

# 钇原子亚稳态寿命的测量

杜 清 李世芳 周志尧 朱利洲 林福成

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

利用基态原子无穷长的寿命以及亚稳态原子在飞行过程中的衰减,比较由激光感应荧光法测量到的钇原子束基态和亚稳态的速度分布曲线,经过拟合处理计算,得到钇原子亚稳态  $a^2D_{5/2}$  的寿命为  $(0.8 \pm 0.2) \text{ms}$ 。

关键词: 亚稳态原子的寿命,原子束的速度分布,钇原子。

## 一、引 言

原子的亚稳态寿命是原子光谱的重要内容之一。对于原子的亚稳态寿命的测量,前人一般都采用束箔激发结合飞行时间测量技术,但这些实验均在有强烈碰撞背景的放电管或原子蒸汽室里进行,因此由碰撞效应的影响使得测量值比真实寿命短,在测量寿命较长的亚稳态时,影响就更大。为了避免这种误差,本文在研究超声速的束流的基础上<sup>[1,2]</sup>,利用基态原子无穷长的寿命以及亚稳态原子在飞行过程中的衰减,比较测量得到的原子基态和亚稳态的速度曲线,成功地进行了测量钇原子较长的亚稳态寿命的实验,并且得到了有价值的结果。

## 二、原 理

用激光感应荧光法测量原子束中原子速度分布的基本原理,是利用原子束与激光束相互作用时的多普勒频移效应,使得对应于一个激光频率,只有某一个速度的原子群被共振激发。用光电倍增管接收来自一个固定空间区域内的荧光信号、扫描激光频率,即可依次共振激发所有速度的原子群。在记录纸上就得到了原子的速度分布曲线。

用这种方法得到的信号是原子密度的速度分布,即:

$$f_g(v) = N_g v^2 \exp\left[-\frac{\gamma M^2}{2} \left(\frac{v}{u} - 1\right)^2\right], \quad (1)$$

其中  $N_g$  是归一化常数,它与跃迁的原子能级、振子强度以及探测器的效率等因素有关, $v$  是原子的速度, $\gamma$  是气体的绝热指数, $M$  是束流的马赫数, $u$  是束流的流速。因为可以认为基态原子的寿命是无穷长的,在从束源区飞行到探测区期间并不发生衰减,所以(1)式即被考虑为基态原子的速度分布。

对于亚稳态原子的情形、假定在束源喷口处其速度分布与基态原子的相同,但其寿命是有限长的,因此在飞行过程中要发生衰减。可以近似地把这种衰减考虑为是在(1)式的分布

中叠加了一项衰减,即亚稳态原子密度的速度分布为:

$$f_m(v) = N_m v^2 \exp\left[-\frac{\gamma M^2}{2}\left(\frac{v}{u}-1\right)^2\right] \cdot \exp\left(-\frac{L}{v\tau}\right), \quad (2)$$

其中  $N_m$  是归一化常数,  $L$  是从束源区到探测区的长度, 即原子飞行的距离,  $\tau$  是亚稳态的寿命, 其余符号同(1)式。

值得一提的是, (1)、(2)两式均没有考虑超精细结构分裂的影响。钇原子的核自旋  $I = \frac{1}{2}$ , 因此对应于每个精细结构跃迁, 包含了四条超精细结构跃迁的谱线, 以下分别称之为  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  线。设任意一个超精细结构跃迁产生的激光感应荧光的强度分布函数为  $f(\nu_0, \nu)$ ,  $\nu$  为激光频率,  $\nu_0$  为该超精细结构跃迁频率。事实上, 因  $f(\nu_0, \nu)$  是速度分布函数, 所以根据多普勒频移公式,  $f(\nu_0, \nu)$  只是  $\nu - \nu_0$  的函数。如果忽略各超精细结构能级间的光泵效应, 则总的信号强度分布为:

$$g(\nu) = O_a f(\nu - \nu_a) + O_b f(\nu - \nu_b) + O_c f(\nu - \nu_c) + O_d f(\nu - \nu_d). \quad (3)$$

其中  $\nu_a$ 、 $\nu_b$ 、 $\nu_c$ 、 $\nu_d$  分别为超精细结构跃迁  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  线的共振频率,  $O_a$ 、 $O_b$ 、 $O_c$ 、 $O_d$  分别为与对应跃迁的发射强度和振子强度有关的常数。将(3)式右边的函数重新选取统一的参考点, 并做级数展开, 得到:

$$\begin{aligned} g(\nu) &= O_a f[(\nu - \nu_0) + (\nu_0 - \nu_a)] + O_b f[(\nu - \nu_0) + (\nu_0 - \nu_b)] + O_c f[(\nu - \nu_0) \\ &\quad + (\nu_0 - \nu_c)] + O_d f[(\nu - \nu_0) + (\nu_0 - \nu_d)] \\ &= (O_a + O_b + O_c + O_d) f(\nu - \nu_0) + [O_a(\nu_0 - \nu_a) + O_b(\nu_0 - \nu_b) + O_c(\nu_0 - \nu_c) \\ &\quad + O_d(\nu_0 - \nu_d)] \cdot f'(\nu - \nu_0) + O[C(\nu_0 - \nu_{a,b,c,d})]. \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $O[C(\nu_0 - \nu_{a,b,c,d})]$  为  $O_a(\nu_0 - \nu_a)$ 、 $O_b(\nu_0 - \nu_b)$ 、 $O_c(\nu_0 - \nu_c)$ 、 $O_d(\nu_0 - \nu_d)$  的二阶小量。选取参考点  $\nu_0$ , 使

$$\begin{aligned} O_a(\nu_0 - \nu_a) + O_b(\nu_0 - \nu_b) + O_c(\nu_0 - \nu_c) + O_d(\nu_0 - \nu_d) &= 0, \text{ 即} \\ \nu_0 &= \frac{O_a \nu_a + O_b \nu_b + O_c \nu_c + O_d \nu_d}{O_a + O_b + O_c + O_d}. \end{aligned} \quad (5)$$

则在一阶近似下, (4)式变成:

$$\begin{aligned} g(\nu) &= (O_a + O_b + O_c + O_d) f^{(1)}(\nu - \nu_0), \text{ 或} \\ f^{(1)}(\nu) &= \frac{g(\nu + \nu_0)}{O_a + O_b + O_c + O_d}. \end{aligned} \quad (6)$$

(6)式表明, 只要恰当地选取参考点, 就可从实验测得的由多超精细结构跃迁叠加而成的速度分布曲线, 求出如(1)、(2)两式表示的单一超精细结构跃迁的速度分布曲线。

这样就可简单地直接比较(1)、(2)两式, 以亚稳态原子相对于基态原子在飞行过程中数量的衰减, 求出亚稳态原子的寿命。

### 三、实验与分析

实验装置以及用激光感应荧光法测量原子束中原子速度分布的实验见文献[4]。

实验选择的基态跃迁是从基态  $a^2D_{3/2}$  到激发态  $z^4D_{3/2}^0$  的共振散射, 中心波长是 602.511 nm。而亚稳态跃迁则是从亚稳态  $a^2D_{5/2}$  到激发态  $z^4D_{5/2}^0$  的共振散射, 中心波长

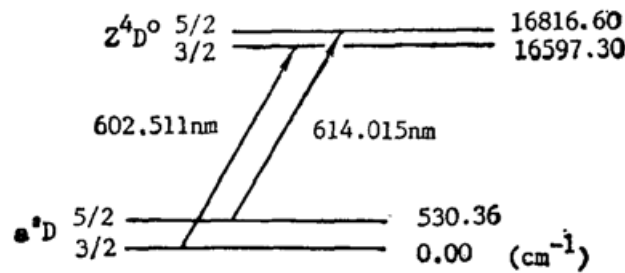


Fig. 1 Level diagram of transitions

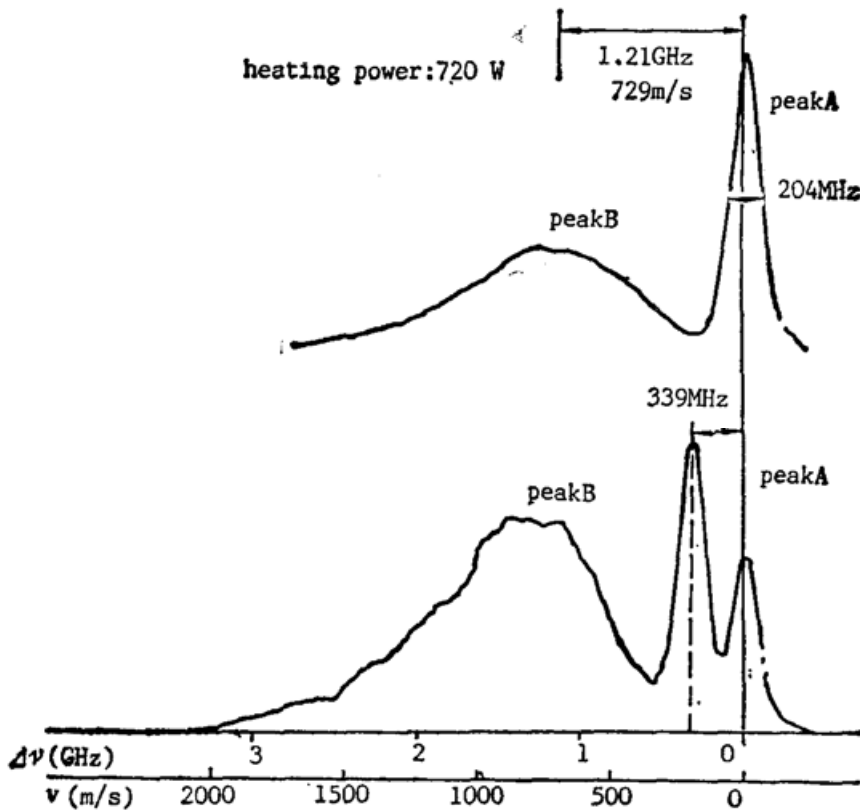


Fig. 2 The velocity distributions of yttrium atomic beam.  
Upper curve: ground state, bottom curve: metastable state

是 614.015 nm。如图 1 所示。

在电子枪加热功率为 600 W 和 720 W 的情形下,先后进行了基态跃迁和亚稳态跃迁的测量,如图 2 所示。其中右边较窄的 A 峰,是由与原子束垂直的参考激光束产生的,是无多普勒频移的峰,因此其中心位置即是轴向速度为零的原点。左边较宽的 B 峰,则是由与原子束共线反向传播的探测激光束产生的多普勒频移曲线。

由上图可见,在基态跃迁的情形,分辨不出超精细结构分裂,因此可以近似地认为此时得到的曲线是如(1)式所示的分布。为计算方便,改记(1)式为:

$$f_g(x) = A_g x^2 \exp[-B(x-1)^2]. \tag{7}$$

其中  $x = \frac{v}{u}$ ,  $A_g = N_g u^2$ ,  $B = \frac{\gamma M^2}{2}$ 。而在亚稳态跃迁的情形,可以观察到两条超精细结构的跃迁,因此得到的多普勒频移曲线即是由两个如(2)式所示的分布叠加而成。根据本文原理部分所述的方法,可以求出单一亚稳态跃迁的速度分布曲线,如(2)式所示。同样为方便起见,改记(2)式为:

的跃迁,因此得到的多普勒频移曲线即是由两个如(2)式所示的分布叠加而成。根据本文原理部分所述的方法,可以求出单一亚稳态跃迁的速度分布曲线,如(2)式所示。同样为方便起见,改记(2)式为:

$$f_m(x) = A_m x^2 \exp[-B(x-1)^2] \cdot \exp\left(-\frac{D}{x}\right), \quad (8)$$

其中

$$A_m = N_m u^2, \quad D = \frac{l}{u\tau}. \quad (9)$$

由于两次测量中, 激光频率扫描的速度略有差异, 致使两条曲线上相同的坐标点就代表了略有差异的激光频率, 从而也就代表了略有差异的速度。而计算进行拟合时是直接从实验曲线上取数据点的。因此必须考虑由此带来的误差。假设这种差异很小, 记为  $\eta$ :  $\eta - 1 \ll 1$ , 则有:

$$\begin{cases} f_g(x) = A_g (\eta x)^2 \exp[-B(\eta x - 1)^2], \\ f_m(x) = A_m x^2 \exp[-B(x - 1)^2] \cdot \exp\left(-\frac{D}{x}\right). \end{cases} \quad (10)$$

比较两式:

$$\begin{aligned} \frac{f_m(x)}{f_g(x)} &= \frac{A_{mg}}{\eta^2} \exp\{-B[(x-1)^2 - (\eta x - 1)^2]\} \cdot \exp\left(-\frac{D}{x}\right) \\ &\doteq A_{mg} \exp\{-B(1-\eta)[(1+\eta)x^2 - 2x]\} \cdot \exp\left(-\frac{D}{x}\right) \\ &\doteq A_{mg} \exp\{-2B(1-\eta)(x^2 - x)\} \cdot \exp\left(-\frac{D}{x}\right), \end{aligned}$$

进一步简化上式, 两边取对数得:

$$\ln\left[\frac{f_m(x)}{f_g(x)}\right] = \ln A_{mg} - 2B(1-\eta)(x^2 - x) - \frac{D}{x}. \quad (11)$$

分别用公式(7)和(11)以最小二乘法拟合实验曲线, 即可求出参量  $D$  的值。再根据(9)式, 就可求出亚稳态寿命  $\tau$  的值<sup>[3]</sup>。测量中  $L$  取值为 80 mm, 寿命  $\tau$  为  $(0.8 \pm 0.2)$  ms。

用激光感应荧光法测量原子亚稳态寿命的误差主要来源于下面几个方面。

1. 所用的基态原子速度分布公式(即(1)式)与真实情形之间的误差。(1)式描述的是原子束经过一个理想超声速喷嘴后通过小孔的“突然冷却”点后所形成的速度分布。而实验所用的装置并不是一个理想的喷嘴系统, 而是一个狭缝结构。

2. 所用的亚稳态原子速度分布公式(即(2)式)与实际的误差。因为亚稳态原子的布居是靠束源内原子之间的相互碰撞建立的, 原则上应是有别于基态原子的速度分布。

3. 超精细结构分裂的影响。用计算机对(6)式做误差估计计算, 在超精细结构分裂为 400 MHz 时, 此方法的误差小于 4%。

作者认为用激光感应荧光法测量原子亚稳态寿命是一个可行的方法。进一步的工作是建立更接近真实情形的速度分布模型。

### 参 考 文 献

- [1] I. V. Hertel, H. Hofmann *et al.*; *J. Phys. E.*, 1975, 8, No. 12 (Dec), 1023~1026.
- [2] K. Eergmann, W. Demtröcker *et al.*; *Appl. Phys.*, 1975, 8, No. 1 (Jan), 65~70.
- [3] 杜清; 私人通信。
- [4] 杜清, 朱利洲等; 《中国激光》, 1990, 17, 待发表。

## Lifetime measurement of metastable state of Yttrium atom

DU QING, LI SHIFANG, ZHOU ZHIYAO, ZHU LIXHOU AND LIN FUCHENG

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

(Received 15 December 1989; revised 16 April 1990)

### Abstract

Measurement of Doppler-shift profile of yttrium atomic beam was performed by using a tunable dye laser and laser induced fluorescence (LIF) technique. Comparing the intensities of two LIF which originate from the ground state and metastable state with different velocity, the lifetime of the metastable state  $a^2D_{5/2}$  of yttrium was measured to be  $(0.8 \pm 0.2)$  ms.

**Key words:** the lifetime of the metastable state atom; the velocity distributions of atom beam; Yttrium atom.