

光学共振方法测量离子能量

施 伟 陆福全 吴松茂 汤家镛 杨福家

复旦大学原子核科学系, 上海, 200433

1991年5月3日收到

本文描述测量离子能量的光学共振方法。这种方法利用多普勒效应把离子能量与离子的光学共振激发联系起来, 可应用在 1eV — 100MeV 能区。在 30keV 附近, 它的测量准确度可望达到 5×10^{-3} 。用这种方法测量了 $^{142}\text{Nd}^+$ 离子能量, 获得了较好的结果。

PACC: 2990; 3280

一、引 言

离子能量的测量是基于加速器原子物理和核物理实验的一个基本问题。长期以来, 科学家们在不断探索和完善简单、快速、准确的测量方法。在迄今所掌握的方法中, 静电分析方法^[1]和核反应方法^[2]是最常用的方法, 它们的测量准确度都在 1×10^{-3} 左右, 但它们都有一定的局限性。静电分析方法的实用测量范围一般在 6MeV 以下^[3], 这种方法的主要困难是必须对静电分析器进行复杂的绝对校刻。核反应方法只能校刻 100keV 以上的能区。对于我们所开展的快束激光光谱学研究, 离子能量约为 30keV 。在此能区, 核反应方法无能为力, 而应用静电分析方法也存在技术和设备上的困难。为此, 我们尝试采用光学共振方法, 获得了较好的效果。

二、原 理

考虑一个在激光场中作定向运动的原子体系(见图1), 若此原子存在两个结合能分

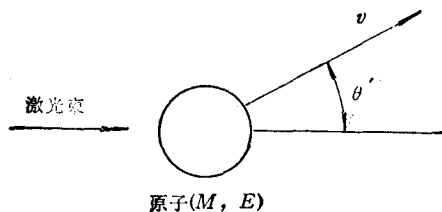


图1 激光与原子相互作用示意图

别为 T_1 和 T_2 ($T_1 > T_2$) 的能级, 它们之间允许进行电偶极跃迁。当原子坐标系激光波数 ν_A 与能级间距 $T_1 - T_2$ 满足关系

$$\nu_A = T_1 - T_2 \quad (1)$$

时, 此原子吸收光子, 并被从能级 T_1 共振激发到能级 T_2 。由于多普勒效应, 原子坐

标系激光波数 ν_A 与实验室坐标系激光波数 ν_L 之间存在关系:

$$\nu_A = \nu_L \cdot \frac{\left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}, \quad (2)$$

于是利用共振激发关系 (1) 式得到原子能量

$$E = \frac{1}{2} M c^2 \left(\frac{\nu_0^2 - \nu_L^2}{\nu_0^2 + \nu_L^2} \right)^2, \quad (3)$$

其中 $\nu_0 = T_1 - T_2$, 为原子坐标系共振激发波数, ν_L 为激光与原子相向作用 ($\theta = \pi$) 时实验室坐标系共振激发波数。因此, 只要测定了 ν_0 , ν_L , 即可确定离子能量 E 。

三、实验装置

实验装置见图 2。用同位素分离器 (Danfysik 1080-30) 输出一束同位素纯离子, 此离子束进而被导入靶室。为了避免碰撞淬灭, 碰撞引起的离子束激发和辐射俘获, 用一台抽速为 450 l/s 的涡轮分子泵对靶室抽气, 使其真空度保持在优于 2×10^{-7} Torr。用染料激光器 (Coherent 699-21) 产生一束频率可调的激光束。此束被分成三束。第一束 (主束) 进入靶室, 与离子束共线相向作用。第二束进入一个碘分子吸收室, 产生的碘分子吸收谱^[4] 用来对激光波数进行校刻。用 R6G 染料, 此激光能覆盖 5600—6250 Å 的波长范围。当工作在单频状态时, 它能在 30GHz 的范围内自动扫描, 线宽小于 1MHz。

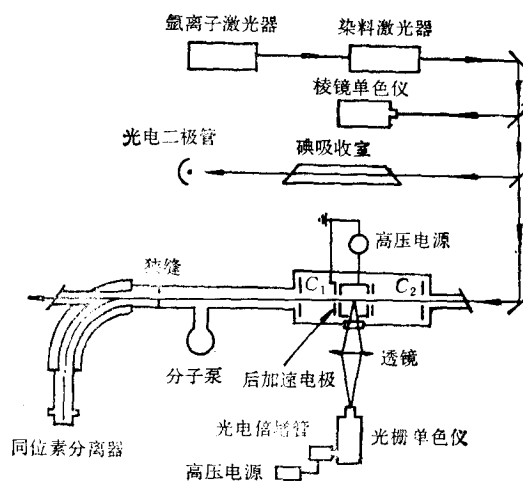


图 2 实验装置

图 2 中, 用准直孔 C_1 , C_2 和同位素分离器输出狭缝保证两束的平行度优于 2mrad。为了减少光学泵浦所产生的亚稳态的损耗, 在靶室中设置了一组后加速电极, 其两端的两个电极接地, 而中间的圆筒处于 600V 电位, 圆筒上开了一个小孔, 用作荧光探测孔。用由透镜、光栅单色仪和光电倍增管组成的系统对荧光进行收集、分析和探测。为了降低散射激光本底, 靶室内表面和后加速电极的内外面被涂黑, 荧光收集、分析和探测系统被光屏蔽。这样, 散射激光本底降到了与光电倍增管热噪声相当的水平。

数据获取由两路多道分析器进行。从光电倍增管和光电二极管来的信号被用作这两个多道分析器的门信号。这使来自染料激光器扫描控制单元的扫描电压数字化, 并进而被存贮在多道分析器中。

四、实验与结果

本文用光学共振方法测量了 $^{142}\text{Nd}^+$ 离子能量。所用激发道和探测道^[5]见图3。用波长为 5702 \AA 的光子把 $^{142}\text{Nd}^+$ 离子从亚稳态 $4f^4 5d^6 K_{9/2}$ 共振激发到 $(23537)_{9/2}^0$ 态。通过探测随后退激到基态 $4f^4 6s^6 I_{7/2}$ 所辐射的波长为 4247 \AA 的荧光来监测共振。实验中, 激光束在中心波长为 5706 \AA (考虑多普勒位移后的共振激发波长) 的 30 GHz 范围内自动扫频。得到的 $^{142}\text{Nd}^+$ 离子共振激

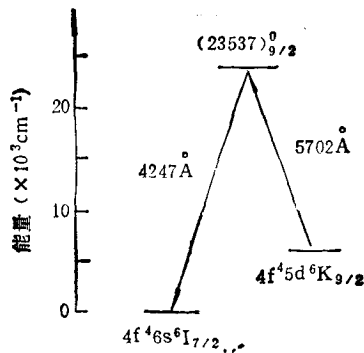


图3 实验所涉及的部分 NdII 能级和跃迁

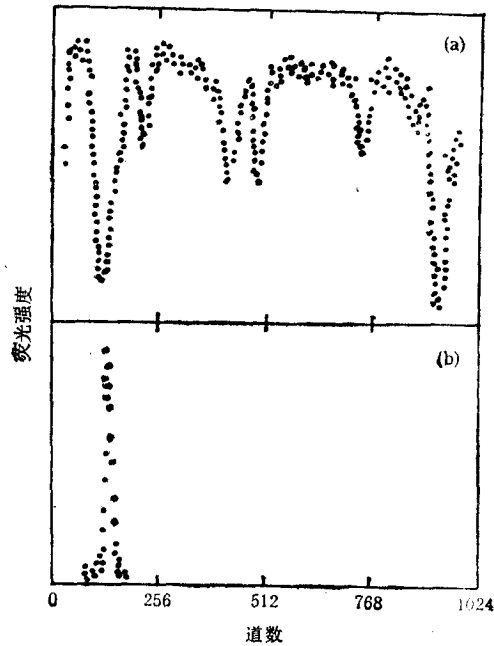


图4 多道谱 (a) 为碘分子吸收谱; (b) 为 $^{142}\text{NdII} 4f^4 5d^6 K_{9/2} - (23537)_{9/2}^0$ 跃迁共振激发谱

发谱和碘分子吸收谱见图4。

利用内插法, 实验室坐标系共振激发波数

$$\nu_L = 17520.152(3) \text{ cm}^{-1}.$$

这里的误差主要来自碘分子吸收峰波数的不确定值^[6] ($2 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$)、碘分子吸收峰中心定位误差 ($1 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$) 和光学共振中心定位误差 ($5 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$)。

Blaise 等人^[7]和 Ahmad 等人^[8]测量了这一跃迁的原子坐标系波数

$$\nu_0 = 17532.067(8) \text{ cm}^{-1}.$$

这样, 由(3)式得到后加速电极圆筒内的离子能量 $E = 30.55(4) \text{ keV}$, 于是同位素分离器输出的离子能量 $E_0 = E + eV_p$ (后加速电压) $= 31.15(4) \text{ keV}$ 。作者据此得到的快束激光谱学结果^[9,10]与国际公认的数据符合得很好。

五、讨 论

光学共振方法的主要特征虽已有描述, 然而尚需指出以下几点:

1. 对离子体系能级结构的要求 用光学共振方法测量离子能量, 要求离子存在一个适当的能级结构。一是保证激发波长在激光所覆盖的光谱范围内, 二是保证激发波长与

探测波长有足够大的差距,以充分抑制散射激光本底,三是保证跃迁有足够大的振子强度,以获得强的信号。当离子能量比较低时,多普勒位移很小。这时,要求离子存在适当的三能级结构(类似于图3所示),实验中激发和探测在不同的跃迁上进行。当离子能量足够高时,多普勒位移大于 50 \AA ,用光栅单色仪就可把散射激光与荧光有效地分开。这时,只要离子存在适当的二能级结构即可,实验中激发和探测在同一跃迁上进行。

2. 测量准确度 本文给出的准确度(1.3×10^{-3})并不是这种方法的极限准确度。从确定离子能量的(3)式可见,能量的测量准确度取决于实验室坐标系激发波数 ν_L 的不确定值和原子坐标系激发波数 ν_0 的不确定值。这里, ν_0 是用受多普勒效应限制的经典光谱学方法^[7,8]测得的,它的不确定值 $\Delta\nu_0 \approx 8 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ 。如果用目前成熟的高分辨激光光谱学方法^[11]测量,则其不确定值可大大缩小, $\Delta\nu_0 \sim 1 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ 。 ν_L 的不确定值 $\Delta\nu_L = 3 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$,主要来自用碘分子吸收谱对激光波数进行校刻。目前国际市场上可以买到的迈克耳孙干涉仪波长计的测量准确度可达 10^{-8} ^[12]。如果用这样的波长计测量激光波长,那么其准确度可大大提高,与由多普勒展宽引起的光学共振中心的定位误差相当, $\Delta\nu_L \sim 2 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ 。这样,在 30 keV 附近,光学共振方法的测量准确度为

$$\Delta E/E \approx \frac{2(\Delta\nu_0 + \Delta\nu_L)}{|\nu_0 - \nu_L|} \sim 5 \times 10^{-3}.$$

3. 测量范围 光学共振方法测量离子能量的下限由多普勒位移 $\nu_D = |\nu_0 - \nu_L|$ 决定,只要它大到保证结果有足够的准确度。

$$\Delta E/E \approx \frac{2(\Delta\nu_0 + \Delta\nu_L)}{|\nu_0 - \nu_L|} \sim 10^{-2},$$

要求 $E_L \sim 1 \text{ eV}$ 。上限由激光单频扫描范围决定,只要它能覆盖离子束能散引起的多普勒宽度。

$$\Delta\nu_D \approx \frac{\nu_L \Delta E}{\sqrt{2mc^2 E}} \leq 30 \text{ GHz}.$$

一般离子束能散 $\Delta E \sim 10^{-3} E$,要求 $E_H \sim 100 \text{ MeV}$ 。这时测量准确度与能散度差不多。因此,光学共振方法可应用在 $1 \text{ eV} - 100 \text{ MeV}$ 能区。

4. 与其他方法比较 光学共振方法比静电分析方法和核反应方法具有更高的测量准确度。另外,与静电分析方法相比,这种方法能应用在更高的能区($>6 \text{ MeV}$);与核反应方法相比,它能应用在更低的能区($<100 \text{ keV}$),且是直接测量。光学共振方法在 MeV 以上能区显示出独特的优越性。一些存贮环上配置了激光与离子束作用装置,用这种方法对离子束进行在线能量、能散诊断^[13,14],效果很好。

[1] R. O. Bondelid and C. A. Kennedy, *Phys. Rev.*, **115**(1959), 1601.

[2] J. B. Marion, *Rev. Mod. Phys.*, **33**(1961), 139.

[3] 蒋增学等,核技术,**10**(2)(1987),7.

[4] S. Gerstenkorn and P. Luc, Atlas du Spectre d'Absorption de la Molecule d'Iode, editions du C. N. R. S. 15 quai Anatole France, 75700, Paris, (1978).

[5] W. C. Martin, R. Zalubas and L. Hagan, Atomic Energy Levels-the rare earth elements, NSRDS-NBS 60, U. S. Government Printing Office, Washington, DC(1978).

[6] S. Gerstenkorn and P. Luc, *Rev. Phys. Appl.*, **14**(1979), 791.

- [7] J. Blaise, J. -F. Wyart, M. T. Djerad and Z. B. Ahmed, *Phys. Scr.*, **29**(1984), 119.
[8] S. A. Ahmad and G. D. Saksena, *Spectrochim. Acta*, **36B**(1981), 943.
[9] Shi Wei *et al.*, *Phys. Rev.*, **A43**(1991), 1451.
[10] Lu Fuquan *et al.*, *Phys. Rev. A*, to be published.
[11] R. C. Thompson, *Rep. Prog. Phys.*, **48**(1985), 531.
[12] J. L. Hall and S. A. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **29**(1976), 367.
[13] D. Habs *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods*, **B43**(1989), 390.
[14] S. Schroder *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **64**(1990), 2901.

OPTICAL RESONANCE METHOD FOR MEASURING ION ENERGY

SHI WEI LU FU-QUAN WU SONG-MAO TANG JIA-YONG YANG FU-JIA

Department of Nuclear Science, Fudan University, Shanghai, 200433

(Received 3 May 1991)

ABSTRACT

An optical resonance method for measuring ion energy has been suggested. The experimental details are described. The method relates the resonant optical transition of ions and the ion energy through the Doppler effect. The method can be applied in the energy range of 1eV—100 MeV, and its accuracy is expected to reach 5×10^{-5} near energy of 30 keV. We have measured the $^{142}\text{Nd}^+$ -ion energy by this method and the result is fairly good.

PACC: 2990; 3280