

# 共线快束激光光谱学及其应用<sup>1)</sup>

陆福全 施伟 杨福家

(复旦大学李政道物理学综合实验室,上海 200433)

**摘要** 共线快束激光光谱学是一种高分辨、高灵敏、新型的光谱学技术。它已经并将继续对原子结构和核结构的研究产生很大的影响。介绍了这一光谱学技术的基本原理、具体实现及其特点和优越性。在此基础上介绍它的研究内容和具体方法。还介绍用于短寿命同位素研究的在线共线快束激光光谱学技术。最后介绍共线快束激光光谱学技术在核结构研究等方面的应用。

**关键词** 共线,快束,激光光谱学

**Abstract** Collinear fast-beam laser spectroscopy is a new kind of optical spectroscopy with high resolution and sensitivity. In this paper we introduce the basic aspects of this spectroscopy, including its related concept, experimental methods as well as its advantages. We also describe the on-line collinear laser spectroscopy technique for short-lived unstable isotopes. finally some applications of the collinear fast-beam laser spectroscopy technique are presented.

**Key words** collinear, fast-beam, laser spectroscopy

共线快束激光光谱学(CFBLS)利用激光与快束在同一条轴线上相互作用,获得原子(包括离子)的共振激发光谱。它是70年代中期在束箔光谱学(存在级联跃迁干扰)和原子束激光光谱学(存在原子速度分布引起的多普勒增宽)基础上发展起来的新型光谱学,是激光特别是CW染料激光与加速器相结合的产物。它不但具有可研究各种元素的高电荷态、高激发态离子的特点,还具有比普通激光光谱学更高的光谱分辨率和灵敏度。正是由于具有这些优点,CFBLS技术已成为最先进的光谱学技术之一。特别是它与在线同位素分离技术相结合,是研究短寿命同位素核结构的重要手段。利用这一技术,丰富和完善了原子结构和核结构数据表,取得了许多具有重要意义成果。此外,CFBLS技术在同位素分离,新核素寻找,<sup>14</sup>C断代,中微子探测,环境监测,地矿样品中极微量元素、同位素的分析等方面具有广泛的应用前景。

## 1 CFBLS 技术

### 1.1 技术的产生

快束与激光相互作用技术的开始利用必须追溯到1973年 Andra 等人的先驱性工作<sup>[1]</sup>。在那个测量原子能级寿命的工作中,为了避免束箔方法中存在的级联效应,从而提高寿命的测量准确度,Andra 等人首次应用了快离子束与激光相互作用,不过两束的作用方式是交叉的。1976年, Dufay 等人<sup>[2]</sup>提出并尝试了共线方式的激光与快束相互作用。他们的动机是增加激光与快束的作用时间,以使快束的饱和光谱学研究变为现实。同一年, Kaufman<sup>[3]</sup> 和 Wing 等人<sup>[4]</sup>独立地揭示了快束在其运动方向上速度分布变窄的聚束效应(velocity bunching),明确了快束与激光共线作用可以大大减小

1) 国家自然科学基金资助项目。

由离子速度分布引起的多普勒增宽, 接近无多普勒的光谱学条件。随后, Anton 等人<sup>[5]</sup> 在实验上作了尝试。至此, 共线快束激光(线性)光谱学在理论和实验上奠定了基础。

## 1.2 基本原理和具体实现

光谱分辨率是影响光谱学研究的重要因素。传统光谱学(除非线性和高频光谱学)的光谱分辨率的提高主要受到多普勒增宽的制约。

$$\delta\nu_D = \nu_0 \sqrt{\frac{8kT \ln 2}{mc^2}}, \quad (1)$$

其中  $\nu_0$  为谱线频率,  $k$  为玻耳兹曼常数,  $T$  为介质的绝对温度,  $m$  为原子质量,  $c$  为光速。对一般的放电光源,  $\delta\nu_D \sim 5\text{GHz}$ 。

减小多普勒线宽有两条途径。一条是降低光源的温度  $T$ , 但效果很差。要把  $\delta\nu_D$  减小一个量级,  $T$  必须降低两个量级, 而这时几乎所有的物质都已凝固。另一条就是直接减小原子速度分布的宽度。

对快束(速度为  $v$ ), 由于聚速效应, 离子在其运动方向上的速度分布宽度  $\delta v$  变为

$$\delta v = \frac{v_0}{v} \delta v_0, \quad (2)$$

其中,  $v_0$  和  $\delta v_0$  分别为离子源中离子的平均速度和速度分布宽度。这样, 快离子束与激光共线作用时, 由速度分布引起的谱线的多普勒线宽

$$\delta\nu_0 = \nu_0 \frac{\delta E}{\sqrt{2eUm}c^2}, \quad (3)$$

其中  $U$  为加速电压,  $\delta E$  为离子束的能散。对  $50\text{keV}$ 、中等质量 ( $A \sim 100$ ) 的离子束, 如果  $\delta E = 1\text{eV}$ , 并且  $\nu_0 \sim 5 \times 10^{14}\text{Hz}$ , 那么  $\delta\nu_D \sim 5\text{MHz}$ 。

另外, 由于共线相互作用, 离子束和激光束的发散引起的多普勒增宽很小(没有一级增宽, 只有二级增宽)。

共线快束激光光谱的实际线宽取决于离子源的类型和性能、加速电压的稳定性、束流品质及自然线宽, 一般为  $5\text{—}50\text{MHz}$ , 接近自然线宽。可见, CFBLS 的光谱分辨率可比传统光谱学提高 2—3 个量级。

快束与激光共线作用中存在多普勒效应。离子坐标系中的激光频率  $\nu_0$  与实验室坐标系中的激光频率  $\nu$  之间存在关系

$$\nu_0 = \nu \frac{(1 \mp \beta)}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (4)$$

其中  $\beta = v/c$ , “+” 对应于反平行作用, “-” 对应于平行作用。由上式可知, 离子的共振激发既可通过改变激光频率来实现, 也可通过改变离子的速度来实现。后者称为多普勒调谐, 它是许多实验手段得以实施的基础。

CFBLS 实验装置的物理结构见图 1。图 1 中表示研究离子光谱的情形。来自加速器(也可以仅为离子源)的低能离子束进入实验装置与激光共线重叠。离子束通过一个由处于可调电位的法拉第盒形成的荧光观察区, 在那里被激光激发到待研究能级。离子退激辐射的荧光光子被由透镜、单色仪和光电倍增管组成的系统收集、分析和探测。设置法拉第盒, 一方面是为了把共振激发限制在荧光观察区, 以避免光抽运引起的跃迁下能级布居的耗尽, 另一方面是为了便于调谐共振。激光波长由波长计测量。研究原子光谱时, 离子束首先进入一个内有碱金属原子气 ( $10^{-1}\text{Pa}$ ) 的电荷交换室, 转变为原子束, 然后再与激光作用。后加速电压不再加在荧光观察区的法拉第盒上, 而加在与四周绝缘的电荷交换室上。

所用加速器的最高加速电压一般为  $1\text{—}10^2\text{kV}$ , 这是由于这个区间的高压技术(高压稳定技术)最为成熟。离子束与激光束必须很好地共线, 两束的平行度应优于  $1\text{mrad}$ , 以确保实现高的光谱分辨率。实验中, 信噪比是个很重要的因素。为了获得尽可能高的信噪比, 荧光探测必须既考虑跃迁强度, 又要考虑散射激光本底这个因素。事实上, 在许多实验中不探测激发跃迁上的荧光, 而探测离子退激到第三个能级上辐射的荧光, 这样可以有效地抑制散射激光本底。如果实验室坐标系与离子坐标系中激光波长的多普勒位移较大 ( $>2\text{nm}$ ), 那么即使激发和探测在同一跃迁上进行, 用性能很好的干涉滤色片仍可将荧光与散射激光有效地分

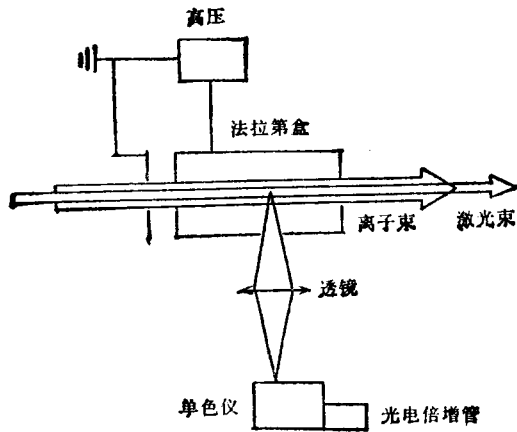


图1 CFBLS 实验装置的物理结构

开。为了提高激发事件的探测效率，同时排除散射激光的影响，可用非光学方法探测激发事件，如态选择碰撞电离或态选择电荷交换-粒子探测方法。

### 1.3 特点和优越性

(1) 光谱分辨率高，可达数 MHz。线宽一般为 10—50MHz，谱线中心的定位误差一般为 1—10MHz。

(2) 灵敏度高（获得具有足够信噪比的光谱所需的最小粒子流量）。对光学探测方法， $\sim 10^4$  粒子/s；对粒子探测方法， $\sim 10^2$  粒子/s。原则上可实现单原子探测。

(3) 利用多普勒调谐，容易实现共振激发。多普勒调谐的色散  $\sim 10\text{MHz/eV}$  ( $E \sim$  数十 keV)。

(4) 激发的选择性好，包括同位素选择性和能级选择性。测量原子能级寿命时，利用激光选择性地激发能级，可以避免束箔方法中存在的级联效应，从而大大提高寿命的测量准确度。

(5) 时间分辨率高，可达 0.1ns。利用“多普勒开关”技术，可实现 0.1ns 级的脉冲共振激发。

(6) 可研究各种元素的多种电荷态离子。现代各种离子源 (PIG, EBIS, ECR 等) 可提供几乎各种元素的各种电荷态的离子束，其中相当含量的离子处于激发所需的亚稳态。另外，利用电荷交换可获得快原子束，使用不同的气

体并改变气压，可控制亚稳离子的含量。

(7) 加速器可提供非常纯的离子束（同位素纯，甚至不合同量异位素）。这在某些情况下是十分重要的。

## 2 CFBLS 的研究内容和具体方法

### 2.1 离子能量(速度)

利用光学共振的多普勒位移可以确定离子的能量。具体方案有多种，这里介绍最基本的两种。

第一种：测量某一跃迁的共振激发激光波数  $\nu$ ，然后利用下式确定离子能量

$$E = \frac{1}{2} mc^2 \left( \frac{\nu^2 - \nu_0^2}{\nu^2 + \nu_0^2} \right)^2, \quad (5)$$

其中  $\nu_0$  为跃迁的波数，可从美国国家标准局（现美国国家标准与技术研究所）出版的原子能级手册<sup>[6]</sup>中查得。

第二种：分别测量离子束与激光平行和反平行作用时某一跃迁的共振激发激光波数  $\nu_+$  和  $\nu_-$ ，然后利用下式确定离子能量

$$E = \frac{1}{2} mc^2 \left( \frac{\nu_+ - \nu_-}{\nu_+ + \nu_-} \right)^2. \quad (6)$$

离子能量的测量准确度与能量有关。能量越高，测量准确度越高。在 10—10<sup>2</sup>keV 区间，一般为  $2 \times 10^{-4}$ ，最好可达  $2 \times 10^{-5}$ （对第二种方案）。离子能量的测量范围大致为 1eV—10<sup>2</sup> MeV<sup>[7]</sup>。

加速器包括储存环上配置 CFBLS 装置，可对离子能量和离子束能散进行在线诊断和测量。

### 2.2 跃迁能量

利用共振激发可以准确地测定某一确定同位素原子的跃迁能量，从而确定原子能级的能量，完善现有原子能级数据表。具体有两种方案。

第一种：测量跃迁的共振激发激光波数  $\nu$ ，然后利用(4)式确定跃迁的波数  $\nu_0$ 。

第二种：分别测量离子束与激光平行和反平行作用时跃迁的共振激发激光波数  $\nu_+$  和

$\nu_-$ , 然后利用下式确定跃迁波数

$$\nu_0 = \sqrt{\nu_+ \nu_-} \quad (7)$$

综合上述两种方案, 跃迁波数的测量误差主要来源于激光波数的测量误差。如果使用精度最好的波长计 ( $10^{-8}$ ) 测量激光波数, 那么跃迁波数的测量准确度可达  $1 \times 10^{-8}$ 。

Poulsen 等人<sup>[8]</sup>测定了  $^{238}\text{U}\text{I}$  和  $^{238}\text{U}\text{II}$  能谱中一些跃迁的能量, 测量准确度为  $1 \times 10^{-7}$ , 这主要是受激光波数测量准确度 ( $10^{-7}$ ) 的制约。

### 2.3 同位素位移

实验测量待研究同位素的共振激发光谱, 然后利用下式确定同位素 A 与 B 之间的同位素位移(激光与快束平行作用)

$$\begin{aligned} \delta\nu^{AB} &= \nu_0^A - \nu_0^B \\ &= \Delta\nu^{AB}(1 - \beta_A) - \nu^B(\beta_A - \beta_B) \\ &\quad + \frac{1}{2}(\nu^A\beta_A^2 - \nu^B\beta_B^2), \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $\Delta\nu^{AB}$  为同位素 A 与 B 的共振激发激光波数差,  $\nu^A$  和  $\nu^B$  分别为同位素 A 和 B 的共振激发激光波数,  $\beta_A$  和  $\beta_B$  则分别为它们的速度与光速比。式中合理地忽略了正比于速度三次方以上的项。如果用高精度的 F-P 标准具测量不同同位素之间的共振激发激光波数差, 同时用波长计测各同位素的共振激发激光波数, 这时同位素位移的测量误差主要来源于共振中心的定位误差, 一般为  $1-10\text{MHz}$ 。

我们用 CFBLS 方法首次精确地测定了

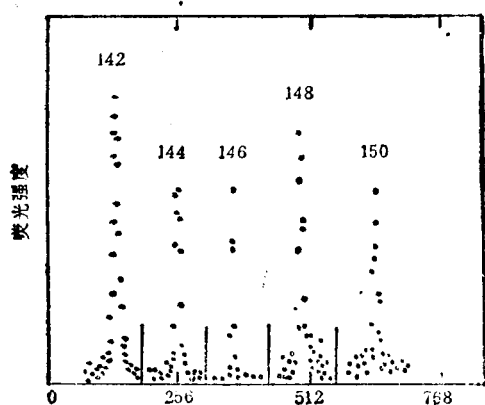


图2 NdII 570.2nm 谱线中五个稳定同位素的共振激发光谱  
(道数与激光波数成线性关系, 特定同位素的共振峰用对应的质量数标志)

NdII 570.2nm 谱线的同位素位移<sup>[9]</sup>。图 2 给出了共振激发光谱, 其中包含了质量数分别为 142, 144, 146, 148 和 150 的五个同位素的共振峰。

### 2.4 超精细结构

用 CFBLS 可测量原子光谱的超精细结构, 从而确定超精细作用常数, 测量误差一般为  $0.1-10\text{MHz}$ 。

Short 等人用 CFBLS 测量了  $^{131}\text{Xe}\text{II}$  的  $5d^4D_{7/2}-6p^4P_{5/2}$  跃迁的超精细结构, 所有超精细能级间跃迁的光谱线可清晰分辨开<sup>[10]</sup>。

### 2.5 原子能级寿命

测量原子能级寿命的基础是, 对匀速运动的离子, 它的时间坐标与位置坐标之间存在一一对应的线性关系:  $t_2-t_1 = (x_2-x_1)/v$ , 离子退激辐射荧光的强度在时间空间的衰变行为, 在位置空间也同样表现出来:

$$\begin{aligned} I(t_2) &= I(t_1)e^{-(t_2-t_1)/\tau} = I(x_1)e^{-(x_2-x_1)/v\tau} \\ &= I(x_2), \end{aligned} \quad (9)$$

其中  $\tau$  为能级的寿命。对快速运动 ( $v \sim 4 \times 10^5\text{m/s}$ ) 的离子, 它在一个寿命时间内飞行的距离  $\sim 4\text{mm}$  ( $\tau \sim 10\text{ns}$ ), 而荧光观察系统的位置分辨一般可达  $0.1\text{mm}$ , 因此通过观测荧光强度在离子飞行路径上的衰变曲线, 就可确定能级的寿命。实验上一般利用“多普勒开关”技术使离子在后加速区内脉冲激发。

以我们测量 NdII ( $23537$ ) $_{9/2}$  能级寿命的实验<sup>[11]</sup>为例, 说明具体的实验方法。实验装置见图 3。从同位素分离器输出的  $30\text{keV}\text{Nd}^{3+}$  束与来自染料激光器的激光束共线重叠。离子束首先在后加速电场内的某一点被激光脉冲激发到待研究能级, 然后在飞行路径上退激并辐射荧光。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。后加速电极装在一个在步进马达驱动下可移动的滑板上。实验中改变后加速电极的位置, 同时测量相应的荧光强度, 得到的荧光衰变曲线见图 4。最后, 对衰变曲线拟合后, 得到 ( $23537$ ) $_{9/2}$  能级的寿命。

CFBLS 方法是目前最准确、可靠的原子能

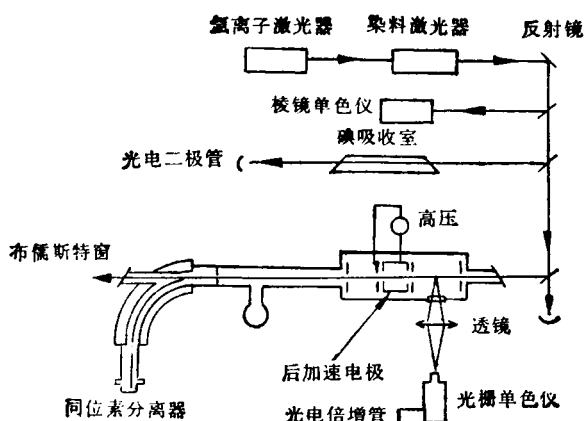


图3 用于原子能级寿命测量的 CFBLIS 实验装置

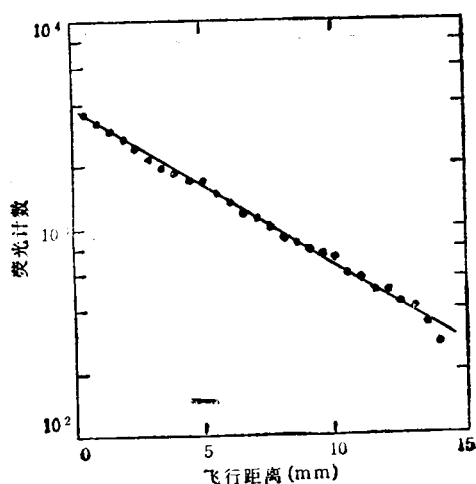


图4 NdII (23537) $1/2$  能级的衰变曲线

级寿命测量方法。它的测量范围为  $1-10^3$  ns，测量准确度一般为 1%，最好可达 0.1%<sup>[1]</sup>。利用由这种方法测得的原子能级寿命数据，解决了元素的太阳光球丰度与陨石丰度不一致的问

题。最近, Texas A&M 大学的 Church 等人用 CFBLIS 方法准确测定了  $\text{CaII}4p^2P_{3/2}$  和  $^2P_{1/2}$  能级的寿命(准确度达 0.3%)<sup>[12]</sup>, 为研究碱金属原子结构中的宇称不守恒效应创造了条件。

### 3 用于短寿命同位素研究的在线 CFBLIS 技术

由于 CFBLIS 具有非常高的光谱分辨率和实验灵敏度, 因此它与在线同位素分离技术相结合, 可应用于短寿命同位素的光谱研究。

为了获得短寿命同位素的光谱, 进而研究它们的核结构, 近 20 年来, 世界上相继在高能加速器旁建立了近十个在线同位素分离 (ISOL) 和 CFBLIS 装置。如欧洲核子中心 (CERN) 的 ISOLDE, 美国橡树岭 (Oak ridge) 的 UNISOR, 美国布鲁克海文 (Brookhaven) 的 TRISTAN, 日本理化研究所 (RIKEN) 的 GARIS/IGISOL, 以及俄罗斯列宁格勒核物理研究所 (LINP) 的 IRIS 等。

这里以 ISOLDE 装置为例, 介绍在线 CFBLIS 技术。ISOLDE 装置由在线同位素分离器和 CFBLIS 装置两部分组成 (见图 5)。来自高能加速器的 600MeV 质子束直接打在线同位素分离器离子源内的靶上, 发生核反应, 产生待研究的同位素。同位素分离器对核反应产物进行气化、电离、加速和质量分析后, 输出一束 60keV 待研究同位素的离子束。离子束经偏转和聚焦后, 穿过一个处于可调电位的电荷交换室 (内有碱金属原子气), 而部分转变为

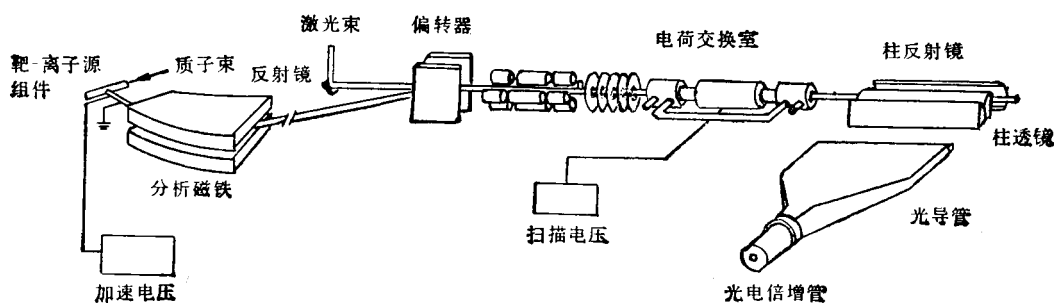


图5 用于在线 CFBLIS 研究的 ISOLDE 装置的基本结构<sup>[13]</sup>

原子束。原子束再与激光共线作用。在电荷交换室后面,用一个柱反射镜和一组柱透镜(长为20cm)把荧光会聚在光导管上。荧光最后由光电倍增管探测。

同位素分离器加速电压的稳定性和长时间漂移不超过  $10^{-3}$ 。电荷交换室的电位可在  $0 \pm 10$ keV 范围内调节,这样多普勒调谐的范围达 80GHz。研究离子光谱时,离子束不经电荷交换,直接与激光共线作用,而用于多普勒调谐的后加速电压便加在与四周绝缘的荧光观察盒上。

实验中,通过扫描后加速电压获取光谱。在比较有利的条件下,原子的总探测效约为 1%,实验灵敏度为  $10^4$  粒子/s。正是在这个装置上发现并鉴定了新核素  $^{232}\text{Ra}^{[14]}$ 。

对于短寿命同位素研究的在线 CFBLIS 技术来说,实验灵敏度是一个关键因素。为了进一步提高灵敏度,必须一方面提高原子的总探测效率,另一方面降低本底。为此,发展了其他几种原子激发事件的探测方法:

- (1) 荧光与原子符合探测法;
- (2) 态选择碰撞电离或电荷交换-粒子探测法;
- (3) 光抽运效应的放射性探测法;
- (4) 多步共振电离-粒子探测法。

利用这些探测方法,CFBLIS 的灵敏度可达  $10^2$  粒子/s。

## 4 CFBLIS 技术的应用

CFBLIS 技术除了在原子物理研究中有特殊优越性外,在原子核物理等领域也有广泛的应用。

### 4.1 核结构研究

原子光谱中的超精细结构和同位素位移把原子结构与核结构联系起来。

(1) 超精细结构中,总角动量为  $F$  的能级的超精细作用能量为

$$W_F = \frac{1}{2} KA$$

$$+ \frac{3/4K(K+1) - I(I+1)J(J+1)}{2I(2I-1)J(2J-1)} B, \quad (10)$$

式中,  $I$  为核自旋,  $J$  为电子总角动量,  $K = F(F+1) - I(I+1) - J(J+1)$ , 磁偶极作用常数

$$A = \mu_1 H_c(0)/IJ, \quad (11)$$

电四极作用常数

$$B = eQ_s \varphi_{JJ}(0), \quad (12)$$

其中,  $\mu_1$  为核的磁偶极矩,  $Q_s$  为核的电四极矩;  $H_c(0)$  和  $\varphi_{JJ}(0)$  分别为电子在核处产生的超精细磁场强度和电场梯度,可由经验方法或理论方法确定。

(2) 质量数分别为  $A$  和  $B$  的同位素之间的同位素位移

$$\delta\nu^{AB} = f\delta\langle r^2 \rangle^{AB} + M \frac{A-B}{AB}, \quad (13)$$

其中第一项是场位移,第二项为质量位移。场位移中,  $f$  为电子因子,它正比于跃迁前后核处电子密度的变化,  $\delta\langle r^2 \rangle^{AB}$  为同位素  $A$  与  $B$  的核电荷半径均方差。

可见,通过测量和分析谱线的超精细结构和同位素位移,可以确定核的性质,包括自旋 ( $I$ )、磁偶极矩 ( $\mu_1$ )、电四极矩 ( $Q_s$ ) 和核电荷半径均方差 ( $\delta\langle r^2 \rangle$ )。多年来,利用 CFBLIS 技术获得了许多同位素特别是短寿命同位素的核性质数据。

### 4.2 十分稀有原子核的探测与鉴定

十分稀有原子核(特别是长寿命核)的探测与鉴定,是核物理及其应用中需要解决的一个困难问题。共线快束激光光谱学技术,特别是它与共振电离光谱学技术(RIS)相结合产生的共线快束激光共振电离光谱学技术(CFBLRIS),具有高分辨率、高灵敏度和同位素选择性的特点,是探测和鉴定十分稀有原子核的有效手段。

最近, Aseyev 等人<sup>[15]</sup>提出了一个用 CFBLRIS 技术探测 Kr 的相对丰度为  $5 \times 10^{-11}$  的同位素  $^{85}\text{Kr}$  和相对丰度为  $5 \times 10^{-13}$  的同位素  $^{81}\text{Kr}$  的具体方案。他们估计原子的总探

测效率可达 2%，并指出  $^{85}\text{Kr}$  和  $^{81}\text{Kr}$  的探测主要受到丰同位素与残余气体碰撞电离所产生的本底的影响。

近年来，人们还致力于把 CFBLIS 和 CFBLRIS 技术应用于  $^{14}\text{C}$  断代和中微子探测，已取得阶段性进展。

### 参 考 文 献

[1] H. J. Andra, A. Gaupp and W. Wittmann, *Phys. Rev. Lett.*, 31-8(1973), 501.  
[2] M. Dufay, M. Carre, M. L. Gaillard et al., *Phys. Rev. Lett.*, 37-25(1976), 1678.  
[3] S. L. Kaufman, *Opt. Commun.*, 17-3(1976), 309.  
[4] W. H. Wing, G. A. Ruff, W. E. Lamb et al., *Phys. Rev. Lett.*, 36-25(1976), 1488.  
[5] K.-R. Anton, S. L. Kaufman, W. Klempt et al., *Phys. Rev. Lett.*, 40-10 (1978), 642.  
[6] W. C. Martin, R. Zalubas and L. Hagan, *Atomic Energy Levels—The Rare Earth Elements*, NSRDS-NBS 60, NBS, Washington, (1978).

[7] 施伟、陆福全、吴松茂等,物理学报,41-4 (1992),568.  
[8] O. Poulsen, T. Andersen, S. M. Bentzen et al., *Phys. Rev. A*, 24-5(1981), 2523.  
[9] Lu Fuquan, Wu Songmao, Wang Yansen et al., *Phys. Rev. A*, 44-3(1991), 1843.  
[10] R. T. Short, S. Mannervik, M. Larson et al., Abs. 11th Int. Conf. on At. Phys., Paris,(1988), VIII-15.  
[11] Shi Wei, Lu Fuquan, Wu Songmao et al., *Phys. Rev. A*, 43-3(1991), 1451.  
[12] Jian Jin and D. A. Church, *Phys. Rev. Lett.*, 70-21(1993), 3213.  
[13] A. C. Mueller, F. Buchinger, W. Klempt et al., *Nucl. Phys.*, A403-2 (1983), 234.  
[14] S. A. Ahmad, W. Klempt, R. Neugart et al., *Phys. Lett. B*, 133-1(1983), 47; *Nucl. Phys.*, A 483-2(1988), 244.  
[15] S. A. Aseyev, Yu. A. Kudryavtsev, V. S. Letokhov et al., *J. Phys. B*, 24-11(1991), 2755.

## 生 物 电 磁 学

周 兴 旺

施 英

(杭州大学物理系,杭州 310028)

(杭州大学环境科学系,杭州 310028)

**摘要** 生物电磁学是一门关于电磁学与生物、医学相互渗透的边缘交叉学科,它研究生物系统与电磁场的相互作用。介绍了电磁场对生物的热效应和非热效应,人体电磁能吸收的数值模型和安全辐照标准。

**关键词** 电磁场,生物效应,模型,环境标准

生物电磁学是一门研究电磁波与生物系统相互作用的边缘交叉学科。最初研究当始于第二次世界大战中许多军用电子设备的出现,特别是雷达微波辐射所产生的生物效应。第二次世界大战结束后,许多科学家对于射频和微波治疗肿瘤及电磁波热疗等问题的研究兴趣逐日增长,并注意到微波辐照下的生物危害效应。1966年国际微波功率协会(IMPI)及其出版物 *Journal of Microwave Power* 开始把相当的力量集中于电磁波在医学、生物学的应用上,1968年美国建立了第一个研究生物电磁场的政府机构——辐射卫生局(BHR)。一定场强电磁波对生物的效应除使组织局部受热升温

外,许多理论提出了低能级电磁波对生物体的非热效应存在的可能性。随着对这种效应争论的发展,美国电气和电子工程师协会微波理论与技术学会(IEEE MTT)于1970年建立了“微波辐射生物效应技术委员会”,并于次年出版了生物电磁学专辑。到1978年,生物电磁学的研究日趋广泛,国际无线电科学协会(URSI)于1979年举行了第一次国际会议,并于1980年创办了“*Bioelectromagnetics*”杂志。此后,URSI每年均举行一次电磁辐射生物效应会议。

随着电磁辐射广泛应用于临床、医学研究及保健等方面,随着通讯设备、工农业、交通、科研,生活中电子电器设备的迅速增加,电磁辐射

物理