

利用共振光压偏转原子束的方法 测量原子束速度的分布

王育竹 程与旦 周善钰 黄维刚 刘亮

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文报道利用共振光压偏转原子束的方法测量原子束速度的分布。给出了理论分析与实验结果。

Velocity distribution measurement of atomic beams by means of atomic beam deflection under resonance light pressure

Wang Yuzhu, Cheng Yudan, Zhou Shanyu, Huang Weigang, Liu Liang

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

Abstract: The measurement is reported of the velocity distribution in an atomic beam by means of atomic beam deflection under resonance light pressure. Both theoretical analysis and experimental results are given.

一、引言

原子束速度分布是应用原子束研究物理或化学问题时必然涉及的基本参量。通常采取机械分离器来分析速度分布^[1], 近年来光谱方法测量已受到重视^[2]。

我们在多光束偏转原子束^[3]的实验基础上, 用光学多道分析仪探测激光诱导原子束荧光, 很好地测得偏转原子分布。从而提出共振光压偏转原子束的方法测量原子束速度分布。

二、测量原理

在图1中, 入射光束及平面镜 m_2 反射

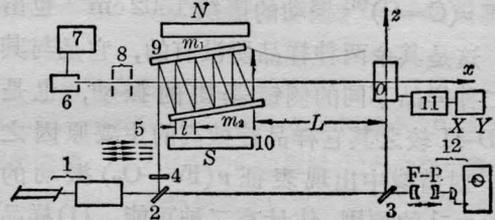


图1 实验装置示意图

1—可调谐激光器; 2, 3—分光镜; 4— $\lambda/4$ 片; 5—衰减片组; 6—钠炉; 7—控温和测温系统; 8—准直器; 9—平行平面镜; 10—磁场; 11—OMA, 探测系统; 12—频率监测器

出的光束均与原子束垂直相交, 当激光频率调谐到原子共振频率时, 它们对原子施加辐射压力。而平面镜 m_1 反射出的光束不与原子束垂直, 由于多普勒频移, 它们不与原子束

收稿日期: 1984年10月10日。

相互作用。在共振光压的作用下原子束发生 z 向偏转。

一个沿 x 方向运动, 速度为 v 的原子与 N_0 个光束作用, 并经过 L 长度的自由飞行区后, 在 z 方向的总平均偏转量为^[3]:

$$\langle z_{N_0} \rangle = \frac{\hbar K d N_0 f}{2\tau m v^2} \left[\frac{l}{2} (N_0 - 1) + L \right] \quad (1)$$

式中 τ 为原子激发态寿命, d 为光束直径, l 为作用光束间的距离, f 因子在两能级原子系统中可表示为:

$$f = ST_{(\Delta\nu)} / [1 + ST_{(\Delta\nu)}] \quad (2)$$

这里 S 为饱和参数, $T_{(\Delta\nu)}$ 为失谐因子。假设有沿 x 轴方向理想准直原子束, 它的速度分布为 $j(v)$ 。速度在 v 到 $(v+dv)$ 的原子数为 $n(v) = j(v) dv$, 而速度为 v 的原子将偏转到 $z(v)$ 处。设原子沿 z 轴的分布函数为 $g(z)$, 则有:

$$j(v) dv = g(z) dz \quad (3)$$

由(1)式中 z 和 v 的关系, 可得:

$$g(z) = \frac{1}{2B} \left(\frac{B}{z} \right)^{3/2} j\left(\sqrt{\frac{B}{z}}\right) \quad (4)$$

原子束在多光束作用下:

$$B = \frac{\hbar K d N_0 f}{2\tau m} \left[\frac{l}{2} (N_0 - 1) + L \right] \quad (5)$$

实际上, 原子束在没有同光束作用的时候就具有一定的截面形状。设原子在 z 向的原始分布为 $F(z)$, 那么原子束在多光束共振光压作用下偏转时, 原子在 z 向的分布应表示为:

$$G(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2B} \left(\frac{B}{t} \right)^{3/2} j\left(\sqrt{\frac{B}{t}}\right) F(z-t) dt \quad (6)$$

共振光压下偏转的原子 z 向分布 $G(z)$ 、原子束形状 $F(z)$ 和原子束速度分布 $j(v)$ 的关系由卷积式(6)确定。

三、实验测量

利用共振光压偏转原子束的方法测量原子束速度的实验装置如图1所示。激光在两个高反射率的平行平面镜之间形成16个作用光束。钠原子束经准直器后发散角小于

2×10^{-3} rad。原子束的偏转和测量是在真空度为 4×10^{-6} Torr 的真空室中进行的。

由氩离子激光器泵浦的环型染料激光器, 单模运转, 线宽约 30 MHz。实验中用 F-P 扫描干涉仪监视激光频率漂移。波长为 5890 Å, 经 $\lambda/4$ 片形成圆偏振的作用光, 并在偏转作用区加上磁场。将钠原子从 $3S_{1/2}(F=2)$ 态激发到 $3P_{3/2}(F'=3)$ 态, 构成一个准两能级原子系统, 避免了光抽运效应^[4]。

为了使各种速度的原子都受到共振光压的偏转作用和得到激光诱发荧光的检测, 必须要求作用激光束、检测激光束都跟原子束垂直相交。实验中用 He-Ne 激光模拟原子束, 采取光学仪器调整, 并用光阑对光束定位, 使得作用激光和检测激光均跟原子束严格保持垂直相交, 角度偏差小于 $10'$ 。

以 O 点为中心, 沿 z 轴安置探测器。在激光频率调到钠原子共振频率时, 在二平行平面镜之间呈现出钠原子的十六个荧光点。偏转了的原子经探测激光诱导发出的荧光, 经相机镜头组以 1:2.15 的比例, 成像到光学多道分析仪的感受器上。衰减片组由四片滤光板组成, 它们对 5890 Å 激光的透射率分别为 90%、80%、67%、40%。滤光板以不同的组合方式插入光路, 可以获得多种光强的作用光束。图2表示, 在四种不同实验条件下, 记录的原子束偏转后原子的分布。曲线 O 为无偏转作用光照射时原子束的原始 z 向分布。值得注意的是曲线 4, 它所记录的偏转原子分布最大值所对应的偏转量为 7.74 mm。偏转角为 1×10^{-2} rad。

根据实验参数 $d=0.2$ cm, $l=0.56$ cm, $L=68$ cm, $N_0=16$, $T=700$ K, $I=4$ mW, 利用测得的曲线 O 和曲线 2 代入(6)式进行数值计算, 得到了实验和理论的热原子速度分布, 如图3所示。容易看出慢速原子数减小了。相应地如果假设:

$$j(v) = \frac{2}{A} \left(\frac{v}{A} \right)^3 \exp\left(-\frac{v^2}{A^2}\right) \quad (7)$$

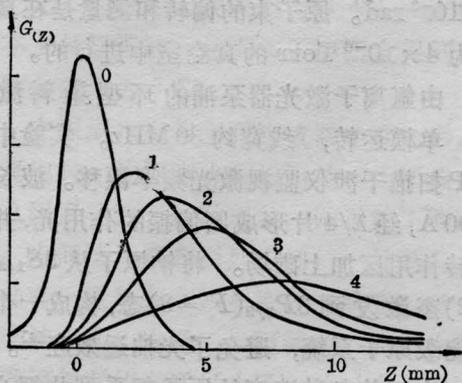


图2 原子的 z 向分布

0—原子束的原始 z 向分布; 1— $f=0.15$;
2— $f=0.24$; 3— $f=0.39$; 4— $f=0.55$

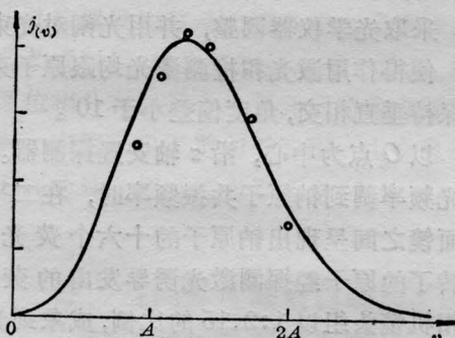


图3 原子速度分布

曲线为热原子束速度分布理论函数; ○——实验值

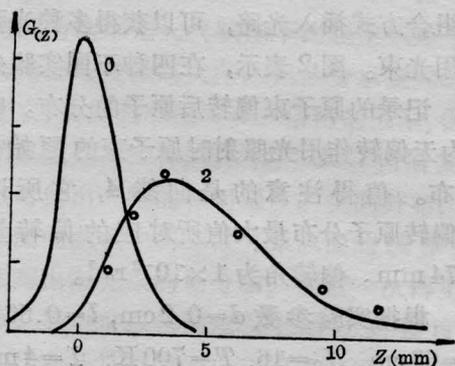


图4 原子 z 向分布的比较

○——理论值

这里 $A = (2kT/m)^{1/2}$, 代入(6)式, 所得的偏转原子 z 向分布与实测曲线见图4。在计算结果中, 大偏转量的原子比实际测到的占有更多的比重。

四、结果讨论

实验表明, 利用共振光压偏转原子束的方法能够测量原子束速度分布。尤其是在分析速度大于 $(2kT/m)^{1/2}$ 的原子的时候, 会取得较好的结果。本实验中, 测得原子束偏转量为 7.74 mm, 是所有同类实验中可达到的最大偏转量。表明多光束偏转原子束可以成为研究光谱和分离同位素的有效工具, 且在偏转实验同时不难得到原子束速度分布参数。

利用共振光压偏转原子束的方法测量原子束速度分布, 测量误差主要来自三个方面:

1. 原子在偏转过程中, 飞行方向不能始终与激光束保持严格的垂直, 由于多普勒频移, 频率失谐量变大, 这对于偏转角较大的慢速原子影响较大, 它们不能到达预期的偏转值, 或者在检测时激发几率减小。总之由探测荧光强度推出原子束速度分布函数是容易丢失慢速原子数的。如果增加激光功率, 使饱和参数 $S \gg 1$, 那么由于原子吸收线宽 $\Delta\nu_N \sqrt{1+S}$ 变大, 这项误差可以减小。

2. 在(6)式中考虑了原子束初始 z 向分布 $F(z)$, 而忽略原子束的初始发散角。粗略分析一下, 原子飞行方向应该是原始发散角和偏转角迭加决定的。因此, 对于发散角大的原子束, 这种忽略会造成较大偏差。

3. 激光频率不稳定, 引起 f 值的瞬间变化, 直接影响偏转原子的 z 向分布。

作者感谢周汝枋、赵家铭、倪国权、王长生等同志给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] J. P. Toennies; In *Chemische Elementarprozesse*, ed. by H. Hartmann (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1968).
- [2] R. J. Gordom *et al.*; *J. Chem. Phys.*, 1971, **54**, 2393. K. Bergmann; *Appl. Phys.*, 1975, **8**, 65.
- [3] 王育竹等;《中国科学》, (A), 1984, No. 5, 467.
- [4] M. L. Citren; *Phys. Rev.*, 1977, **A16**, 1507. В. И. Балыкин и др.; *Письма в ЖЭТФ*, 1979, **29**, 614.