

# 共振光压作用下单一速度原子束的偏转

王育竹

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

近年来,研究粒子在辐射场作用下的运动很受人们的重视,因为这些研究成果可用于物理学<sup>[1]</sup>、激光光谱学<sup>[2~5]</sup>和其它一些科技领域<sup>[6]</sup>的研究工作中。本文提出利用原子束在共振光压作用下偏转的原理,获得近于单速原子束偏转的方法,并建议利用单速原子束的偏转分析原子束中速度的分布,测量原子激发态寿命和检验光子动量传递过程的统计理论<sup>[4,7]</sup>。

我们考虑一个二能级原子束沿  $x$  方向的运动,激光垂直照射原子束,如图 1 所示。当激光频率等于原子跃迁频率时,原子吸收光子而获得动量,然后自发辐射放出光子而获得反冲。经过  $n$  次自发辐射光子后,原子在  $z$  方向的动量为

$$P^{(z)} = n\hbar k + \sum_{i=1}^n \hbar k_i^{(z)}, \quad (1)$$

$\hbar$  是普朗克常数,  $k = \omega/c$  是传播常数,  $\omega$  是光波频率,  $c$  是光速。 $\hbar k_i^{(z)}$  是第  $i$  次自发辐射时反冲在  $z$  方向的分量。由于  $\langle k_i^{(z)} \rangle = 0$ <sup>[4]</sup>, 原子在  $z$  方向的平均动量为

$$\langle P^{(z)} \rangle = \langle n \rangle \hbar k. \quad (2)$$

若原子运动速度为  $v$ , 在  $x$  方向的动量为  $P^{(x)} = mv$ , 则原子经激光照射后, 其平均偏转角  $\langle \theta \rangle$  等于

$$\langle \theta \rangle = \langle P^{(z)} \rangle / P^{(x)} = \langle n \rangle \hbar k / mv, \quad (3)$$

这里  $m$  为原子质量, 并假定偏转角很小。原子飞经距离  $L$  后, 其平均偏转量  $\langle z \rangle$  为

$$\langle z \rangle = \langle \theta \rangle \cdot L = \langle n \rangle \hbar k L / mv. \quad (4)$$

根据 Cook 关于光子动量传递的理论<sup>[4]</sup>

$$\langle n \rangle = \frac{\beta \Omega^2 t}{2(\Delta^2 + \beta^2 + \Omega^2/2)},$$

式中  $t$  是原子受激光照射时间,  $t = D/v$ ,  $D$  是激光照射区,  $\Omega$  是共振 Rabi 频率,  $\beta = A/2$  半爱因斯坦系数,  $\Delta = \omega - \omega_0$  是激光场频率与原子共振频率的失谐。当激光场很强, 并且光场频率等于共振频率, 即  $\Omega^2 \gg \beta^2$  和  $\Delta = 0$

$$\langle n \rangle = t/2\tau, \quad (5)$$

式中  $\tau$  是原子激发态寿命。将(5)式代入(4)式, 得原子的平均偏转量  $\langle z \rangle$  为

$$\langle z \rangle = \frac{\hbar k L t}{2\tau m v}, \quad (6)$$

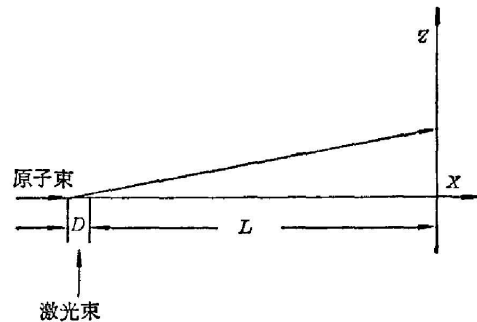


图 1

从上式可知,平均偏转量与光照时间成正比。

设原子束通过  $N_0$  个周期排列的激光场,如图 2 所示。图中  $D$  为光照区域, $L$  为飞行区长度。激光强度是以脉冲形式调制,调制周期为  $T_0$ ,激光照射时间为  $\tau_0$ 。如果选择  $T_0$  和  $\tau_0$  满足下列条件

$$v_0 T_0 = D + L, \quad v_0 \tau_0 = D, \quad (7)$$

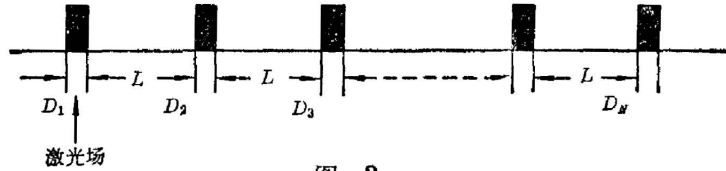


图 2

则速度为  $v_0$  的原子就可与激光脉冲在各光场上同步地出现,此时,原子受到  $N_0$  个光场的作用,其平均偏转量为最大。当原子的速度  $v > v_0$  或  $v < v_0$  时,原子就较激光脉冲出现得早一些或迟一些,因此原子在各光场中受到光照的时间逐渐减少,偏转量也逐渐减少。若原子的速度为  $v$ , 经过第  $N$  个光场时受到的光照时间可从图 3 求出为

$$\begin{cases} t_n = \frac{D_n}{v} = \frac{D + (n-1)(D+L-vT_0)}{v}, & (v > v_0), \\ t_n = \frac{D_n}{v} = \frac{v\tau_0 + (n-1)(vT_0 - D - L)}{v}, & (v < v_0), \end{cases} \quad (8)$$

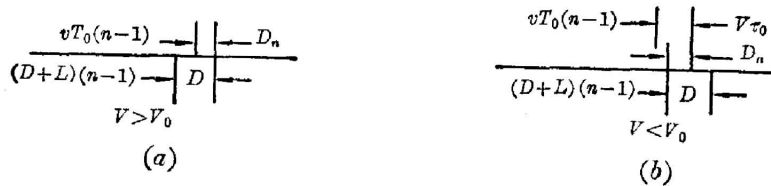


图 3

当原子离开第  $N$  个光场飞经  $L$  后,平均偏转量为

$$\langle z_N(v) \rangle = \frac{\hbar k L}{2\tau m v} \sum_{n=1}^N t_n, \quad (9)$$

若总共有  $N_0$  个光场,总的平均偏转量为

$$\langle Z(v) \rangle = \sum_{N=1}^{N_0} \langle z_N(v) \rangle = \frac{\hbar k L}{2\tau m v} \sum_{N=1}^{N_0} \sum_{n=1}^N t_n. \quad (10)$$

当  $v = v_0$  时,原子的平均偏转量最大,这时

$$\langle Z(v_0) \rangle = \frac{\hbar k L D N_0}{4\tau m v} (1 + N_0). \quad (11)$$

设  $L = 100 \text{ mm}$ ,  $D = 2 \text{ mm}$  和  $N_0 = 5$ , 图 4 表示用计算机计算(10)式所得的结果。从曲线上可以看出,当  $v = v_0(1 \pm 0.005)$  时,偏转量下降 30%。这说明这种方法对速度的选择性很高。由于在原子束中原子是连续流动的,经过脉冲调制的激光场作用下,速度为  $v_0$  的原子受到的光照时间也各不相同,因此,原因将散落 0 至最大偏转量  $\langle Z(v_0) \rangle$  之间。为了获得近于单速原子束的偏转,可采用斩波器将原子束切割成脉冲形式,如图 5 所示,这样,进入光场的原子“脉冲”同时受到光脉冲的照射,并使原子“脉冲”中所有速度为  $v_0$  的原子受到相同的

光照时间, 结果所有速度为  $v_0$  的原子偏转到  $\langle Z(v_0) \rangle$  的位置, 这样, 我们就可得到近于单速原子的偏转。

单一速度原子的偏转可以用来进行多种物理实验。

### 1. 分析原子束中原子速度的分布

改变调制周期  $T_0$ , 就可利用共振光压偏转不同速度的原子, 测量偏转原子的数量, 就可分析原子束中原子速度的分布。

### 2. 测量原子激发态的平均寿命

从(11)式知原子激发态的寿命可表示为

$$\tau = \frac{\hbar k L D N_0 T_0^2}{4 m \langle Z(v_0) \rangle (D+L)^2 (1+N_0)}, \quad (12)$$

式中除  $T_0$  和  $\langle Z(v_0) \rangle$  外, 其它参量都是常量。从实

验中测量出  $T_0$  和  $\langle Z(v_0) \rangle$  即可确定原子激发态寿命  $\tau$ 。 $\tau$  的测量精度主要决定于  $\langle Z(v_0) \rangle$  的测量精度, 而  $\langle Z(v_0) \rangle$  的精度取决于光子动量传递过程的统计性质。根据理论分析<sup>[1]</sup>, 从偏转角的方差可以求出偏转量的误差, 而偏转量的误差也就是寿命  $\tau$  的误差(调制周期  $T_0$  的测量误差, 可忽略不计。), 所以

$$\delta = \frac{\sqrt{\langle (\Delta Z)^2 \rangle}}{\langle Z(v_0) \rangle} = \sqrt{\frac{56\tau}{5t N_0 (1+N_0)^2}}. \quad (13)$$

以 Na 原子为例,  $\tau = 1.6 \times 10^{-8}$ s,  $t = 4 \times 10^{-6}$ s,  $N_0 = 5$ , 则  $\delta = 1.6 \times 10^{-2}$ 。

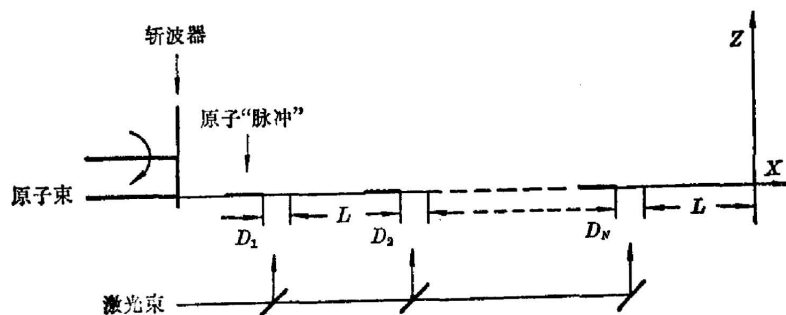


图 5

### 3. 验证光子统计理论

根据 Mandel<sup>[7]</sup> 和 Cook<sup>[11]</sup> 的分析, 光子统计泊松分布的偏离参量  $Q$  为

$$Q = \frac{\langle (\Delta n)^2 \rangle - \langle n \rangle}{\langle n \rangle}. \quad (14)$$

在多光场单速原子束偏转的实验中, 可以导出  $Q$  值的表示式为

$$Q = \frac{M v (1+N_0) \langle (\Delta Z)^2 \rangle}{2 \hbar k L \langle Z(v_0) \rangle} - \frac{7}{5}. \quad (15)$$

通过实验可测量出  $\langle (\Delta Z)^2 \rangle$  和  $\langle Z(v_0) \rangle$ , 即可求出  $Q$  值。因此, 单速原子束偏转的方法可用于精确检验光子统计理论。

以上分析说明, 进行这样的实验似乎是很有价值的。单速原子束的偏转不仅可用于上

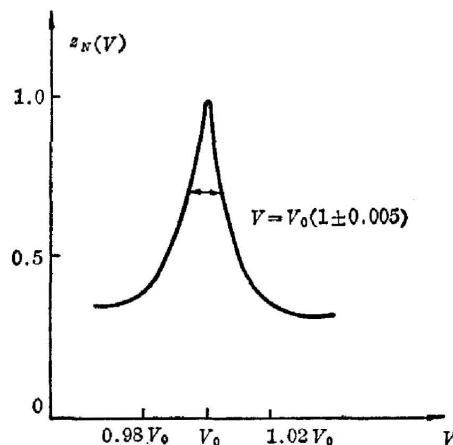


图 4

述实验工作,也可在超窄光谱实验、原子频率标准和其它物理实验中得到应用。

本工作曾在上海光学精密机械研究所激光偏转原子束小组内讨论,并与林福成同志进行过商榷,作者在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] R. J. Cook; *Opt. Commun.*, 1980, **35**, No. 3 (Dec), 347.
- [2] B. C. Лерохов и др.; *ЖЭТФ*, 1977, **72**, No. 4, 1328.
- [3] A. Ashkin; *Phys. Rev. Lett.*, 1978, **40**, No. 12 (20 Mar), 729.
- [4] W. Nevhauser *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1978, **41**, No. 4 (Jul), 233.
- [5] P. Jacquinet *et al.*; *Opt. Commun.*, 1973, **8**, No. 2 (Jun), 163.
- [6] A. F. Bernhart; *Appl. Phys.*, 1976, **9**, No. 1 (Jan), 19.
- [7] S. Mandel; *Opt. Lett.*, 1979, **4**, No. 4 (Apr), 205.

## Monoenergetic atomic beam deflection by resonant light pressure

WANG YUZHU

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

(Received 28 August 1981)

### Abstract

In this paper, a proposal of obtaining near-monoenergetic atomic beam deflection by resonant light pressure is offered. The near-monoenergetic atomic beam deflection may be used to analyse velocity distribution in atomic beams, to measure the life-time of excited states in atoms and to verify the theory of photon statistics.



### 全息和光学信息处理专题讨论会 (1982年 Gordon 研究会分会议)

1982年的 Gordon 研究会于6月21日至25日在 New Hampshire 州召开,分101个专题,在10个不同地点分别举行。有关光学的专题有紫外和可见多光子解离与分解过程、光电导及其有关现象,激光在生物和医学中的应用、分子的电子光谱、全息和光学信息处理、膜层与薄膜的化学与物理等。

出席全息和光学信息处理专题讨论会的科学工作者共113名,除美国外,尚有加拿大、日本、瑞典、西德、和荷兰等国家的科学家。5名在美的中国访问学者和留学生出席了这次会议。本届会议主席是 Rochester 大学光学研究所的 Nicholas George, 分会执行主席有 E. Leith, A. W. Lohmann, B. Guenther, J. C. Wyant, S. A. Beuton, John A. Neff, Keith Bromley, M. Lohmann, R. E. Brosks 等人担任。

大会报告19篇,其中全息和光学方法处理3篇,实时器件8篇,光学计算机2篇,基础理论4篇,其他方面2篇。可见实时器件是这次会议的重点。大字报交流报告20篇,其中13篇是光学方法信息处理。大会报告的题目如下:

A. W. Lohmann; "The role of higher order correlations in optical information processing"

(下转第563页)