

# 共线快离子束激光光谱

王永达

(北京大学无线电电子学系)

## 摘 要

共线快离子束激光光谱是一种研究稳定的和不稳定的原子核及其同位素的较好的方法。它原理简单,消除了一级多卜勒频移,具有很高的分辨率和灵敏度。运用该方法可以获得不少有关原子核结构方面的知识,例如核自旋、核电荷半径等等。本文介绍了该方法的基本原理、实验装置和实验方法,介绍了用参考束来定标和提高测量精度,最后给出了对氦和钡的一些同位素运用该方法所得到的一些激光谱。

最近十几年,运用激光测量原子谱的方法来获得一些原子核结构方面(例如核自旋、平均平方核电荷半径、磁偶极矩以及在基态和同质异能态的磁极矩等方面)的知识,已取得很大进展,得到了不少关于核的基本参数。共线快离子束激光光谱就是其中一种方法。它的特点是消除了一级多卜勒频移,有很高的分辨率和灵敏度,可以检测极微量的元素,同时又可以运用同一实验装置测得几个参数。对于不稳定的核及其同位素的研究,这是一种较好的方法<sup>[1]</sup>。通常用这种方法测量的是离子谱,但是如果在实验装置上稍加改进,也可以测量原子谱。由于目前已知的不稳定核约有1600多种,而只有极少数已经取得了有关核结构的数据,因此这种方法对于核结构的研究是很有用的。

## 一、基本原理

共线快离子束激光光谱的基本原理是基于速度群聚效应<sup>[2]</sup>。这个效应表明,当带电粒子在电场中加速时,它的动能分布不变,因而使带电粒子在加速以后的速度分布要比加速以前窄,也就是说带电粒子在加速以后会发生速度群聚。

假设带电粒子在加速前的能量(动能)分布为 $\Delta\epsilon$ ,则

$$\Delta\epsilon = m v_0 \Delta v_0, \quad (1)$$

式中 $m$ 为粒子的质量, $v_0$ 为粒子的初速度, $\Delta v_0$ 为加速前的粒子速度分布。设粒子在加速后的能量(动能)分布为 $\Delta E$ ,则

$$\Delta E = m v \Delta v, \quad (2)$$

式中 $v$ 为粒子加速后的速度, $\Delta v$ 为粒子加速后的速度分布。这样,带电粒子在加速前后的速度分布之比为

$$\frac{\Delta v}{\Delta v_0} = \frac{v_0}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon}{E}}. \quad (3)$$

由上式可见,带电粒子在加速后的速度分布比加速前减小 $\sqrt{\frac{\epsilon}{E}}$ 倍。如果有一激光束在带电粒子运动方向上与带电粒子相互作用,那末在所得到的激光光谱上由于多卜勒增宽引进的线宽将减小 $\sqrt{\frac{\epsilon}{E}}$ 倍。

在一般情况下,粒子处于热运动状态,它们的动能分布 $\Delta\epsilon \sim 0.3\text{eV}$ 。如果将它们加速到300keV,那末加速后粒子的速度分布就将减小大约300倍。这样就会使谱线的多卜勒增宽大大减小,谱线的线宽接近于自然线宽。

如果将带电粒子的动能与速度的关系画成曲线(图1),那末我们可以清楚地看到,当粒子动能分布 $\Delta E$ 大小不变时,粒子的速度越快,速度分布越窄。当粒子速度高到一定值时,由于速度分布引起的谱线多卜勒增宽可以忽略,

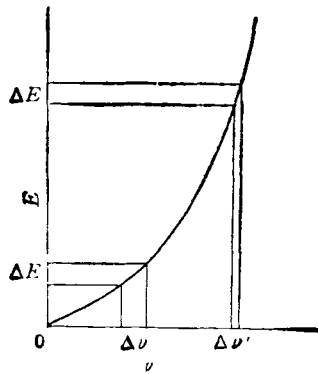


图1 粒子动能和速度的关系

大大提高了谱线的分辨率。

利用速度群聚效应测量激光光谱需要速度较快的离子束,同时要求激光束和离子束共线,以保证二者有一定的相互作用时间。这就是共线快离子束激光光谱名词的由来。

## 二、实验装置

共线快离子束激光光谱的实验装置如图2所示。它包括离子源、离子束管、激光束、光子脉冲检测以及计算机控制等几个部分。

离子源是专门设计的<sup>[3]</sup>。在离子源上加有几10kV的加速电压,并将该离子源与反应堆或加速器相连。如果待测的是稳定同位素,则只要将该同位素置于离子源中,让离子源工作而不需使用反应堆或加速器即可得到快离子束,再经过同位素分离器选取所需同位素的快离子束。如果待测的是短寿命的不稳定同位素,那么由于该离子源是由快速传送系统与产生不稳定同位素的反应堆或加速器相连,当两者同时工作时,可以产生并电离待测的同位素,得到所需的不稳定同位素的快离子束,同时对其进行分析和测量。这也就是通常所说的在线测量方法。如果待测的是既有稳定的又有不稳定的同位素,则只需将上述二者结合起来,在观测稳定同位素谱线时只要将反应堆或加速器的通道关闭。

快离子束由质谱仪出来后进入离子束管进行偏转和束腰变换,使其在通过管内相互作用区时具有一定大小的束腰(它是直径约1cm的圆)。管内的二个法拉第杯是用来进行调试、测量和搜集离子流。在相互作用区前后加了几块电极板,是为了使离子束在相互作用区内的速

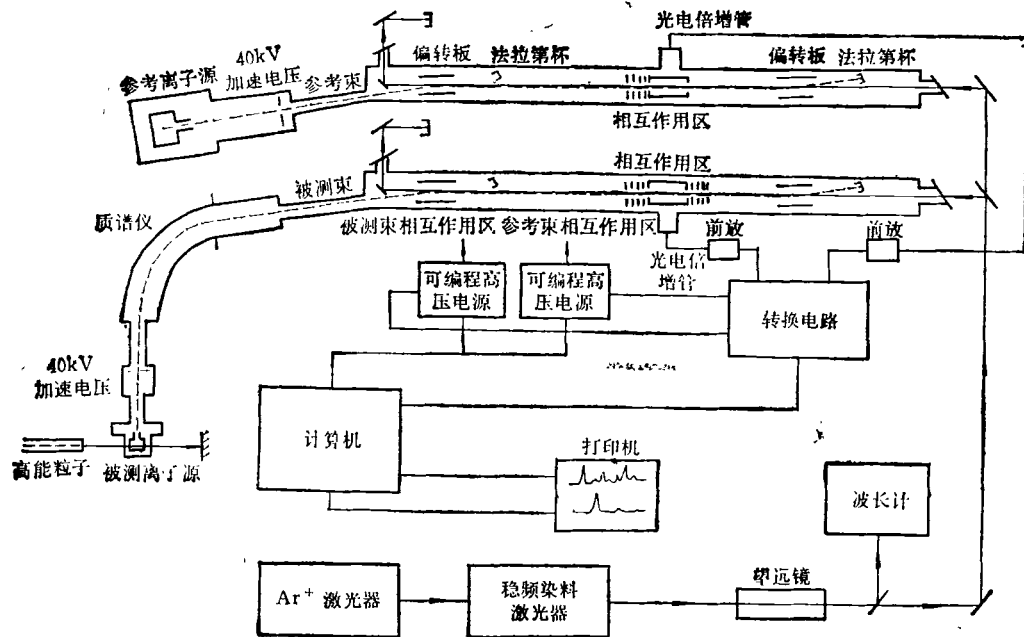


图2 共线快离子束激光光谱实验装置

度均匀性得到改善.离子束管由铝块加工而成,总长约3—4m,矩形截面,管内真空度为 $10^{-6}$ — $10^{-9}$ Torr.

激光束是采用 $\text{Ar}^+$ 激光器泵浦的连续稳频染料激光器(SP 380D),波长由被测离子的能级跃迁而定.由染料激光器输出的激光束经过束腰变换后射入离子束管,在相互作用区有与离子束大致相同的束腰.激光束的线宽应小于1MHz,并且是单频、单纵模.

通常被测离子具有一个或几个亚稳态.由某一亚稳态吸收一定频率的光子到激发态,然后以自发辐射的形式回到基态和以发射荧光的形式回到某个中间态.利用置于相互作用区附近的光电倍增管接收荧光的光子脉冲,经过电子设备处理后送往计算机,由计算机对整个实验进行自动控制.

### 三、参 考 束

在共线快离子束激光光谱实验装置中,通常采用增加一个参考束的方法来提高测量精度和进行定标.参考束所用的离子应是已被详细研究过的,并且它的谱线应与被测束的谱线位置相近.

参考束有自己的离子源、离子束管和荧光光子信号检测装置,但参考束与被测束共用同一激光器.通过调节参考束和被测束的加速电压,使二者速度不同,从而达到用同一激光频率同时来激发被测束和参考束的目的.

利用参考束已知的谱线位置和参考束的加速电压,可以对被测束的谱线进行相对测量,从而可以提高测量精度约一个数量级,同时可以对谱线的绝对位置进行标定.

### 四、测 量 方 法

在实际测量中,可以采用激光束和离子束的方向平行和反平行的二次测量方法<sup>[4]</sup>,这样可以避免直接测量很高的加速电压,减小测量误差.

物理

为了得到激光光谱必须对激光频率进行扫描.这一点可以采用两种方法来实现:一种是对激光频率进行扫描;另一种是通过扫描加速电压改变离子的速度,实际上也是改变离子本身所感受到的激光频率.后一种方法在实验上比较简单易行.根据多卜勒频移,离子束的加速电压和共振频率之间的关系如图3所示.

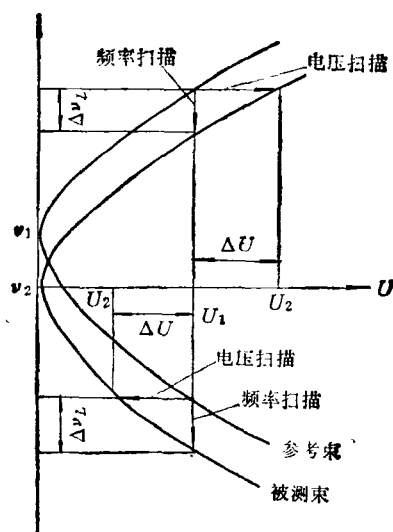


图3 被测束和参考束加速电压与频率的关系

下面我们来分别讨论上述两种方法:

#### 1. 加速电压扫描方法

加速电压扫描方法是将激光器的频率固定,用扫描加速电压来得到谱线.

设 $U_1$ ,  $U_2$ 分别为参考束和被测束的加速电压; $\nu_L$ 为激光频率, $\nu_1, \nu_2$ 分别为参考束和被测束离子的共振频率; $u_1, u_2$ 分别为参考束和被测束离子的速度.按照多卜勒效应,可得出

$$\nu_L = \nu_1 \frac{\left(1 - \frac{u_1}{c}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{u_1}{c}\right)^2}} = \nu_1 \sqrt{\frac{1 - \frac{u_1}{c}}{1 + \frac{u_1}{c}}}, \quad (4)$$

$$\nu_L = \nu_2 \frac{\left(1 - \frac{u_2}{c}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{u_2}{c}\right)^2}} = \nu_2 \sqrt{\frac{1 - \frac{u_2}{c}}{1 + \frac{u_2}{c}}}. \quad (5)$$

设

$$\beta_1 = \frac{v_1}{c}, \quad \beta_2 = \frac{v_2}{c}, \quad (6)$$

则得

$$v_L = v_1 \sqrt{\frac{1-\beta_1}{1+\beta_1}}, \quad (7)$$

$$v_L = v_2 \sqrt{\frac{1-\beta_2}{1+\beta_2}}. \quad (8)$$

由(7),(8)式可得

$$v_2 = v_1 \sqrt{\frac{1-\beta_1}{1+\beta_1}} \cdot \sqrt{\frac{1+\beta_2}{1-\beta_2}}, \quad (9)$$

$$\Delta\nu = v_2 - v_1 = v_1 \Delta\beta \left( 1 + \frac{1}{2} \Delta\beta + \beta_1^2 + \Delta\beta \cdot \beta_1 + \frac{1}{2} \Delta\beta^2 + \dots \right), \quad (10)$$

式中

$$\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1 = K \cdot \sqrt{\frac{2e}{c}} \left( \sqrt{\frac{U_2}{m_2}} - \sqrt{\frac{U_1}{m_1}} \right) = K \cdot \sqrt{\frac{2eU_1}{m_2 c^2}} \left( \sqrt{1 + \frac{\Delta U}{U_1}} - \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} \right), \quad (11)$$

式中  $e$  为电子的电量,  $c$  为光速,  $m_1$  和  $m_2$  分别为参考束和被测束离子的质量,  $K$  为一参数, 表示激光束和离子束的相对方向, 如果二者平行, 则  $K = 1$ , 二者反平行, 则  $K = -1$ .

(10)和(11)式中的  $v_1$ ,  $K$ ,  $m_1$ ,  $m_2$  为已知量,  $U_1, \Delta U$  可由测量得到, 由此可以通过(9), (10),(11)三式得到  $v_2$ .

## 2. 激光频率扫描方法

另一种扫描方法是固定加速电压, 用扫描激光频率来得到谱线.

设  $U$  为固定的加速电压,  $\nu_{L_1}$  和  $\nu_{L_2}$  分别为参考束和被测束离子共振时的激光频率, 其余参量与上面所设相同. 同理可得

$$\nu_{L_1} = v_1 \sqrt{\frac{1-\beta_1}{1+\beta_1}}, \quad (12)$$

$$\nu_{L_2} = v_2 \sqrt{\frac{1-\beta_2}{1+\beta_2}}. \quad (13)$$

设

$$\Delta\nu_L = \nu_{L_2} - \nu_{L_1}, \quad \Delta\nu = \nu_2 - \nu_1, \quad (14)$$

则

$$\nu_2 = \left( \Delta\nu_2 + \nu_1 \sqrt{\frac{1-\beta_1}{1+\beta_1}} \right) \sqrt{\frac{1+\beta_2}{1-\beta_2}}, \quad (15)$$

$$\Delta\nu = \nu_1 \Delta\beta \left( 1 + \frac{1}{2} \Delta\beta + \beta_1^2 + \dots \right)$$

$$+ \Delta\nu_L \left( 1 - \beta_1 - \Delta\beta + \frac{1}{2} \beta_1^2 + \dots \right), \quad (16)$$

式中

$$\Delta\beta = K \sqrt{\frac{2eU}{c^2}} \left( \frac{\sqrt{m_1} - \sqrt{m_2}}{\sqrt{m_1 m_2}} \right). \quad (17)$$

$\Delta\nu_L$  和  $U$  可以测量, 同时  $\nu_1, K, m_1, m_2$  为已知量, 由(15),(16),(17)式可以求得  $\nu_2$ .

## 五、一些实验结果

### 1. $^{131}\text{Xe}^+$ 的共线快离子束激光谱

$^{131}\text{Xe}^+$  的有关能级图见图 4(a). 我们用 605.12nm 波长的激光抽运  $^{131}\text{Xe}^+$  离子, 然后观察波长为 529.22nm 的荧光. 测量的条件是

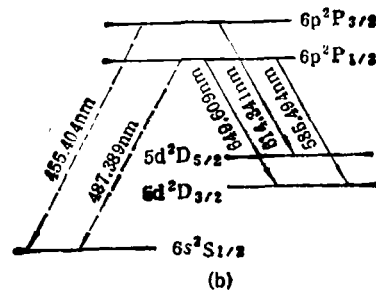
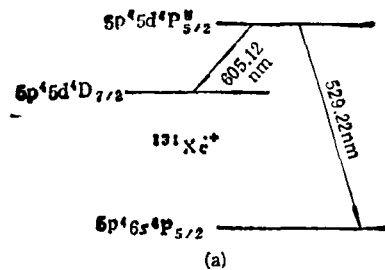


图 4

加速电压 42.8kV, 离子束流 200nA, 激光功率 150mW, 加速电压扫描和反平行测量。结果示于图 5。由于  $^{131}\text{Xe}^+$  离子的  $6p\ ^1P_{3/2}$  能级和  $5d\ ^1D_{3/2}$  能级都有超精细结构, 从理论上分析应该得到九条谱线。但是, 实验上测得七条, 其他二条由于其强度仅为最强的谱线的 0.3% 和 0.4%, 因而被淹没在噪声中。

图 5 的横坐标是在离子束管中相互作用区的电极上附加的扫描加速电压, 其值相对于地而言。纵坐标是每秒荧光光子数的相对值。

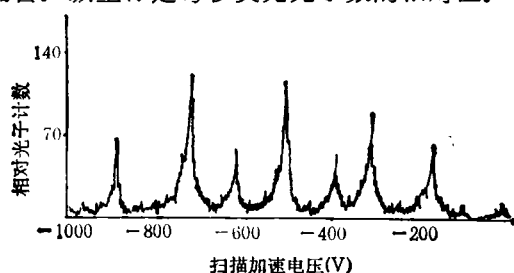


图 5  $^{131}\text{Xe}^+$  的共线快离子束激光谱

## 2. BaII 放射性同位素 $^{140}\text{BaII}$ , $^{141}\text{BaII}$ , $^{143}\text{BaII}$ 的同位素位移

有关 BaII 的能级图见图 4(b)。由反应堆产生的每秒每平方米  $2 \times 10^{10}$  的高能中子流, 轰击放在表面离子源的  $^{235}\text{U}$ , 可以产生 BaII 的同位素离子, 这些离子被 44 kV 的电压加速后, 就可产生 10pA 到 1nA 的离子流。离子流中有部分离子处于亚稳态  $5d^2D_{3/2}$  和  $5d^2D_{5/2}$ , 我们运用波长为 585.494nm 或 614.341 nm 的激光抽运 BaII 离子, 检测由  $6p^2P_{3/2}$  或  $6p^2P_{1/2}$  回到基态  $6s^2S_{1/2}$  的荧光, 得到的荧光谱见图 6。图 6 中  $^{144}\text{BaII}$  的寿命为 11s,  $^{142}\text{BaII}$  为 10.7min,

$^{141}\text{BaII}$  为 18.3min,  $^{140}\text{BaII}$  为 12.8d。由于伴随放射性同位素 Cs 的产生, 增加了谱线的背景噪声, 因此开始时基线较高, 当观察到  $^{144}\text{BaII}$  的谱线后, 立即关闭中子源, 降低了背景, 使信噪比加大。由图 6 可以得到几种 BaII 同位素的同位素位移。

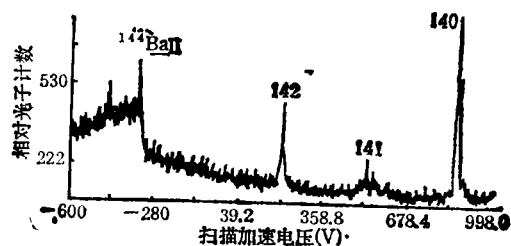


图 6 BaII 的共线快离子束激光谱

值得指出的是, 共线快离子束激光光谱的实验设备也可以用作原子谱的测量<sup>[5]</sup>。方法是先将被测元素变成离子, 并在离子被加速到相当高的速度后进入离子束管, 然后在离子束管的相互作用区前面放一个螺旋管磁场, 在磁场内通入一种元素蒸气, 该元素容易和被测元素进行自旋交换并失去外层电子而变成离子。这样在螺旋管内两种元素进行自旋碰撞, 使被测元素的离子得到电子而变为原子。这时被测元素的原子以相当高的速度通过相互作用区, 因此可以测得该元素的原子谱。

- [1] Olav. Redi, *Phys. Today*, 34-2(1981), 26.
- [2] S. L. Kaufman, *Opt. Comm.*, 17-3 (1976), 309.
- [3] R. L. Gill and A. Piotrowski, *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A*, 234(1985), 213.
- [4] A. C. Muller et al., *Nucl. Phys. A*, 403(1983), 234.
- [5] G. Borghs et al., *Opt. Comm.*, 38-4 (1981), 101.

## 1988 年第 8 期《物理》内容预告

晶体科学新进展 (Б. К. Вайнштейн); 半磁半导体——一种新型的半导体(陈辰嘉); 从高能物理的发展看北京正负电子对撞机(黄涛); 球形落管试样的冷却及重力水平研究 (潘明祥等); 耦合团方法 (R. F. Bishop 等) 半绝缘多晶硅 (SIPOS) 薄膜技术 (王云

珍); 光 CVD 技术的最新进展及其应用(何宇亮); 强磁场下温度的控制与测量(郭树权等); 微弱信号检测概论(陈一询); 杨肇熹先生事略(杨先珏); 苏联物理学家格·尼·弗列罗夫(徐载通)。

## 敬告 作者

由于编辑部办公经费紧张和来稿数量较大, 《物理》编委会研究决定, 为节约邮资, 凡 1988 年 10 月以后的来稿, 经审查后不适合本刊发表的一律不退稿, 请

作者自留底稿。对不适合本刊发表的稿件, 编辑部一般在收到稿件后三个月内将处理结果函告作者。

《物理》编辑部 1988 年 7 月