的报告,其中激光育种受到不少代表的注目,山东、浙江、江苏、四川等省科学家采用激光技术育出水稻、小麦、茶树等新品种,内蒙古农牧学院用激光技术提高家兔、山羊、牛等家畜精液品质,都引起大家的兴趣。报告过后还特地举行了讨论会,交流了我国激光在农业应用上的现况,以及就如何进一步更好地开展这个领域的研究提出了建议。

(纪 钟)

第四届全国激光医学学术交流会在株州市召开

由中国光学学会激光医学分科学会主办的第四届全国激光医学学术交流会于1990年10月10~13日在湖南省株州市召开,来自全国27个省市的近400名代表参加了会议。大会共收到论文450篇左右。大会期间,共分6个专题组对激光在五管科、妇科、外科、皮肤科、心血管等领域以及激光+HPD、激光内窥镜、弱激光的应用进行了交流,在分组会上共宣读了180多篇论文。

从本次会议可以看到,我国的临床激光医学在大范围普及的基础上,在继续探索激光动力学诊治肿瘤的同时,又有较多的医务人员和科技工作者向心血管、脑方面挺进,并已取得了令人瞩目的成绩。在激光显微外科方面,已在探索微小血管、神经、肌腱等的激光缝合;光动力学诊治白血病、膀胱癌、消化道癌等方面也取得了可喜的成绩,激光内窥镜的使用、HPD同位素标记等也达到了相当的水平。据专家们估计,我国的激光医疗大部分处于80年代中期的国际水平,某些领域已达到80年代后期的国际水平。

大会期间,还举办了小型激光医疗器械展览,有近20家工厂展出了20多台YAG、CO₂、He-Ne等医疗仪,这些仪器正在向小型化、便携式、多功能发展。

(吉 未)