

文章编号: 1007-4627(2019)02-0161-09

## 用于核物理研究的精密激光谱技术的发展和展望

刘永超<sup>1,2</sup>, 白世伟<sup>1</sup>, 杨晓菲<sup>1,†</sup>

(1. 北京大学物理学院和核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871;

2. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

**摘要:** 原子核基本性质(自旋、质量、寿命、磁矩、电四极矩和电荷半径等)与原子核的内在结构密切相关,是检验和发展原子核理论模型的重要依据。实验上可以通过多学科交叉的精密激光谱技术测量原子核外电子的超精细结构和同位素移位,来模型独立地提取原子核的自旋、磁矩、电四极矩和电荷均方根半径等多个核物理参量。这些基本性质的系统测量可以用于探索不稳定原子核中展现出来的新奇的物理现象与规律。近年来,为了测量产额更低的丰中子核的基本性质,激光谱技术不断更新和发展,以实现高分辨、高效率测量。本文详细介绍了激光谱测量的基本原理以及由此发展起来的用于不稳定原子核结构研究的各类互补的激光谱学技术,如共线激光谱(高分辨率低灵敏度)、在源激光谱(高灵敏度低分辨率)、共线共振电离谱(高分辨率高灵敏度)等激光谱技术,以及在不同核区的测量优势和局限。最后结合我国正在发展和规划中的新一代放射性核束装置,讨论精密激光谱技术在国内的发展以及在核物理研究中的应用。

**关键词:** 放射性核素; 核基本性质; 激光谱技术; 高分辨高效率; 核结构

**中图分类号:** O571.3      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.02.161

### 1 引言

不稳定原子核基本性质(自旋、磁矩、电四极矩和电荷半径等)的系统性精确测量是研究原子核结构的主要手段之一。实验上通常需要结合各种实验探测手段来全面地获取原子核的基本性质,例如,可以通过 $\beta$ 衰变核磁共振( $\beta$ -NMR)、核四极共振(NQR)等技术来测量核素的磁矩、电四极矩<sup>[1]</sup>;利用转移反应,衰变等实验手段可以间接确定原子核基态、激发态的自旋;利用反应截面测量和电子散射实验可获取原子核物质和电荷半径等信息<sup>[2-3]</sup>。精密激光谱学技术可以同时确定原子核的自旋、磁矩、电四极矩和电荷半径等四个基本物理参量。此方法结合了原子激光谱学,放射性束流操控以及核探测等技术,通过精密测量核外电子的超精细结构和同位素移位来模型独立地提取原子核的基本性质,具有独特和显著的优势<sup>[4]</sup>。

传统的共线激光谱技术是在 20 世纪 80 年代被应用到不稳定原子核基本性质的研究中,且随着加速器技术的发展及越来越多的不稳定原子核的产生而在不断革新中发展。特别是近一二十年,激光谱技术与射频四

极束流冷却(RFQ)技术<sup>[5]</sup>充分结合,将其测量灵敏度提高了 2~3 个量级<sup>[6]</sup>,使得对产额为  $10^{3-4}$  离子/秒的丰中子核的研究成为可能。随后的一系列放射性核素的激光谱学测量实验已经在不同核区取得了重要突破性的结果,如轻核区丰中子核的晕结构,中质量区的壳层演化,重质量区形状共存等<sup>[7-10]</sup>。随着国际上各实验室新一代放射性束流装置的部署和发展,各种实验测量会向更加远离 $\beta$ 稳定线(接近于滴线区)的丰中子核区拓展。此时,核素的产额会更低且常常伴随着大量的稳定杂质,这对传统的激光谱测量技术提出了挑战。近年来,各个实验室都在不断改进现有和发展新型的激光谱技术,以实现了对低产额核素的高分辨高效率测量,如目前在 ISOLDE 发展的新型共线共振电离谱技术已经实现了对产额为 20 离子/秒核素的高分辨测量<sup>[11]</sup>。

本文将基于激光谱技术常用的荧光测量和离子测量的手段,详细介绍与之相关的各类激光谱学技术,如共线激光谱、在源激光谱和基于原子/离子俘获的激光谱技术等。通过分析这些技术在不同质量区核素测量中的优势和局限,进一步讨论适用于我国新一代放射性核束装置的激光谱学技术。

收稿日期: 2018-11-29; 修改日期: 2019-03-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0404403); 国家自然科学基金面上项目(11875073)

作者简介: 刘永超(1997-),男,山东青岛人,准博士研究生,从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: ychliu2015@lzu.edu.cn

† 通信作者: 杨晓菲, E-mail: xiaofei.yang@pku.edu.cn.

## 2 基本原理

### 2.1 超精细结构

原子核的磁矩与核外电子运动在原子核处产生的磁场存在磁偶极相互作用，导致了核外电子能级的进一步超精细分裂。原子核具有一定的形状存在电多极矩，在电子在核处形成的电场梯度下，会产生电多极相互作用，导致超精细结构能级的移位。

若已知原子核的磁矩为  $\mu_I$ ，电子运动在原子核处产生的磁场强度为  $B_e(0)$ ，则磁偶极相互作用可以描述为

$$H_m = \frac{1}{2} \frac{\mu_I B_e(0)}{IJ} C = \frac{1}{2} AC, \quad (1)$$

式中  $A$  为磁超精细相互作用常数，它将决定超精细结构中能级分裂的大小。 $C = F(F+1) - J(J+1) - I(I+1)$ ， $F = I + J$  为原子体系总角动量的量子数， $I$  为原子核的自旋， $J$  为核外电子组态总角动量。不同的超精细能级之间的电子跃迁满足选择规则：

$$\Delta F = 0, \pm 1. \quad (2)$$

此外，原子核与核外电子的电四极相互作用导致超精细能级进一步移位，可描述为

$$H_q = B \frac{3C(C+1) - 4I(I+1)J(J+1)}{8I(2I-1)J(2J-1)}, \quad (3)$$

式中  $B = eQ_s \langle \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \rangle$  为电四极超精细结构常数。这里的  $\langle \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \rangle$  为核外电子在原子核位置产生的电场梯度。因此，超精细能级分裂和移位可描述为

$$\Delta E_{\text{hfs}} = \frac{1}{2} AC + B \frac{3C(C+1) - 4I(I+1)J(J+1)}{8I(2I-1)J(2J-1)}. \quad (4)$$

实验中通过测量原子或离子超精细结构能谱，即可确定超精细结构常数  $A$ ， $B$ ，进而计算出原子核的自旋、磁矩及电四极矩。如图 1 所示，核外电子的能态  $^2S_{1/2}$  和  $^2P_{3/2}$ ，与原子核的自旋  $I = 3/2$  耦合造成了精细结构能级  $F$ 。不同的超精细能级之间的跃迁满足公式 (2) 所示的选择规则，因此核外电子由低能态  $^2S_{1/2}$  向高激发态  $^2P_{3/2}$  跃迁中会形成如图 1 所示的 6 个共振峰。对这些共振峰的严格解析，就可以确定公式 (4) 中描述的  $A$ ， $B$  值。

由于核素质量数  $A$  和核电荷体积的不同，同一元素的不同同位素的核外电子能级会产生偏移，称之为同位素移位。具体表现为不同的同位素之间，图 1 所示的跃迁频率  $\nu$  会有所偏移。两个同位素  $A$ ， $A'$  的同位素移位  $\delta\nu^{A,A'}$  与其均方根电荷半径之差有直接的关联，具

体描述为

$$\delta\nu^{A,A'} = M \frac{A' - A}{AA'} + F \delta \langle r^2 \rangle^{A,A'}, \quad (5)$$

式中  $M$ ， $F$  为与电子跃迁能级相关的原子常数， $A$ ， $A'$  分别为两个同位素的质量。公式中第一部分是由于原子核的质量引起的，称为质量移位；第二项是原子核的电荷分布造成的，称为场移位。实验中通过测量不同同位素的跃迁频率  $\nu$  之差，就可以推导出其电荷半径之差。

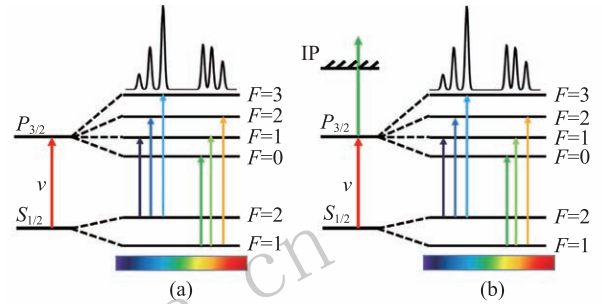


图 1 (在线彩图) 原子 (离子) 超精细结构示意图: 原子核自旋为  $I = 3/2$

(a) 用于荧光探测的激光共振激发; (b) 用于离子探测的激光共振电离。

### 2.2 探测方法

放射性核素的激光谱测量常采用激光诱导荧光探测和激光共振电离离子探测两种方式来获取原子或离子的超精细能谱图。

图 1(a) 给出了用于荧光探测的激光共振激发模式。原子核外电子被单束频率连续可调的窄带激光由低能态共振激发到高能态，激发态电子在退激发过程中会产生荧光光子。实验中常采用光电倍增管记录退激发的荧光来获得超精细结构能谱图。由于测量中只使用了单束激光，实验操作相对成熟且连续激光的窄线宽也是获得高分辨率的必要条件之一。因此，荧光探测被广泛用于放射性核素的共线激光谱测量中，如国际上 CERN-ISOLDE 放射性束流装置上的 COLLAPS 设备<sup>[12]</sup>，芬兰的 IGISOL 装置<sup>[13]</sup>上的共线激光谱设备，美国 MSU 的 NSCL 实验室的 BECOLA 共线激光谱<sup>[14]</sup>及加拿大 TRIUMF 的 CFBS 装置<sup>[15]</sup>等。

图 1(b) 显示的是最简单的两步激光共振电离模式。测量中会首先用频率可调脉冲激光将原子核外电子共振激发到高能态 (如图中  $P_{3/2}$ )，再利用大于跃迁频率的脉冲激光将电子激发到电离势以上，通过测量共振电离后的  $1^+$  离子就可以记录第一步共振激发所对应的超精细结构能级。值得注意的是，有些元素存在合适的自

电离态, 实验中也可以利用固定频率的脉冲激光将电子激发到自电离态来获取更高的电离效率。共振电离方法不仅可以用于不稳定核超精细结构光谱的测量, 也常被用于放射性束流装置上作为激光离子源来纯化和提取核素。国际上基于共振电离方法发展出不同的放射性核素光谱测量技术, 如在源共振电离谱、共线共振电离谱、在线气室和在线喷注共振电离谱等。

### 3 用于不稳定核基本性质测量的激光谱学技术

图 2 总结了当今国际上目前正在运行、在建和规划中的激光谱设备, 它们大多都是基于以上所述的两种探测方法来测量不稳定核素的基本性质。其中有些激光谱装置, 还被用于提取和纯化放射性束流装置上的离子束, 如图中所示的 RILIS 激光离子源。同时, 有些激光谱装置还有多学科应用的前景, 如目前 CERN-ISODLE 正在建设中的 VITO 装置, 以及法国在建的 ALTO 装置等。下面我们将详细介绍用于放射性核基本性质测量的几种常用的激光谱学装置, 并分析讨论它们各自的优势和局限, 介绍和讨论将以 CERN-ISODLE 的在源激光谱、共线激光谱、共线共振电离谱, 鲁汶大学的在线气室与在线喷注共振电离光谱及原子阱设备为例。

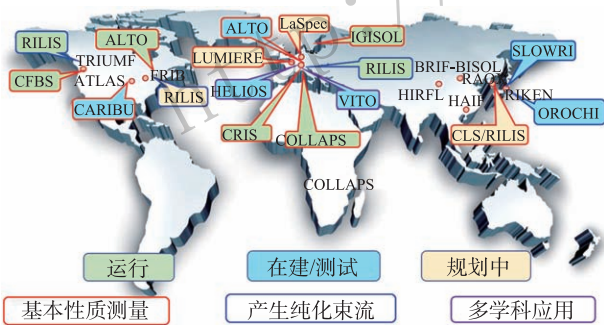


图 2 (在线彩图) 激光谱设备在国际上各大科学装置上的分布

#### 3.1 在源激光谱

在源激光谱技术是基于激光共振电离和离子探测方法实现超精细结构能谱的重建。以图 3 所示的 CERN-ISODLE 的 RILIS 装置为例<sup>[16]</sup>, 高能质子(轻粒子)与厚的靶材料发生反应后产生各种不同的放射性产物, RILIS 采用激光电离的方式可以有效地选择电离实验所需的放射性核素, 离子化的放射性核素由提取电极引出经过质量分离后, 被后端的离子探测器记录来获取超精细结构谱图, 或者送入到后续实验终端用于各种实验测

量。如图所示, 激光离子源一般在反应热腔中进行激光电离<sup>[17]</sup>, 这样可以有效提高电离效率。热腔环境限制了原子的运动范围, 使得原子密度较高, 高温环境也抑制了热腔内壁对于原子的吸收, 提高了激光电离的效率。

图中右侧给出了一个典型的三步共振电离模式图, 其中也包含了激发到自电离态的电离模式。在源激光谱的共振电离中, 每步激光脉冲的重复频率由原子在热腔内的渡越时间决定, 对于温度高达 2000 K 的热腔, 渡越时间约为  $10^{-4}$  s, 这就需要激光脉冲的重复频率至少应为 10 kHz 以避免占空比缺失。所以, 在源共振电离常采用功率较大的脉冲激光来进行超精细谱图的测量, 而脉冲激光的带宽(GHz 量级)自然也就限制了在源激光谱测量超精细谱的分辨率。此外, 原子在热腔环境下会有较大的热运动分布, 导致在源激光谱的分辨率受到多普勒展宽的限制:

$$\delta\nu_D = 7.16 \times 10^{-7} v_0 \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (6)$$

这里  $T$  是热腔的温度, 单位为 K,  $M$  是原子的质量数;  $v_0$  是原子所选能级间的跃迁频率, 单位是  $\text{cm}^{-1}$ 。显然, 为了提高原子的流动性热腔内部的温度往往很高, 会导致很大的多普勒展宽。因此, 利用在源激光谱测量的超精细结构谱图分辨率通常在 GHz 以上, 使得在源激光谱技术可测量核素的范围局限在超精细能级分裂很大的重核区<sup>[18]</sup>。对于轻核区和中重核区的大部分核素来说, 原子的超精细结构能级分裂很小(一般在几十 MHz), 很难采用在源激光谱进行精确测量。即使在重核区, 由于分辨率的限制, 在源激光谱往往很难精确提取原子核的电四极矩信息。

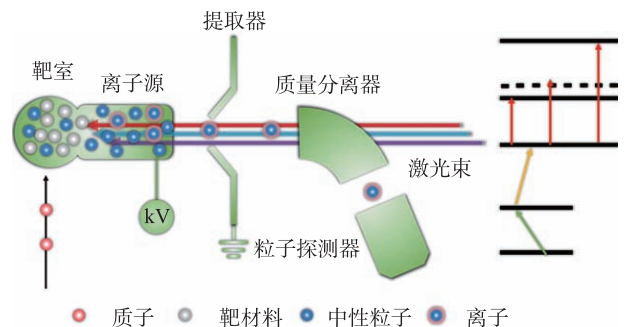


图 3 (在线彩图) 在源激光谱结构示意图

尽管分辨率较低, 但在源激光谱技术在对产额较低的核素基本性质测量方面有独特的优势, 这主要是来自于其非常高的测量效率。一方面由于在源共振电离最接近于放射性核素的产生靶区, 能够更有效地电离所接触的核素范围, 另一方面取决于其在热腔中的高电离效



率。到目前为止,在源激光谱在Pb( $Z = 82$ )核区的不稳定核素奇特结构研究方面发挥了重要的作用,例如,通过核素电荷半径的测量系统地研究了这一核区形状共存,三轴形变等奇特结构<sup>[19]</sup>。近几年,在源激光谱RILIS与衰变探测技术、多反射飞行时间谱技术充分结合(如文献[20]中图a),使得其测量可以应用到产额小于1离子/秒的远离稳定线核素,大大提高其测量效率及灵敏度。近期,多实验技术结合的方法被应用到丰质子Hg同位素的电荷半径测量,结合先进的壳模型理论,成功解释了Hg同位素的奇偶歧离反常增大现象<sup>[20]</sup>。

### 3.2 在线气室与在线喷注共振电离光谱

上节提到的在源激光谱RILIS主要是针对在线同位素分离装置(ISOL)的应用和物理测量,如CERN-ISOLDE装置。共振激光电离方法也常被用到在线气室中来测量各种核反应(如转移反应<sup>[21]</sup>、重离子融合蒸发<sup>[22]</sup>、多核子转移反应<sup>[23]</sup>等)产生的放射性同位素的基本性质测量。这种在线气体室设备近几年多被应用于较重核区的研究,例如日本理化学研究所的KISS装置就是利用激光共振电离的方式来测量多核子转移反应产生的重元素的基本性质<sup>[23]</sup>。具体测量实验中,高能

的离子束流被引入到气室中与其中的靶材料发生反应产生放射性同位素,再利用激光共振电离的方式筛选核素并测量其超精细结构。这里我们以比利时鲁汶大学的在线气室装置为例,如图4所示,加速器产生的高能 $^{22}\text{Ne}$ 离子注入到置于气体室的Au靶上通过融合反应产生 $^{212-215}\text{Ac}$ 同位素。这里常使用Ar/He气体作为缓冲物质阻停反应产物<sup>[24]</sup>,同时使反应产物中性化为原子态。阻停气室具有一定的压强可使反应产物随着惰性气体流入电离室。在这里,未被中性化的离子会在电场作用下被过滤掉,中性放射性核素在多次脉冲激光作用下发生共振电离成为离子态,并被射频离子导向器引入到质量分离器中,随后被离子探测器接收。值得注意的是,这里常采用探测离子衰变产物( $\alpha$ 衰变或 $\beta$ 衰变)的方法来测量超精细结构谱,例如,图4所示的实验是测量Ac核素衰变后的 $\alpha$ 粒子。在线气室共振电离技术同样具有很高的探测效率,质量分离和衰变产物探测的结合也大大降低了杂质离子带来的本底计数,使得此方法可以应用到几个离子/秒产额的核素进行测量。同样,在线气室共振电离光谱方法也受到分辨率低的局限性,主要来自于气室中碰撞和高温导致的多普勒谱线展宽效应。

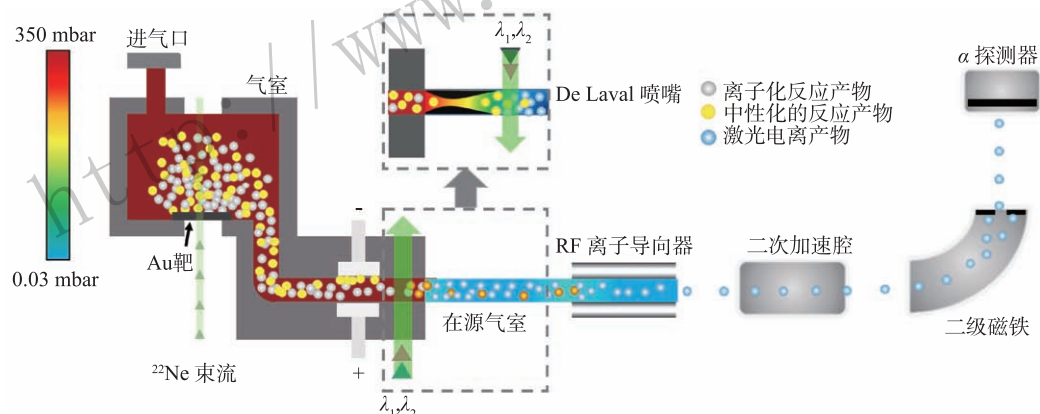


图4 (在线彩图)鲁汶大学在线气室与在线喷注共振电离光谱设备示意图<sup>[25]</sup>

因此,鲁汶大学的实验研究组在在线气室的基础上对离子筛选过程和气室结构做了相应改进,发展了在线喷注共振电离光谱技术<sup>[25]</sup>,大大提高了共振电离光谱测量的分辨率。图4中间部分显示改进后的在线喷注结构,与在线气室设计最大的不同是经过电场过滤后的中性放射性核素通过拉伐尔喷管(de Laval nozzle)喷出气室,形成超声速气体射流,满足准碰撞自由的环境<sup>[26]</sup>。含有放射性核素Ac的气体射流与多步脉冲激光束作用,并被共振电离成离子态。离子态的Ac核素随射频离子导向器后经过质量分离器被离子探测器接收。此方法将超精细谱的分辨率提高了一个量级,具体体现在喷注室

中激光束方向与原子束方向垂直,降低了因多普勒效应而产生的频率展宽;喷嘴的设计以及喷注室低温低压的条件提高了原子的流动速度,降低了能量离散导致的谱线展宽。在线喷注共振电离光谱装置对 $^{214,215}\text{Ac}$ 同位素测量的谱线分辨率提高到400 MHz<sup>[25]</sup>。这种新技术不仅具有高效率的优势,还可以用于对超精细能级分裂较小的核素的测量,有望被应用到重核到超重核的基本性质研究中。

### 3.3 共线激光谱

在源激光谱和在线气室共振电离光谱均受限于GHz

量级的光谱分辨率。在线喷注共振电离谱技术的发展虽将谱线分辨率提高到 400 MHz, 但是对于绝大多数中质量和轻核区核素的超精细结构还是难以分辨和精确测量。共线激光谱学技术采用激光与高速离子/原子束共线的方式克服了分辨率低的问题, 主要利用了离子经静电加速后离子能量展宽不变的特征, 继而减少能量离散引入的谱线展宽。例如, 能量很低 ( $E$ ) 的离子具有确定的能量离散  $\delta E$ , 则对应的速度展宽为

$$\delta v = \frac{1}{\sqrt{2mE}} \delta E。 \quad (7)$$

而被加速到 30~60 keV 能量的离子, 速度离散相同, 因此引起的谱线展宽就会被大大减小, 达到与自然展宽相同的量级。

共线激光谱通常采用激光频率锁定, 离子速度调控的方式来测量核素的超精细结构谱。也就是说, 当激光频率锁定为  $\nu_{\text{laser}}$  时, 由于多普勒效应, 一个以能量  $V$  运动的原子或离子观察到的激光频率为  $\nu$

$$\nu = \nu_{\text{laser}} \frac{1 - \beta}{1 + \beta}, \quad (8)$$

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{m^2 c^4}{(eV + mc^2)^2}}。 \quad (9)$$

式中  $m$  是离子质量,  $e$  是元电荷。实验测量中, 通过改变加速或减速电压  $V$  就可以操控原子或离子吸收的满足共振激发的激光频率, 继而通过收集退激发时的荧光可获得超精细谱。

典型的共线激光装置的原理图可用图 5 表示。放射性离子束经 RFQ 脉冲化后, 经偏转电极板进入到共线激光谱与连续窄带激光束共线传输, 离子在充满碱金属蒸气 (如 K, Na) 的电荷交换室内 (charge exchange cell: CEC) 通过电荷交换过程中性化为原子态。核外电子被激光共振激发到高能态 (一般寿命在几个到几十个 ns 量级), 退激发过程中发射的荧光光子经聚焦透镜后被光电倍增管收集。对于有些元素 (如 Mg, Ca, Cd 等), 其超精细谱的测量可在离子态中实现, 测量中不需要电荷交换过程。

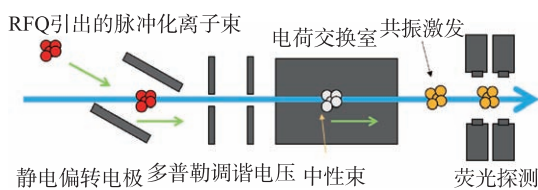


图 5 (在线彩图) 共线激光谱装置示意图

可见, 基于荧光探测的共线激光谱具有高分辨的优势 (通常为几十 MHz), 可以用于从轻核区和重核区的

大范围核素的基本性质测量。近十多年, 此测量方法结合 RFQ 技术已经成功应用于大范围核区的众多放射性核素的基本性质的测量, 在不同核区的核结构演化研究方面取得了一系列进展。例如, 核电荷半径测量确定了轻核区丰中子 Li、Be 核的晕结构<sup>[27-28]</sup>; 原子核自旋和磁矩的测量探索了中质量区由于张量力引起的原子核的壳演化过程<sup>[6, 29]</sup>, 测试了大尺度壳模型以及基于手征有效场理论的从头计算核模型理论在中质量区的有效性, 并推动了其发展<sup>[8, 30]</sup>; 核素的电四极矩以及核电荷半径测量确定中质量区双幻核附近形状共存现象<sup>[9, 31-32]</sup>等。但是, 由于用于荧光探测的光电倍增管本身暗电流造成的本底计数较大, 且对光非常灵敏, 激光散射光子和热辐射产生的光子都可能被光电倍增管记录造成大的本底计数, 此方法的探测效率受到限制, 其测量被局限在产额为  $10^{3-4}$  离子/秒量级的放射性核素。

当然, 共线激光技术也有很多灵活性, 可以进行一些特殊改进并与其他技术的结合用于对特定元素的超高效率测量, 例如, 实验上通过结合光泵浦技术和  $\beta$ -NMR 技术成功测量了 Mg 同位素的基本性质, 研究了反转岛核区的形变特性<sup>[33-34]</sup>; 结合光泵浦、电子能态选择中性化和衰变探测的 ROC 技术有望测量产额为 10 离子/秒的  $^{54}\text{Ca}$  同位素的光谱结构<sup>[4, 35]</sup>。

### 3.4 共线共振电离激光谱

国际上常采用的是共线激光和在源 (在线气室/在线喷注) 激光谱两类技术分别受到效率较低和分辨率较差的局限。为了研究产额更低的丰中子核素, CREN-ISODLE 的 CRIS 实验团队在长期技术积累的基础上探索了多束激光与放射性核束共线条件下共振电离的技术。我们已经了解到, 激光与离子/原子束共线技术减少了能量离散对谱线分辨率的影响, 可实现几十 MHz 的谱线分辨率, 且共振电离探测离子的方式避免了荧光探测本底大的问题, 可应用到对几个离子/秒产额的核素测量。所以, 这种新的共线共振电离谱技术正是集合了共线激光谱高分辨的优势和共振电离谱高灵敏度、高选择性的特点, 在同一套激光谱学设备上同时实现了高分辨和高效率的测量<sup>[36]</sup>。

图 6 给出了共线共振电离谱技术的原理示意图<sup>[37]</sup>。离子束经过质量分离后被 RFQ 装置脉冲化, 脉冲离子束随后经偏转电极进入 CRIS 束流线与激光束共线。离子束首先经过充满 K 或 Na 蒸气的 CEC 中性化。电荷交换过程中未被中性化的离子经偏转电极过滤掉, 而中性化的原子束经过差分抽气区后进入相互作用区。脉冲

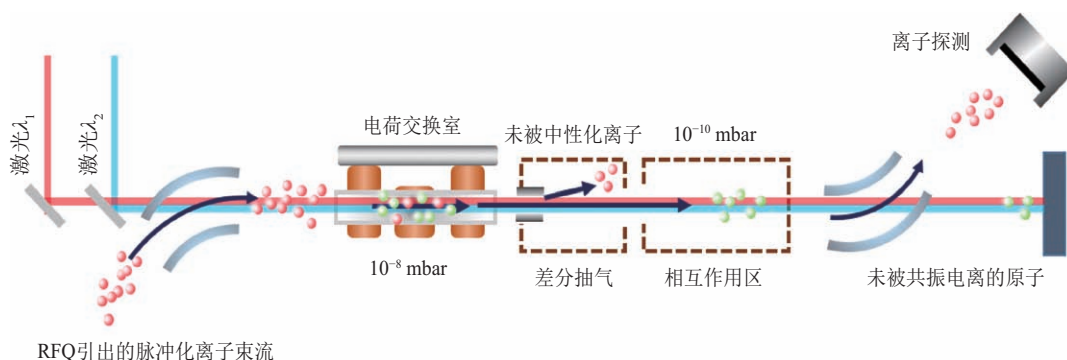


图 6 (在线彩图) 共线共振电离激光光谱装置示意图<sup>[37]</sup>

化原子束在相互作用区与多步脉冲激光在空间上重叠, 时序上匹配, 实现原子的高效率共振电离。这里相互作用区的长度选择需要与原子束的脉冲宽度匹配, 以最大化原子与激光的相互作用时间范围。原子在相互作用区经激光共振电离后成为离子, 经电极偏转后被离子探测器收集, 由此我们可以获取核素的超精细结构谱图。值得注意的是, 相互作用区超高真空状态的选择是为了最大化地压制原子与真空中杂质气体碰撞电离导致的本底计数。离子探测结合超高真空条件, 以及原子脉冲与激光脉冲最优化的时序结构, 大大提高了离子探测的灵敏度和效率。与共线激光谱技术类似, 加速到 30~50 kV 的离子束的能量离散引起的多普勒谱线展宽在 MHz 的量级, 在原子激发能级自然线宽 (MHz 量级) 前提下, 共线共振电离谱技术可以实现几十 MHz 的超精细结构能谱测量。

高分辨谱线的测量首先需要调频激光的线宽在 MHz 的量级。而我们常用的窄带连续谱激光无法实现与原子束和电离激光脉冲的时序匹配, 还会因为光泵浦效应影响共振电离效率<sup>[38]</sup>。2014 年, CRIS 实验团队采用普克尔盒调制的方法对窄带连续激光进行截断, 解决了共振激发激光与电离激光脉冲和原子脉冲束的时序匹配问题, 在对 Fr 同位素的研究中, 实现了高分辨率的超精细能谱测量 (20 MHz)<sup>[38]</sup>。众所周知, 连续窄带激光的功率相对较低, 倍频后功率会更低 (连续光倍频效率低), 所以经普克尔盒调制截断后功率会进一步损失, 很难满足最优化 (饱和) 的共振激发, 大大降低共振电离效率。因此, 在 2016 年, CRIS 团队采用种子注入锁频技术获得高功率窄带的脉冲激光, 实现了对 Cu 同位素的高分辨高效率测量, 其中  $^{78}\text{Cu}$  核素的产额仅有 20 离子/秒<sup>[36]</sup>。

近期, 共线共振电离激光谱技术也被成功应用到不同质量区其它核素的超精细结构谱测量, 如轻核区的 K, Sc 同位素, 中等重量区的 In, Sn 同位素, 以及

重核区的 Fr, Ra 同位素等<sup>[39-40]</sup>, 有效验证了该技术在不同质量区产额更低的核素测量中的适用性。

### 3.5 原子阱

广泛用于原子物理研究的磁光阱 (magneto-optical trap: MOT) 也被用于放射性核素的基本性质测量, 例如利用 MOT 技术测量了  $^{6,8}\text{He}$  的电荷半径。它的工作原理依赖于激光冷却和阱技术, 即结合六个方向的圆偏振且负失谐的激光束和利用一对置于阱中心的反亥姆霍兹线圈产生的弱线性四极磁场来约束原子。原子在阱内的任何方向运动都能通过共振吸收多普勒频移后的光子而减速。磁场与偏振激光相结合产生对原子的束缚力, 将原子约束在中心。当然, 这种技术对元素有选择性, 目前主要应用于碱金属元素, 碱土元素和惰性气体元素<sup>[41]</sup>。

MOT 技术拥有很高的单原子探测灵敏度和高光谱分辨率 (~MHz), 已经被成功应用到对轻中子晕核  $^6\text{He}$  和  $^8\text{He}$  的电荷半径的测量。该实验首次在美国阿贡实验室完成, 测量了  $^6\text{He}$  核素的电荷半径<sup>[42]</sup>, 之后  $^8\text{He}$  核素的电荷半径测量是在法国 GANIL 实验室完成的<sup>[43]</sup>。通过比较实验测量的电荷半径与各种核理论预言值, 我们可以更好地理解轻核区的晕结构现象<sup>[7]</sup>。此技术近年来被应用到多学科交叉的基础和应用研究, 例如被用于基本对称性的研究<sup>[44]</sup>和同位素纪年、全球地下水测量等领域<sup>[45]</sup>。

## 4 总结与展望

本文根据核素图中不同质量区超精细结构能级分裂的特点, 简单回顾了近年来激光谱技术在世界范围内的发展和革新。国际上目前使用的在源共振电离谱、在线气室和在线喷注共振电离谱、共线激光谱和共线共振电离谱等技术, 根据其性能被应用到不同核区核素基本性质的测量, 为研究不稳定原子核的奇特核结构和新物理



现象提供了模型独立的方法。

结合上述的技术发展以及对不稳定核素的测量, 我们总结了迄今为止利用激光谱测量的所有核素。如图 7 所示, 在实验已经观察到的 3000 多个不稳定核素中, 利用各种激光谱测量涉及的核素约有 900 多个, 大量的核区有待进一步的测量和探索。国际上过去常用的激光谱设备主要适用于低能的 ISOL 装置, 例如在 CERN-ISOLDE 的激光谱装置上测量的核素有半数以上。基于 ISOL 装置产生的放射性核素, 从反应靶中的提取过程很大程度上依赖元素的物理和化学性质, 很多元素(例如难熔元素)很难从 ISOL 装置的靶材料引出、分离并测量。近几年, 几个具有 PF 装置的实验室也一直

在发展新技术, 这需要结合高能离子束的慢化技术来实现, 例如美国密西根州立大学的 BECOLA<sup>[14]</sup>, 日本理化所的 SLOWRI<sup>[47]</sup>、OROCHI 等<sup>[48]</sup>。随着加速器技术的不断发展, 国际上下一代放射性核束装置正在各科技强国建设和规划中, 其中物理测量终端对激光谱设备的需求越来越大, 也激励了新型高效率高分辨率的核激光谱技术发展, 例如美国 MSU-FRIB 装置上正在规划共线共振电离谱, 日本理化学研究所仁科中心 SLOWRI 后端正在建设共线激光谱, 德国 FAIR-Super-FRS 束流终端正在规划 LASPEC 共线共振激光谱, 以及法国 GANIL 的 DESIR 低能终端正在规划共线共振电离谱和共线激光谱。

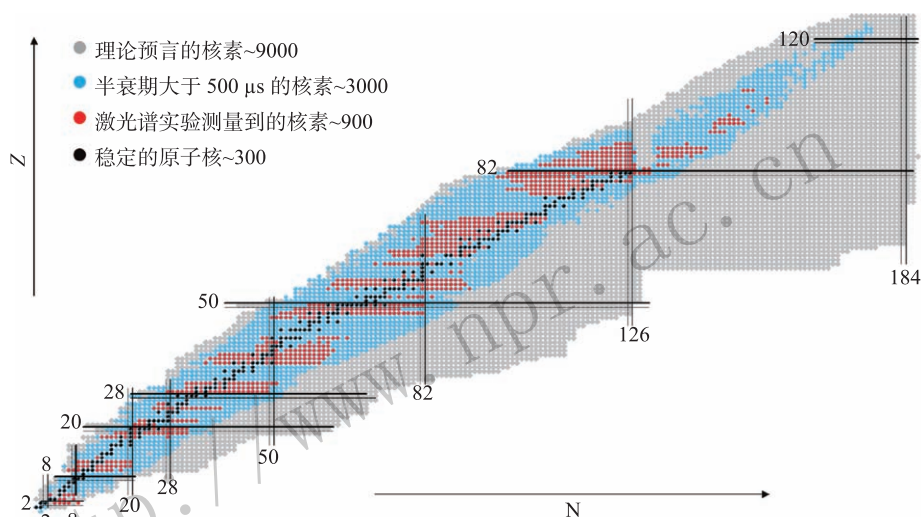


图 7 (在线彩图) 核素图: 黑色代表自然界存在的稳定核素, 蓝色为在放射性核束装置上产生的不稳定核素 ( $T_{1/2} > 500 \mu\text{s}$ ), 红色代表的是实验上通过激光谱方法已经测量过的核素(包含稳定核), 灰色表示近期利用相对论连续谱计算的核素<sup>[46]</sup>

国内现有的大型核科学装置多年来一直服务于不稳定核束的基本研究工作, 如北京串列静电加速器 HI-13 上 GIRAFFE<sup>[49]</sup>和兰州的重离子加速器 (HIRFL) 上的 RIBLL<sup>[50]</sup>束流装置。目前, 我国也正在建设和规划新一代重离子加速器和放射性同位素分离装置, 如目前正在惠州开始建设的先进重离子装置 (HIAF)<sup>[51-52]</sup>和正在规划中的“北京放射性同位素分离装置”(BISOL)<sup>[53]</sup>。HIAF 装置低能物理终端可以提供大量重核区的核素, BISOL 装置有望产生中等质量区的极端丰中子核素。如图 7 所示, 目前激光谱测量还没有大量拓展到更丰中子核区及重质量核区。因此, 为了符合我国新一代大科学装置的部署, 新型的共线共振电离谱技术更适用于 HIAF 和 BISOL 的低能物理终端的实验测量。这主要是基于共线共振电离谱技术的高分辨率和高效率的优势, 高分辨率的特征使得这项技术适用于从轻核到重核区等大部分核素的光谱学测量, 高

效率高灵敏度的优势可以应用到对产额在几个到几十个离子/秒的极端丰中子丰质子核素测量。

因此, 结合新一代放射性核束大科学装置, 高分辨、高效率、高灵敏度的共线共振电离激光谱技术的发展和进一步分优化改进会继续推动基于基本性质测量的核物理研究向重核甚至超重核区以及滴线区迈进。

#### 参考文献:

- [1] NEYENS G. *Rep Prog Phys*, 2003, **66**: 633.
- [2] TANIHATA I, KOBAYASHI T, YAMAKAWA O, *et al. Phys Lett B*, 1988, **206**: 592.
- [3] FRICKE G, HEILIG K. *Nuclear Charge Radii[M]. Heidelberg: Springer-Verlag*, 2004: 385.
- [4] YANG X F, COLLAPS and CRIS collaboration. *J Phys Conf Ser*, 2018, **1024**: 012031.
- [5] FRANBERG H, DELAHAYE P, BILLOWES J, *et al. Nucl Instr and Meth B*, 2008, **266**: 4502.

- [6] PAPUGA J, BISSELL M L, KREIM K, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2013, **110**: 172503.
- [7] LU Z T, MUELLER P, DRAKE G W F, *et al.* *Rev Mod Phys*, 2013, **85**: 1383.
- [8] GARCIA RUIZ R F, BISSELL M L, BLAUM K, *et al.* *Phys Rev C*, 2015, **91**: 041304.
- [9] YANG X F, Wraith C, Xie L, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2016, **116**: 182502.
- [10] BAI S W, YANG X F. *Nuclear Physics Review*, 2018, **35**: 382. (in Chinese)  
(白世伟, 杨晓菲. 原子核物理评论, 2018, **35**: 382.)
- [11] DE GROOTE R P, BILLOWES J, BINNERSLEY C L, *et al.* *Phys Rev C*, 2017, **96**: 041302.
- [12] NEUGART R, BILLOWES J, BISSELL M L, *et al.* *J Phys G: Nucl Part Phys*, 2017, **44**: 064002.
- [13] DICKER A R, CAMPBELL P, CHEAL B, *et al.* *Hyperfine Interact*, 2014, **227**: 139.
- [14] MINAMISONO K, MANTICA P F, KLOSE A, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2013, **709**: 85.
- [15] VOSS A, PROCTER T J, SHELBAYA O, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2016, **811**: 57.
- [16] FEDOSSEEV V, CHRYSALIDIS K, DAY GOODACRE T, *et al.* *J Phys G: Nucl Part Phys*, 2017, **44**: 084006.
- [17] FEDOSSEEV V N, KUDRYAVTSEV YU, MISHIN V I. *Phys Scr*, 2012, **85**: 058104.
- [18] FEDOSSEEV V N, FEDOROV D V, HORN R, *et al.* *Nucl Instr and Meth B*, 2003, **204**: 353.
- [19] COCOLIOS T E. *Hyperfine Interact*, 2017, **238**: 16.
- [20] MARSH B A, DAY GOODACRE T, SELS S, *et al.* *Nat Phys*, 2018, **14**: 1163.
- [21] COCOLIOS T E, ANDREYEV A N, BASTIN B, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2009, **103**: 102501.
- [22] FERRER R, BREE N, COCOLIOS T E, *et al.* *Phys Lett B*, 2014, **728**: 191.
- [23] HIRAYAMA Y, MUKAI M, WATANABE Y X, *et al.* *Phys Rev C*, 2017, **96**: 014307.
- [24] BACKE H, EBERHARDT K, FELDMANN R, *et al.* *Nucl Instr and Meth B*, 1997, **126**: 406.
- [25] FERRER R, BARZAKH A, BASTIN B, *et al.* *Nat Commun*, 2017, **8**: 14520.
- [26] ZADVORNAYA A, CREEMERS P, DOCKX K, *et al.* *Phys Rev X*, 2018, **8**: 041008.
- [27] SANCHEZ R, NORTERSHAUSER W, EWALD G, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2006, **96**: 033002.
- [28] NORTERSHAUSER W, TIEDEMANN D, ZAKOVA M, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2009, **102**: 062503.
- [29] FLANAGAN K T, VINGERHOETS P, AVOGULEA M, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2009, **103**: 142501.
- [30] GARCIA RUIZ R F, BISSELL M L, BLAUM K, *et al.* *Nat Phys*, 2016, **12**: 594.
- [31] WRAITH C, YANG X F, XIE L, *et al.* *Phys Lett B*, 2017, **771**: 385.
- [32] YANG X F, TSUNODA Y, BABCOCK C, *et al.* *Phys Rev C*, 2018, **97**: 044324.
- [33] NEYENS G, KOWALSKA M, YORDANOV D, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2005, **94**: 022501.
- [34] YORDANOV D T, BISSELL M L, BLAUM K, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2012, **108**: 042504.
- [35] GARCIA RUIZ R F, GORGES C, BISSELL M, *et al.* *J Phys G: Nucl Part Phys*, 2017, **44**: 044003.
- [36] DE GROOTE R P, BILLOWES J, BINNERSLEY C L, *et al.* *Phys Rev C*, 2017, **96**: 041302.
- [37] LYNCH K M, BILLOWES J, BISSELL M L, *et al.* *Phys Rev X*, 2014, **4**: 011055.
- [38] DE GROOTE R P, BUDINČEVIĆ I, BILLOWES J, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2015, **115**: 132501.
- [39] GARCIA RUIZ R F, VERNON A R, BINNERSLEY C L, *et al.* *Phys Rev X*, 2018, **8**: 041005.
- [40] LYNCH K M, WILKINS S G, BILLOWES J, *et al.* *Phys Rev C*, 2018, **97**: 024309.
- [41] BEHR J A, GWINNER G. *J Phys G: Nucl Part Phys*, 2009, **36**: 033101.
- [42] WANG L B, MUELLER P, BAILEY K, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2004, **93**: 142501.
- [43] MUELLER P, SULAI I A, VILLARI A C C, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2007, **99**: 252501.
- [44] PARKER R H, DIETRICH M R, KALITA M R, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2015, **114**: 233002.
- [45] JIANG W, BAILEY K, LU Z-T, *et al.* *Geochim Cosmochim Acta*, 2012, **91**: 1.
- [46] XIA X W, LIM Y, ZHAO P W, *et al.* *Atom Data Nucl Data Tables*, 2018, **121**: 1.
- [47] WADA M, TAKAMINE A, OKADA K, *et al.* *AIP Conf Proc*, 2009, **1120**: 109.
- [48] YANG X F, TAKESHI F, TAKASHI W, *et al.* *Phys Rev A*, 2014, **90**: 052516.
- [49] LIU W P, BAI X X, ZHOU S H, *et al.* *Phys Rev Lett*, 1996, **77**: 611.
- [50] SUN Z, ZHAN W L, GUO Z Y, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2003, **503**: 496.
- [51] ZHOU X H. *Nuclear Physics Review*, 2018, **35**: 339.
- [52] XIAO G Q, XU H S, WANG S C. *Nuclear Physics Review*, 2017, **34**: 275. (in Chinese).  
(肖国青, 徐珊珊, 王思成. 原子核物理评论, 2017, **34**: 275.)
- [53] YE Y L. *EPJ Web Conf*, 2018, **178**: 01005.



# Development and Prospect of Precision Laser Spectroscopy Techniques for Nuclear Physics Study

LIU Yongchao<sup>1,2</sup>, BAI Shiwei<sup>1</sup>, YANG Xiaofei<sup>1,†</sup>

(1. School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology,  
Peking University, Beijing 100871, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The nuclear properties (spin, mass, life-time, magnetic moment, electric quadrupole moment and charge radius) of the ground and long-lived states of unstable nuclei can be used to explore the exotic nuclear structure phenomenon, and also will be a prominent input for the nuclear theory methods and nuclear interactions. Experimentally, we can nuclear-model independently determine the nuclear spins, magnetic moments, electric quadrupole moments and mean square charge radii simultaneously from hyperfine structure and isotope shift, measured with the interdisciplinary laser spectroscopy techniques. In recent years, with the continuous efforts, various laser spectroscopy techniques with high resolution and high efficiency have been developed in order to study the short-lived isotopes produced at the radioactive ion beam facilities with very low production yield. Here, we will introduce the basic principle of laser spectroscopy measurement and discuss in detail the various complementary laser spectroscopy techniques developed for the nuclear structure study of unstable isotopes. The advantages and disadvantages of these techniques, such as collinear laser spectroscopy (high resolution, low sensitivity), in-source laser spectroscopy (high sensitivity, low resolution), as well as collinear resonant ionization (high resolution, high sensitivity), are discussed regarding to the resolution and sensitivity, which is highly related to the application of the technique in different mass region of nuclear chart. In addition, future plan and prospect on the development of the precision laser spectroscopy techniques will be discussed, which, with the hope, will be used for nuclear physics study at the next-generation facilities constructed and planed in China.

**Key words:** radioactive isotope; nuclear properties; laser spectroscopy technique; high resolution and high efficiency; nuclear structure

---

**Received date:** 29 Nov. 2018; **Revised date:** 3 Mar. 2019

**Foundation item:** National Key R&D Program of China (2018YFA0404403); National Natural Science Foundation of China (11875073)

† **Corresponding author:** YANG Xiaofei, E-mail: [xiaofei.yang@pku.edu.cn](mailto:xiaofei.yang@pku.edu.cn).