



基于高精度共线激光谱技术的核物理和原子分子物理交叉研究

陈少杰, 陈冬阳*, 杨晓菲*, 胡晗睿, 郭洋帆, 严周, 梅文聪, 叶沿林

北京大学物理学院和核物理与核技术全国重点实验室, 北京 100871

* 联系人, E-mail: chendongyang@pku.edu.cn; xiaofei.yang@pku.edu.cn

2025-08-31收稿, 2025-10-16修回, 2025-10-19接受, 2025-10-20网络版发表

国家重点研发计划(2023YFE0101600, 2022YFA1605100)和国家自然科学基金(12027809)资助

摘要 原子核外电子的能级结构反映了原子核与核外电子之间的电磁相互作用, 其光谱特征同时蕴含了原子核特性与原子分子体系的结构信息. 通过精密激光核谱技术对超精细结构和同位素移位的高精度测量, 能够核模型无关地提取原子核的自旋、磁矩、电四极矩和电荷半径等多个核结构参数, 为研究不稳定原子核的晕结构、反转岛、壳演化、形状共存等奇特结构和检验核理论模型提供关键实验数据. 同时, 激光核谱技术与放射性核束装置的深度结合也显著推动了原子分子物理领域的多项前沿研究, 包括量子电动力学理论的实验验证、原子分子结构计算的准确性评估, 以及基本对称性前沿领域的深入探索等. 近年来, 随着放射性核束装置的不断发展, 日益扩张的核素版图中越来越多不稳定原子核可以被实验探测, 但这些不稳定核素寿命短、产额低、伴随产生的稳定和长寿命同量异位素杂质高, 对激光核谱技术的实验探测提出了更高要求. 其中, 共线激光谱凭借其高分辨的光谱测量能力, 在核素版图各质量区不稳定核的奇特结构以及相关原子分子物理研究中发挥了不可替代的作用, 并已在国际上的放射性核束装置中被广泛应用和部署. 本文将系统阐述基于荧光探测的共线激光谱技术与基于离子探测的共线共振电离激光谱技术的测量原理与方法特点, 并重点探讨这两类技术在原子核物理, 以及原子分子物理交叉研究中的创新应用与最新进展.

关键词 共线激光谱, 共线共振电离激光谱, 超精细结构, 不稳定原子核, 高电荷态离子, 放射性分子

光谱学作为研究光与物质相互作用的基础学科, 通过分析物质的光吸收与发射特性, 为揭示物质微观结构和动力学行为提供了重要手段. 其发展历程可追溯至1666年牛顿开展的太阳光散射实验, 但在此后的一个多世纪里, 光谱学的发展较为缓慢, 直到19世纪才取得重要突破^[1]. 夫琅禾费于1814年在太阳光谱中观测到了超过500余条特征吸收线; 基尔霍夫和本生于1859年通过光谱化学分析法成功发现了元素铯和铷. 这些里程碑式的工作推动光谱学逐步进入了实质性的发展阶段. 自19世纪中叶起, 氢原子光谱研究成为

光谱学的核心课题之一, 其在理论解释过程中所衍生的诸多发现极大推动了量子力学的建立. 随着光谱仪器分辨能力的不断提升, 新的实验现象不断涌现. 例如, 迈克尔逊于1892年在Tl ($Z = 81$)元素的谱线中首次观测到超精细结构(hyperfine structure, HFS)^[2]; 随后, L. Aronberg于1918年在^{206,207}Pb ($Z = 82$)同位素谱线中首次根据理论预言测量提取到了同位素移位(isotope shift, IS)^[3]. 这些突破性发现推动了对原子光谱中超精细结构与同位素移位的系统性理论与实验研究, 显著深化了人们对原子核内部结构及基本性质的理解.

引用格式: 陈少杰, 陈冬阳, 杨晓菲, 等. 基于高精度共线激光谱技术的核物理和原子分子物理交叉研究. 科学通报, 2026, 71: 1017–1034
Chen S-J, Chen D-Y, Yang X-F, et al. Interdisciplinary research in nuclear physics and atomic and molecular physics based on high-precision collinear laser spectroscopy (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 1017–1034, doi: [10.1360/CSB-2025-5455](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5455)

1960年高强度和高单色性激光的问世为光谱学研究注入了革命性动力,尤其是后续连续可调谐激光器以及光学频率梳的出现和发展,极大地拓展了光谱学的研究维度和应用边界,逐步形成了以激光为核心的光谱研究方法体系——激光光谱学.相比于传统光谱技术,激光光谱学的探测灵敏度、光谱分辨率以及时空分辨率提高了数个量级,现已成为物理、化学、生物、天文学等传统基础学科的重要研究手段,并在众多应用领域发挥着不可替代的作用.

作为激光光谱学的重要分支,激光核谱技术通过精确测量原子、离子或分子体系的超精细结构和同位素移位来核模型无关地同时提取原子核基态及长寿命同核异能态的自旋、磁矩、电四极矩和电荷半径等多个基本性质,现已成为研究不稳定原子核基本性质和奇特结构的有力工具之一^[4~6].目前,采用该技术已经研究了近1000种核素的基本性质,在核素图中的分布如文献^[7]的图7所示,涵盖了从轻核到超重核的广泛范围,展现出广泛的研究适用性.例如,在轻核区,对于丰中子He ($Z = 2$)^[8]、Li ($Z = 3$)^[9]与Be ($Z = 4$)^[10]等同位素电荷半径的测量直接证实了原子核晕结构的存在,对于丰中子Na ($Z = 11$)^[11]、Mg ($Z = 12$)^[12]与Al ($Z = 13$)^[13]等核素的电磁矩和电荷半径的测量为理解“反转岛”形成机制提供了关键实验证据;在中等质量Ca核区,对于丰中子K ($Z = 19$)^[14,15]、Ca ($Z = 20$)^[16,17]与Sc ($Z = 21$)^[18,19]等核素的自旋、电磁矩和电荷半径的测量,为探索原子核中壳演化与新幻数的奇特结构现象奠定了实验基础;在中等质量Ni核区,对于丰中子Ni ($Z = 28$)^[20,21]、Cu ($Z = 29$)^[22,23]、Zn ($Z = 30$)^[24~26]、Ga ($Z = 31$)^[27,28]和Ge ($Z = 32$)^[29,30]等核素的自旋、电磁矩和电荷半径的测量,为该核区质子和中子壳演化、亚壳效应、形状共存等奇特结构现象提供了实验依据;在中重质量Sn核区,对于Ag ($Z = 47$)^[31]、Cd ($Z = 48$)^[32,33]、In ($Z = 49$)^[34,35]、Sn ($Z = 50$)^[36,37]和Sb ($Z = 51$)^[38]等核素的磁矩和电四极矩的测量,在该核区单粒子效应、形变效应和壳效应中起到了关键作用;在重质量Pb核区,对于丰质子Au ($Z = 79$)^[39]、Hg ($Z = 80$)^[40]、Tl^[41]、Pb^[42]和Bi ($Z = 83$)^[43]等核素的磁矩和电荷半径的测量,为研究原子核形状共存、形变岛等现象提供了关键支持等.这些针对不稳定核性质的测量充分展现了激光核谱技术

在核结构研究中的独特价值.

近年来,放射性核束物理与原子分子物理领域的深度交叉融合,大大拓展了激光核谱技术的适用范围,其测量结果不仅可用于核结构研究,也为原子分子光谱结构研究以及理论模型的验证提供了关键实验依据.例如,由于缺乏稳定同位素,超重元素的光谱和能级结构数据极为稀缺,其实验测量不得不依赖于理论预测的跃迁频率.然而,尽管原子理论已较为成熟,但对重核区元素跃迁能级的计算仍存在nm量级的波长误差,这使得实验测量往往需要综合多个理论模型的预测结果.德国重离子研究中心(GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, GSI)团队通过对锕系元素^{252,253,254}No ($Z = 102$)电子跃迁能级长达数年的系统探索,首次实现了该元素能级结构的测量,并精确测定了其电离势^[44~46].这是迄今为止通过激光核谱技术所研究的最重元素,该成果不仅为超重原子理论计算提供了重要基准数据,也为未来更重元素的光谱和核结构研究奠定了基础.

与此同时,欧洲核子研究中心(European Organization for Nuclear Research, CERN)团队在ISOLDE (Isotope mass Separator On-Line facility)装置上首次成功实现了RaF^[47~49]和AcF^[50]等放射性分子的在线光谱测量,这一突破性进展不仅为基于放射性分子的电偶极矩(electric dipole moment, EDM)研究开辟了新路径,也揭示了电子关联效应和相对论量子电动力学修正在分子理论计算中的关键作用,为相关分子理论和量子化学模型提供了严格的实验检验^[51].另外,值得关注的是,在重离子加速器冷却储存环上也成功开展了如⁷Li⁺^[52,53]、¹²C³⁺ ($Z = 6$)^[54]、¹⁶O⁵⁺ ($Z = 8$)^[55]、^{24,25}Mg⁺^[56]、²⁰⁷Pb⁸¹⁺^[57]、²⁰⁸Bi⁸²⁺^[58,59]与²⁰⁹Bi^{80,82+}^[60]等高电荷态离子的激光光谱学实验研究.不过,受限于当前测量精度,这些研究目前主要用以检验相对论效应及强场条件下的量子电动力学效应(quantum electrodynamics, QED)等相关原子物理理论,尚未能用于提取原子核的基本性质及其结构信息^[61].

为了应对远离稳定线原子核研究中普遍存在的核素半衰期短、产额低以及同量异位素杂质污染严重等诸多实验挑战,国际学界相继发展了多种激光核谱技术^[5].其中,共线激光谱技术凭借其高分辨性能,

在目前已测量的1000余种核素中占比超过80%,且覆盖范围遍及核素版图各质量核区^[62]。共线激光光谱技术由Kaufman^[63]和Wing等人^[64]于1976年分别提出,其利用激光与快速离子束或原子束共线传输,通过探测激光诱导荧光实现高分辨超精细结构光谱测量。该技术核心原理在于静电加速可保持离子束能量展宽不变,从而有效抑制多普勒展宽,实现接近谱线自然宽度的高分辨率测量。然而,荧光探测方法受到激光散射导致的较高本底噪声的影响,限制了实验测量灵敏度。为进一步提高测量灵敏度,Kudriavtsev等人于1982年提出了共线共振电离激光光谱的设想,即在共线激光光谱技术之上,采用多步激光共振电离的方式以实现低产额不稳定核素的研究^[65]。1991年,Schulz等人在CERN-ISOLDE放射性核束装置上开展了共线共振电离激光光谱实验,实现了对放射性Yb ($Z = 70$)同位素超精细结构光谱的测量,初步验证了该技术的可行性^[66]。但由于实验采用连续的放射性Yb束流,并且脉冲激光器的重复频率是10 kHz,使得连续原子束与脉冲激光相互作用的占空比极低,最终导致原子的共振电离效率较低,实验测量灵敏度仅有 10^5 pps (particles per second)。射频四极冷却聚束器(Radio-Frequency Quadrupole cooler-buncher, RFQ)的发展使得放射性核束的脉冲化成为可能^[67~69]。该技术可提供重复频率可调的脉冲离子束,使其与脉冲激光器的重复频率相同步,可大幅提高原子与激光的相互作用效率。基于此,Flanagan等人在CERN-ISOLDE装置上发展了匹配脉冲离子束的共线共振电离激光光谱仪,实现了对产额更低的放射性核素(如Fr ($Z = 87$)^[70])的超精细结构谱的测量。

目前,共线激光光谱实验终端已在国际范围内的放射性核束装置(Radioactive Ion Beam facility, RIB facility)上广泛应用和部署。例如,基于ISOLDE装置的COLLAPS (COLlinear LAsEr sPectroScopy)^[71]、CRIS (Collinear Resonance Ionization Spectroscopy)^[72]以及VITO (Versatile Ion-polarized Technique Online)^[73],基于FRIB (Facility for Rare Isotope Beams)装置的BECOLA (BEam COoler and LAsEr spectroscopy)^[74],基于IGISOL (Ion Guide Isotope Separator On-Line)装置的RAPTOR (Resonance ionization spectroscopy And Purification Traps for Optimized spectRoscopy)^[75]和CLS (Collinear Laser Spectroscopy)^[76],以及基于ISAC (Iso-

tope Separator and Accelerator)装置的CFBS (Collinear Fast Beam laser Spectroscopy)^[77]等。我国在该领域近期也取得重要突破:成功研制了包含RFQ^[78]、共线激光谱^[79~81]和共振电离谱^[82]等多个关键核心技术在内的高分辨、高灵敏度共线共振电离激光光谱仪——PLASEN (Precision LAsEr Spectroscopy for Exotic Nuclei)^[83],将为下一步依托我国的北京放射性核束装置(Beijing Radioactive Ion-beam Facility, BRIF)^[84]及强流重离子加速器装置(High Intensity heavy-ion Accelerator Facility, HIAF)^[85]等大科学装置开展不稳定原子核的基本性质和奇特结构研究提供关键实验平台。

本文将从原子核外电子的超精细结构与同位素移位,以及其与原子核基本性质的关系出发,系统介绍基于荧光探测的共线激光光谱技术以及基于离子探测的共线共振电离激光光谱技术的测量原理,并重点讨论其在原子核结构研究,以及在原子、分子物理交叉领域研究中的应用和进展。

1 共线激光光谱技术原理与方法

原子核的质量 m 、均方半径 $\langle r^2 \rangle$ 、自旋 I 、磁矩 μ 、电四极矩 Q 等多种静态基本性质反映了原子核结构不同方面的特征,为研究原子核奇特结构提供了重要依据。例如,核自旋和磁矩能够灵敏地反映核子组态及波函数的变化,而电四极矩与电荷半径则可用于研究原子核的形变特性和集体效应。本节将介绍利用激光核光谱技术测量原子核自旋、磁矩、电四极矩和电荷半径等电磁性质的基本原理,并介绍基于荧光探测的共线激光光谱技术与基于离子探测的共线共振电离激光光谱技术的理论基础与方法特性。

1.1 激光核谱学基本原理

超精细结构源于原子核与核外电子之间的电磁相互作用,对其光谱进行精密测量,为同时获取原子核的多个基本性质提供了独一无二的途径。若原子核具有非零的核自旋($I \neq 0$),核外电子的运动在原子核位置处所产生的磁场 $B_e(0)$ 与原子核的磁矩 μ_I 之间将存在磁偶极相互作用,原子核的自旋 $\vec{I}$ 和核外电子的总角动量 $\vec{J}$ 会耦合形成总角动量 $\vec{F}$:

$$\vec{F} = |\vec{I} + \vec{J}| = I + J, I + J - 1, \dots, |I - J|, \quad (1)$$

并导致核外电子精细结构能级的劈裂,形成超精细结构能级.该效应所对应的相互作用能量可表示为^[86]

$$\Delta E_m = \frac{1}{2} \frac{\mu_I B_e(0)}{IJ} K = \frac{1}{2} AK, \quad (2)$$

式中, $K = F(F+1) - J(J+1) - I(I+1)$, A 为磁偶极超精细结构常数,其决定了超精细结构中能级分裂的大小.

此外,核外电子在原子核位置处所产生的电场梯度 V_{zz} 与原子核电四极矩 Q_s 之间的相互作用,即电四极超精细相互作用,将会引起超精细结构能级进一步偏移.偏移量 ΔE_e 可表示为^[86]:

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

式中, B 为电四极超精细结构常数:

$$B = eQ_s V_{zz} = eQ_s \frac{\partial^2 V_e}{\partial z^2}. \quad (4)$$

因此,总的超精细结构能级的分裂和偏移为

$$\Delta E_{\text{hfs}} = \frac{1}{2} AK + B \frac{3K(K+1) - 4I(I+1)J(J+1)}{8I(2I-1)J(2J-1)}. \quad (5)$$

实验上可以通过测量的超精细结构谱的谱线数量、间距或相对强度等确定原子核的自旋^[87].此外,对超精细结构谱进行拟合分析也可以从中提取得到目标核素的自旋、超精细结构常数 A 、 B 以及精细结构能级间的跃迁频率 ν . 在忽略超精细结构异常^[88~90]的前提下,同种元素的不同同位素的核外电子在原子核位置处所产生的磁场 $B_e(0)$ 以及电场梯度 V_{zz} 可视为常量.故而可以使用核磁共振或核四极共振等实验^[91]测量的参考核(通常为自然存在稳定核或长寿命核)的磁矩 μ_{ref} 、电四极矩 $Q_{s,\text{ref}}$,再结合激光核谱实验得到的参考核的超精细结构常数 A_{ref} 、 B_{ref} 和目标核的 A 和 B ,提取出目标核的磁矩和电四极矩:

$$\mu = \mu_{\text{ref}} \frac{AI}{A_{\text{ref}} I_{\text{ref}}}, \quad (6)$$

$$Q_s = Q_{s,\text{ref}} \frac{B}{B_{\text{ref}}}. \quad (7)$$

原子核电荷半径的提取需要借助同位素移位.同位素移位是指同一元素的两个同位素(A, A')之间,由于具有不同的核质量和核电荷分布而导致其核外电子的精细结构跃迁频率 ν 发生的微小偏移^[7]:

$$\delta \nu^{A,A'} = K_{MS} \frac{M' - M}{MM'} + F \delta \langle r^2 \rangle^{A,A'}, \quad (8)$$

式中, M' 和 M 分别为两个同位素的质量数, K_{MS} 为质量移位因子, F 为场移位因子, $\delta \langle r^2 \rangle^{A,A'}$ 为两个同位素的均方电荷半径之差.同位素移位因子 K_{MS} 和 F 通常可通过原子理论计算^[92,93]或者通过已有稳定核的电荷半径数据刻度^[94]得到.因此,在通过激光核谱实验测量到同位素移位 $\delta \nu^{A,A'}$ 后,基于式(8)即可计算得到两个同位素之间的均方电荷半径之差 $\delta \langle r^2 \rangle^{A,A'}$.如果其中一个同位素 A' (通常为自然存在稳定核或长寿命核)的均方电荷半径 $\langle r^2 \rangle^{A'}$ 已通过其他方法(如电子散射和 μ 原子光谱等)得到,就可以再由 $\delta \langle r^2 \rangle^{A,A'}$ 计算得到目标核 A 的电荷半径 $R^A = \sqrt{\langle r^2 \rangle^A} = \sqrt{\delta \langle r^2 \rangle^{A,A'} + \langle r^2 \rangle^{A'}}$.

1.2 共线激光光谱实验方法

激光核谱技术测量原子超精细结构光谱常采用两种探测方法:激光诱导荧光探测与多步激光共振电离后的离子探测.基于这两种方法,目前国际上主要发展了共线激光光谱技术、在源激光光谱技术以及原子/离子阱技术等用于开展不稳定核的基本性质和奇特结构研究.这三类实验技术在测量分辨率和灵敏度等关键参数上各有优缺点,从而直接决定了它们在不同核素版图的不同质量区的适用性^[5].本文主要聚焦于其中的共线激光光谱技术,以及它在核物理以及原子分子物理研究中的作用.

共线激光光谱技术通过加速离子束,显著抑制了原子或离子的热运动所导致的多普勒展宽,为实现高分辨光谱测量奠定了物理基础.离子束流在静电加速时,由热运动等造成的能量离散 δE 保持不变,由能量和速度的关系可以得到:

$$\delta E = \delta \left(\frac{mv^2}{2} \right) = mv \delta v = \text{const}. \quad (9)$$

可见束流速度的不确定度 δv 会随着速度 v (或能量 E) 的提高而显著减小,继而减小其造成的多普勒展宽:

$$\delta v_D = v_0 \frac{\delta E}{\sqrt{2Emc^2}}, \quad (10)$$

其中, v_0 为实验室坐标系下所采用的激光频率.当束流的能量达到几十 keV 时(通常为 30~60 keV 能量区间),由能量离散 δE 造成的多普勒展宽(即式(10))将达到与跃迁谱线的自然展宽相当的水平,从而可实现对超精细结构光谱的高分辨率测量.

1.2.1 基于荧光探测的共线激光光谱技术

图1(a)→(b)展示了典型的共线激光谱仪的工作原理^[62,95]: 由放射性核束装置提供的连续离子束首先注入RFQ中, RFQ内部填充有缓冲气体, 离子束通过与缓冲气体的多次碰撞达到热平衡, 从而显著降低入射离子束的初始能量离散. 在此过程中, RFQ径向射频电场和轴向静电场协同作用, 实现束流的脉冲化, 从而将入射连续离子束转变为低发射度的脉冲离子束^[78]. 脉冲离子束经静电偏转引入束流线与激光束共线(或反共线)传输. 鉴于大多数元素的离子态的跃迁能级处于深紫外波段, 超出常用激光器的波长覆盖范围, 实验通常选择测量中性原子的超精细结构光谱. 因此, 离子束在与激光发生共振激发前需要进行中性化处理. 具体而言, 飞行离子束与电荷交换室内部的碱金属(钠或钾)蒸汽发生电荷交换反应而转化为中性原子, 未被中性化的离子则被后端的偏转电极剔除. 实验中通过扫描激

光的频率或者改变离子的速度(扫描速度调控电极的电压)来获得原子的超精细结构谱. 速度调控电极安装在电荷交换室上游, 以便在中性化前完成离子速度扫描. 中性化后的原子在图1(b)所示的相互作用区被激光共振激发. 图1(c)展示了用于荧光探测的激光共振激发模式: 单束窄带连续激光将原子核外电子由基态或亚稳态激发至高能态, 随后处于激发态的电子在退激过程中会辐射荧光光子. 通过光电倍增管记录激光诱导荧光强度随激光频率或者原子速度的变化关系, 即可获得待测核素的超精细结构光谱.

共线激光光谱技术凭借其高分辨测量能力, 除了应用于中等质量和重核区原子核性质研究外, 亦可有效应用于超精细结构能级分裂较小的轻核区. 然而, 该技术所采用的探测方法在采集激光诱导荧光信号的同时, 也不可避免地记录了激光散射光子以及光电倍增管的暗计数等噪声信号, 导致实验测量灵敏度受限, 通常适用于产额在 $10^3 \sim 10^4$ pps以上核素的有效测量.

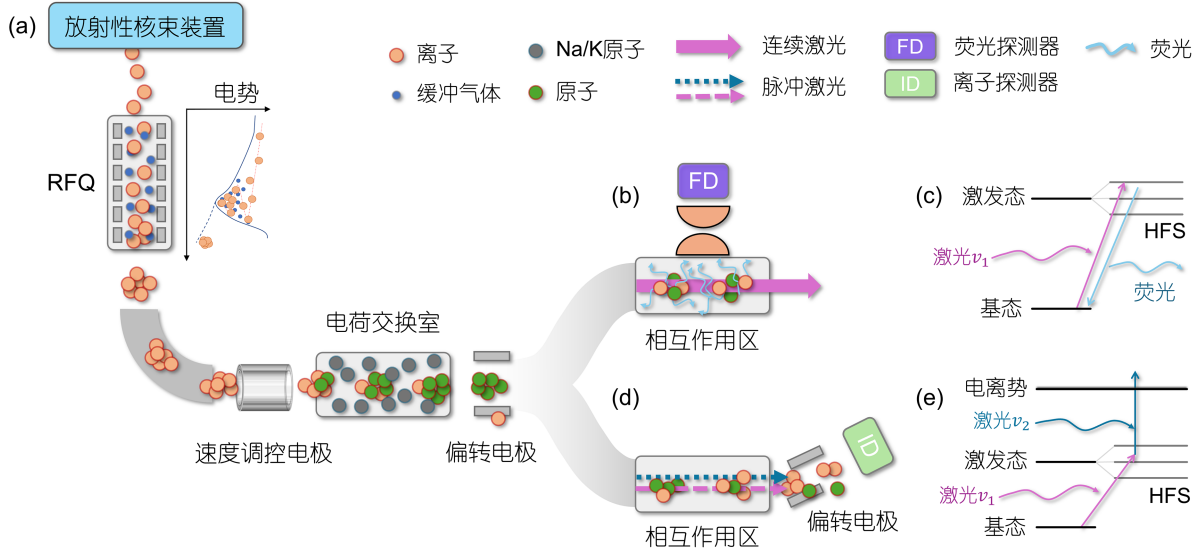


图1 放射性核束装置上共线激光光谱技术原理示意图^[62,95]. (a) 由放射性核束装置产生的连续离子束经过RFQ和电荷交换室的脉冲化和中性化后, 传输进入相互作用区与激光发生作用; (b) 基于荧光探测的共线激光光谱相互作用区布局, 原子经单束激光共振激发后, 退激辐射荧光由荧光探测器收集; (c) 应用于共线激光光谱技术的共振激发模式; (d) 基于离子探测的共线共振电离激光光谱相互作用区布局, 原子经多步激光共振激发并电离后由下游离子探测器收集; (e) 应用于共线共振电离激光光谱技术的多步共振电离模式

Figure 1 Collinear laser spectroscopy techniques at RIB facility^[62,95]. (a) A continuous ion beam produced by the RIB facility is pulsed and neutralized by the RFQ cooler-buncher and charge exchange cell, respectively, and then transmitted into the interaction region where it interacts with the laser beam; (b) layout of the interaction region for fluorescence-detection-based collinear laser spectroscopy technology, where atoms are resonantly excited by a single laser beam and the subsequent de-excitation photons are collected by the fluorescence detector (FD); (c) resonant excitation scheme employed in collinear laser spectroscopy technology; (d) layout of the interaction region for ion-detection-based collinear resonance ionization spectroscopy technology, where atoms undergo multi-step resonant excitation and ionization, and the resulting ions are collected downstream by the ion detector (ID); (e) multi-step resonant ionization scheme applied in collinear resonance ionization spectroscopy technology

1.2.2 共线共振电离激光光谱技术

为克服共线激光光谱荧光探测方法导致的灵敏度不足问题, 研究人员于2010年前后基于CERN-ISOLDE装置, 结合RFQ所提供的脉冲离子束流, 发展了共线共振电离激光光谱技术. 该技术在保持束流-激光共线传输的基础上, 引入多步激光共振电离与离子探测方法, 不仅保留了共线激光光谱的高分辨优势, 还有效规避了荧光探测中的高本底问题, 从而同时实现了高分辨与高灵敏度测量^[22,96]. 如图1(d)和(e)所示, 在超高真空的相互作用区, 脉冲原子束与多步脉冲激光在空间上重合、时序上匹配; 其核外电子首先被第一步频率连续可调的窄带脉冲激光共振激发, 随后被其他脉冲激光电离; 电离产生的离子经偏转后被下游离子探测器收集, 通过建立离子信号强度与第一步激光频率或者原子速度的对应关系, 即可获取目标核素的超精细结构光谱.

共线共振电离激光光谱技术要求相互作用区需维持超高真空的状态($\sim 10^{-10}$ mbar), 以最大限度抑制原子与真空中的残余气体碰撞电离导致的本底计数. 同时, 通过精确调控原子脉冲与激光脉冲的时序匹配, 以及采用离子探测方法有效避免了荧光探测的本底, 使该技术测量灵敏度得以显著提升, 目前已可实现对产

额低至20 pps核素的高分辨测量^[23]. 此外, 对于一些含有稳定杂质的短寿命核素, 还可采用衰变-标记(decay-tagging)的探测方法, 即通过探测目标核素的衰变产物(如 α 、 β 粒子等)来获得超精细结构光谱^[15,97].

本团队在北京大学亚原子离子探测实验室发展了如图2(a)所示的集表面离子源、激光烧灼离子源、射频四极冷却聚束器、束流光学系统、电荷交换系统以及荧光与离子探测为一体的高分辨、高灵敏度激光核谱系统——PLASEN. 基于表面离子源所产生的能量为30 keV的Rb稳定同位素, 采用共线共振电离激光光谱技术, 成功测量得到了如图2(b)所示的 $^{85,87}\text{Rb}$ 的超精细结构谱^[83]. 测试结果表明整个谱仪的探测效率达到1:200, 光谱分辨率优于100 MHz, 性能指标达到与CERN-ISOLDE装置上CRIS谱仪相当的国际最高水平, 所提取的原子核性质参数与文献值一致, 验证了整套谱仪的性能和可靠性. 近期, 我们已经将此谱仪在我国的BRIF放射性束装置上安装并测试完成, 实现了与离线测试同等水平的关键技术指标, 为后续开展不稳定原子核的基本性质和奇特结构研究提供了基础. 关于PLASEN谱仪的详细参数和技术细节, 可参阅文献^[78,83].

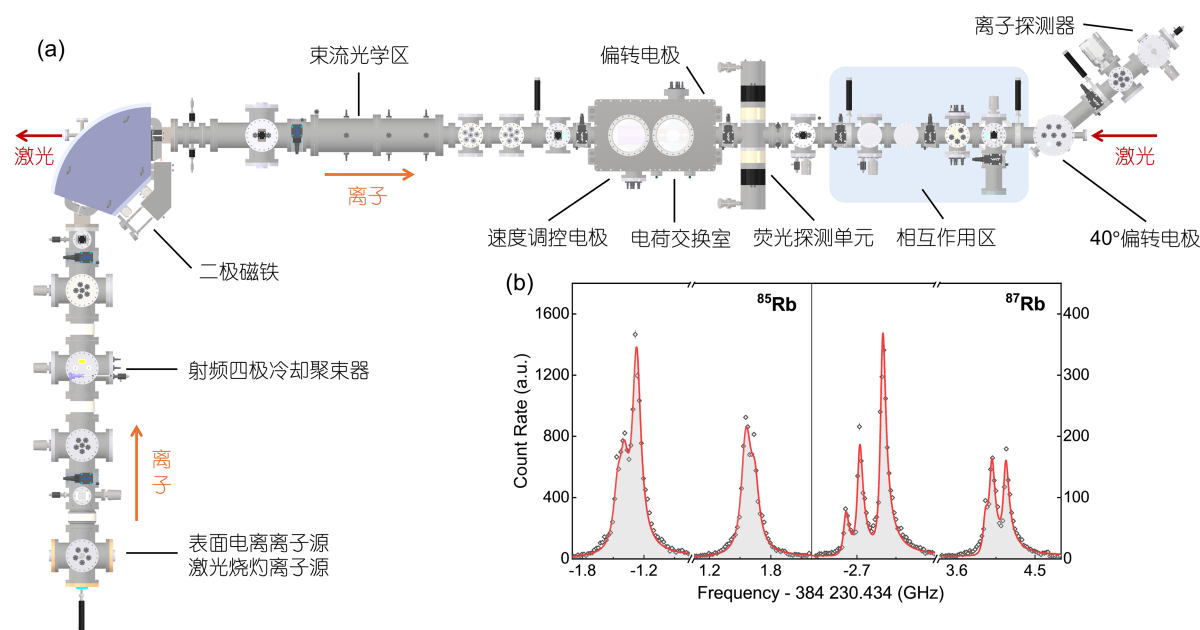


图2 (a) 北京大学PLASEN谱仪示意图; (b) 扫描激光频率得到的 $^{85,87}\text{Rb}$ 同位素的超精细结构谱^[83]

Figure 2 (a) A schematic view of the PLASEN system at Peking University. (b) HFS spectra of $^{85,87}\text{Rb}$ isotopes measured by scanning the laser frequency^[83]

2 激光核谱技术在核物理和原子分子物理中的研究举例

激光核谱技术通过探测核外电子与原子核之间的电磁相互作用,实现对原子核基本性质的提取.由于核外电子能级结构同时受到多电子关联、相对论效应以及原子核质量、电磁性质等多重因素的影响,故而这些测量结果同时包含了核物理和原子分子物理两方面信息.通过对激光核谱数据的解析,不仅能够深化对原子核奇特结构的理解,也为检验原子理论计算和量子电动力学提供了重要依据.近年来,在包含放射性核素的原子分子体系中检验基本对称性已成为现阶段的重要前沿方向之一^[51,98,99].激光核谱技术凭借与放射性核束装置紧密结合的优势,可在包含不稳定核素的原子分子体系中开展系统性的光谱性质研究,为后续开展用于基本对称性研究的精密测量实验奠定基础.下文将举例说明使用共线激光谱技术在原子核性质研究、原子分子理论检验以及基本对称性探索等方面的进展,重点阐述其在不同物理层次交叉研究中所发挥的关键作用.

2.1 原子核物理领域的研究举例

激光核谱技术可以以核模型无关的方式提取原子核的自旋、磁矩、电四极矩和均方根电荷半径等基本性质,是研究原子核晕结构、壳演化和幻数变化、形状共存等奇特结构的有力手段^[5].下面我们将从轻核区原子核的电荷半径和Sn核区原子核的电磁性质的测量来举例说明激光核谱技术在原子核结构研究中的重要作用.

2.1.1 轻核区的电荷半径研究

在轻核区,仅在同位素链上增加或减少几个核子,原子核会表现出如晕结构、集团结构和壳演化等一系列奇特结构现象^[100].此外,目前的第一性原理*ab initio*理论方法能够直接计算该核区原子核的基本性质.因此,轻核区的原子核的基本性质测量在检验和发展微观核理论模型中发挥着重要作用^[101,102].

晕核是轻核区中出现的重要奇特核结构现象,表现为一个或多个核子在远离核芯的区域形成弥散分布.1985年,实验上观察到¹¹Li的反应截面相比邻近的同位素⁹Li等异常增大^[103].1987年,为了解释该实验现象,

中子晕核的概念被首次提出,并预言了软偶极共振和与此关联的增强的库仑破裂截面^[104],该现象在1989年为实验证实^[105].直到2006年前后,激光核谱技术测量了¹¹Li、¹¹Be等核的电荷半径,结果表明这些具有晕结构的核的电荷半径远小于其物质半径(图3),直接说明了中子晕核的超大半径只是由中子分布范围的膨胀引起的,而其质子分布半径并未增大,验证了晕核物理图像的合理性^[9,10,106].

目前,美国阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory)正在准备利用激光核谱技术对理论预言的候选质子晕核⁸B ($Z = 5$)进行测量^[107].然而,由于在轻核区,核素的同位素移位中质量移位占主导^[5],且目前电子散射和 μ 原子光谱实验得到的稳定B核素的电荷半径误差较大(如图4)^[108],实验上要通过同位素移位得到⁸B的电荷半径需要更高精度的激光核谱测量结果.因此,结合原子理论的高精度计算,直接从光谱

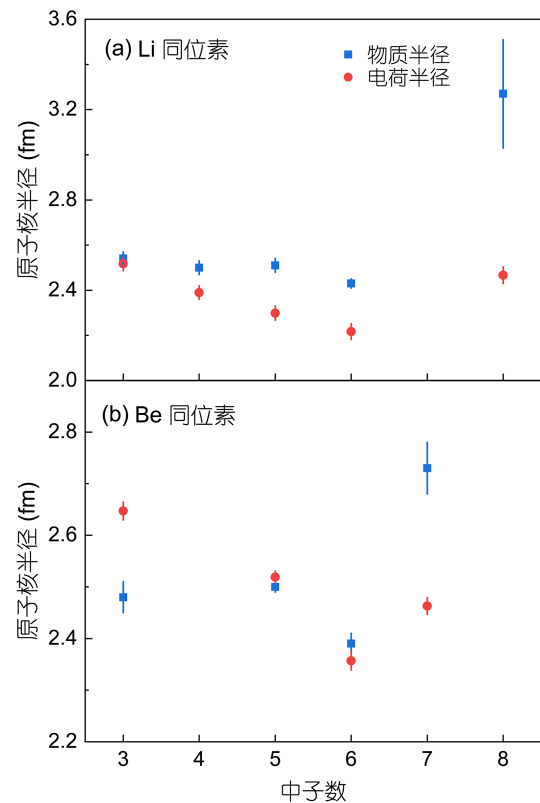


图3 激光核谱测量得到的电荷半径与核反应测量得到的物质半径对比。(a) Li同位素;(b) Be同位素^[9,10,103,106]

Figure 3 The charge radii measured by laser spectroscopy compared with the matter radii obtained from nuclear reaction measurements. (a) Li isotopes; (b) Be isotopes^[9,10,103,106]

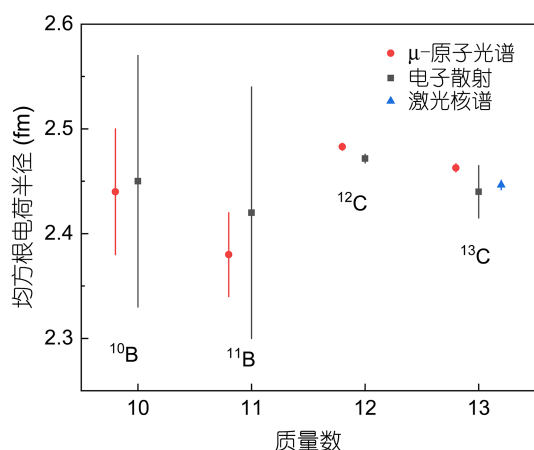


图4 激光核谱、电子散射、 μ 原子光谱测量得到的B、C元素均方根电荷半径对比^[108,113]

Figure 4 Comparison of root-mean-square charge radii for boron and carbon elements measured by laser spectroscopy, electron scattering, and muonic atom spectroscopy^[108,113]

跃迁的绝对频率 ν_0 中提取对应核素均方根电荷半径(r_c^2)的方法似乎可行性更大^[109]. 一个特定核素核外电子的光谱跃迁绝对频率可表示为 $\nu_0 = \nu_{\text{point}} + F \times \langle r_c^2 \rangle$, 其中 ν_{point} 是将原子核看作有限质量的点粒子计算得到的跃迁频率, F 是给定跃迁的场移位因子^[109]. 对于类He体系, ν_{point} 和 F 均可通过非相对论量子电动力学(nonrelativistic QED, NR-QED)高精度计算得出^[110]. 实验上可通过EBIS(electron beam ion source)源产生类He的 B^{3+} 离子并制备到 $1s2s^3S_1$ 的亚稳态上, 通过精确测定 $1s2s^3S_1 \rightarrow 1s2p^3P_J$ 的跃迁频率 ν_0 , 就可以直接提取对应核素的均方根电荷半径. 目前离线测试的结果表明, 对于B核素, 原子理论计算精度只要提高2~3倍, 就可大大减小稳定B同位素电荷半径的不确定度, 从而为精确测量 ^8B 的电荷半径奠定坚实基础^[111].

此方法已经被推广至C、N ($Z = 7$)同位素链的电荷半径的研究^[109]. 这些元素对应的不稳定同位素的激光核谱实验非常有限, 主要是因为ISOL (Isotope Separation On-Line)类型装置上这些同位素的产生就极具挑战: 由于化学活性, 这些同位素主要以分子的形式产生, 难以直接开展激光核谱研究. 同时对于这些元素, 无论是原子还是一价离子, 从基态出发的跃迁谱线能量大多位于深紫外波段, 超出了现有窄线宽激光器可以达到的范围^[5]. 然而, 对于类氢的B、C与N离子, 从长寿命亚稳态 $1s2s^3S_1$ (对于 C^{4+} 离子, 此亚稳定寿

命是21 ms)到末态 $1s2p^3P_J$ 的跃迁频率处于当前高精度激光器波长可覆盖的范围内^[112]. 目前, 在达姆施塔特工业大学的离线COALA(Collinear Apparatus for Laser spectroscopy and Applied physics)实验装置上已利用该方法成功实现了对 ^{13}C 测量, 得到的电荷半径的实验精度较电子散射的结果提高6倍(图4)^[113]. 但实验结果发现光谱数据与 μ 原子光谱测量结果之间存在了 3σ 的偏差, 需要进一步的实验与理论检验^[114].

2.1.2 Sn核区的原子核性质研究

在中重质量核区, 近些年激光核谱实验的研究主要集中在 ^{132}Sn 、 ^{100}Sn 及其附近核区^[34,115,116]. 该区域核素靠近质子闭壳 $Z = 50$, 且同位素链覆盖 $N = 50$ 和 $N = 82$ 两个中子闭壳, 为研究原子核基本性质在壳层间的演化提供了理想的实验平台. 同时, 在理论模型方面, 密度泛函理论(density functional theory, DFT)、价空间介质相似重整化群(valence space in-medium similarity renormalization group, VS-IMSRG)的 $ab initio$ 计算和大尺度壳模型(large-scale shell model, LSSM)计算都可以适用于这一核区^[116,117].

Sn同位素的电荷半径在 $N = 82$ 处观察到明显的拐点(kink), 验证了 ^{132}Sn 的幻数特性, 且可以被DFT理论较好地描述^[36]. 同时, ^{133}Sn 的磁矩与电四极矩均与壳模型 $1f_{7/2}$ 轨道上单中子的预言值一致, 进一步验证了 ^{132}Sn 的双幻核特性^[118]. 然而, 在丰质子区, ^{100}Sn 是否具有双幻核特性仍是当前核物理研究的开放问题, 现有实验结果尚无法给出统一结论. 尽管在 ^{100}Sn 的 β 衰变中观测到迄今最强的Gamow-Teller跃迁强度, 显示出单粒子行为主导的特征^[119], 但在Sn同位素链接近 $N = 50$ 的区域(目前已测至 $N = 54$)却发现了低激发态的 2^+ 能级以及该能级与基态之间较大的电四极跃迁强度 $B(E2)$, 暗示了核芯的减弱^[120,121]. 最近的激光核谱技术已经对 $N = 54$ 的Sn同位素电荷半径进行测量^[122], 其剩余电荷半径(实验测量的电荷半径扣除原子核为球形时的半径), 在靠近 ^{100}Sn 快速减小, 间接支持 ^{100}Sn 可能的双幻核特性(图5).

由于 ^{100}Sn 在放射性核束装置上的产额极小, 目前激光核谱实验还无法直接测量 ^{100}Sn 的性质. 因此, 近期的大量激光核谱实验集中在 ^{100}Sn 附近核素(如In、Ag等). 目前在Ag同位素链中已观测到 $N = 50$ 处存在电

荷半径的局域极小值^[31]. In同位素链至 $N = 52$ 的激光核谱实验结果也表明, 靠近 $N = 50$ 区域剩余电荷半径与谱学电四极矩均显著减小, 后者在误差范围内已经接近 $N = 82$ 闭壳附近($N = 80$)电四极矩的同等大小(图5)^[116]. 这些结果表明该区域集体效应减弱、单粒子行为增强的特点, 为 ^{100}Sn 可能的双幻核特性提供了进一步的实验支持.

与此同时, 激光核谱实验系统研究了这一核区Cd与In同位素的核电磁矩的单粒子行为, 以及与集体效应竞争的现象等. 例如在Cd同位素中, 自旋为 $11/2^-$ 的奇-A核的电四极矩随中子数增加呈现良好的线性变化趋势(图5)^[123]. 这一现象可被“教科书”中的单粒子行为解释, 即当未配对的中子填充 $1h_{11/2}$ 轨道时, 其较强的极化效应驱使核芯产生扁椭圆形变, 对应负的电四极矩. 随着这一轨道上中子数的增加, 超过半满壳形成中子

空穴时, 极化模式发生反转, 核芯倾向于长椭圆形变, 对应正的电四极矩. 而只增加了一个质子, 自旋为 $9/2^+$ 的奇-A (未配对的质子填充 $1g_{9/2}$ 轨道) In同位素则表现出更复杂的行为, 其电磁性质受到价质子与剩余核子集体行为共同影响, 表现为奇-A核的磁矩和电四极矩在较长同位素链上基本保持常数, 却在接近 $N = 82$ 闭壳时, 出现磁矩向Schmidt值突变、电四极矩快速减小的现象(图5)^[34].

2.2 原子分子物理领域的研究举例

通过激光核谱技术提取的超精细结构(或者精细结构)、同位素移位, 结合由其他实验方法确定的核磁矩、电四极矩等参数, 就可以得到原子理论感兴趣的物理信息. 这些高精度实验结果不仅为原子结构理论计算方法的检验提供了关键的实验数据, 也为验证量子电动力学在不同体系与场强下的有效性提供了重要支持. 本节将从量子电动力学与原子结构理论计算的检验两个方面, 介绍共线电离谱技术在原子分子物理领域的研究进展.

2.2.1 量子电动力学理论的检验

电子自旋磁矩和氢原子光谱中Lamb位移的发现, 推动了QED理论的建立. 作为描述电磁场与带电粒子相互作用的基础理论, QED理论不仅是首个相对论性量子场论, 也为整个标准模型的发展奠定了基石^[124]. 在不同物理体系中, 精确测量能级跃迁频率、精细结构能级分裂以及 g -因子等物理量并与高精度的理论计算结果进行系统比对, 已经验证QED理论是迄今为止最精确的物理理论之一, 例如电子自旋磁矩的实验测量已达到极高精度, 与理论预言高度吻合^[125], 在H ($Z = 1, N = 0$)、D ($Z = 1, N = 1$)、He、 $^3\text{He}^+$ 以及电子偶素等轻体系中QED理论也已经得到充分验证^[124].

作为目前*ab initio*原子理论可以直接计算的复杂体系, 三电子Li、 Be^+ 体系成为多体QED理论检验的重要实验平台. 理论指出, 通过在同位素链上测量 $2p$ 精细结构分裂 $\Delta\nu_{fs} = \nu_{2p_{3/2}} - \nu_{2p_{1/2}}$ 并计算分裂同位素移位(splitting isotope shift, SIS) $\delta\nu_{sis}^{A,A'} = \Delta\nu_{fs}^{A'} - \Delta\nu_{fs}^A$, 可以极大程度上消除原子核结构修正以及质量无关的相对论效应和QED效应贡献, 使得原子理论计算可以到很高的精度^[126]. 目前, 在Li原子中开展的QED理论检

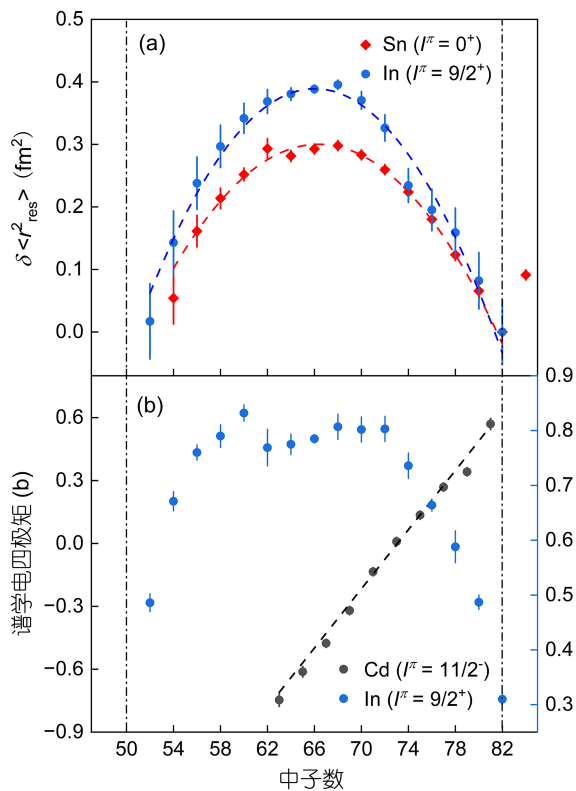


图5 (a) Sn与In同位素的剩余电荷半径在 $N = 50$ 到 $N = 82$ 之间的演化趋势^[115,122]; (b) In与Cd同位素的电四极矩在 $N = 50$ 到 $N = 82$ 之间的演化趋势^[34,116,123]

Figure 5 (a) The evolution of the residual differential charge radii for Sn and In isotopes between $N = 50$ and $N = 82$ ^[115,122]. (b) The evolution of electric quadrupole moments for In and Cd isotopes between $N = 50$ and $N = 82$ ^[34,116,123]

验实验中, 由于 ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^7\text{Li}$ 的原子核具有非0的自旋, 并且超精细相互作用比较弱(${}^6\text{Li}$ 的D2跃迁超精细结构能级劈裂约2 MHz, 与能级的自然展宽相当), 需要考虑目前不能分辨的超精细结构之间的量子干涉, 才能正确提取SIS, 并与理论计算比较^[127]. 而激光核谱技术通过与放射性核束装置结合, 可以产生自旋为0的不稳定 ${}^{10}\text{Be}^+$ 、 ${}^{12}\text{Be}^+$ 核, 能够直接测量精细结构跃迁. 实验测量的高精度的SIS结果与理论符合得相当好^[128], 该实验与Li原子的实验结果共同成为目前多体QED理论最为精确的实验检验之一^[124].

由于在高电荷态离子中, 随着核电荷数 Z 的增大, 内壳层电子所感受的库仑场强显著增强, 体系对于QED效应($\propto Z^4$)的敏感程度迅速升高^[129]. 因此, QED理论检验的另一重要方向是利用高电荷态离子进行强场条件下的QED理论检验. 目前NR-QED精确到 $m\alpha^7$ 项的计算结果, 在He、 Li^+ 这样的体系中符合得相当好^[130], 然而在 Be^{2+} 出现了明显的偏差^[131]. 因此, 需要在对QED效应更敏感的体系中开展实验检验, 以判断实验与理论不一致性的来源. 在离线COALA谱仪上, 利用EBIS源产生核自旋为0的 ${}^{12}\text{C}^{4+}$ 粒子并测量 ${}^3S_{1/2} \rightarrow {}^3P_J$ 跃迁频率以及 ${}^3P_J$ 精细结构分裂, 实验结果与理论在误差范围内都符合得相当好, 从而证实了NR-QED计算方法的可靠性^[111]. 同时理论计算表明, 在类He体系中如果考虑 $m\alpha^8$ 项, 可以提高精细结构常数的计算精度^[111].

此外, 通过加速器装置上的储存环产生并测量类H的 Bi^{82+} 离子与类Li的 Bi^{80+} 离子基态超精细分裂并与理论计算进行比较, 可以进行强场QED理论的检验^[60]. 由于理论计算需要原子核磁矩作为输入量, 而激光核谱的实验可以提供高精度的不稳定核磁矩值, 为储存环上的实验提供重要的实验支持^[5]. 在对于 ${}^{208}\text{Bi}^{82+}$ 离子的光谱测量实验中, 采用核磁共振实验获得的参考核 ${}^{209}\text{Bi}$ 的磁矩值 $\mu_I({}^{209}\text{Bi})$ ^[132], 结合激光核谱方法测得的超精细结构常数 $A({}^{209}\text{Bi})$ 与 $A({}^{208}\text{Bi})$ ^[133], 推导出 $\mu_I({}^{208}\text{Bi})$. 将该值作为输入参量进行理论计算, 所得超精细结构分裂与储存环实验结果高度吻合, 从而有效验证了QED理论在强场条件下的可靠性^[58].

2.2.2 原子理论计算的检验

原子理论计算在一些核素的激光核谱实验和基

本性质的提取中发挥着重要的作用. 但同时, 原子理论计算的精度往往限制了从实验光谱数据中提取原子核结构信息的准确性. 随着相对论耦合簇方法(relativistic coupled cluster, RCC)及其变体Fock空间耦合簇方法(Fock-space CC, FSCC)等现代原子结构理论的发展, 其计算精度也在不断提升^[134]. 尽管如此, 由于显著的相对论与电子关联效应, 如何对多电子体系的高激发态进行精确计算, 仍是目前原子理论面临的严峻挑战^[44~46]. 激光核谱技术在不稳定重核以及高激发态的测量中有着独特优势, 实验测量的电离势、同位素移位、超精细结构常数等关键物理量, 为原子理论计算的检验和优化提供了至关重要的实验数据.

前述的共线共振电离激光谱方法可以用来测量原子或中性分子的电离势. 例如在测量RaF分子的电离势时, 利用多步激光逐步共振电离中性RaF分子, 通过观察最后一步电离激光的频率与电离效率的关系得到RaF的电离势^[135]. 共振激发结合场电离的方法也可以得到电离势. 例如在文献^[136]中, 测量In的电离势时, 结合场电离探测技术, 通过精确测定一系列里德堡态的能级 E_n 并分辨其谱项, 依靠公式 $E_n = \text{IP} - R/(n - \delta_n)^2$ (其中 R 是Rydberg常数, δ_n 是量子缺陷), 综合 nP 、 nF 各个谱线系, 就可以得到高精度的电离势结果^[136]. 上述中性分子和原子的电离势测量结果均与RCC计算结果符合得很好, 检验了该方法对于电离势计算的可靠性.

如式(8)所示, 场移位因子 F 与质量移位因子 K_{MS} 的精确计算, 对提取不稳定核素的电荷半径至关重要. 特别是稳定核少于三个的元素, 其均方根电荷半径的确定需完全依赖于原子理论计算所提供的 F 与 K_{MS} 因子^[5]. 而对于有3个以上稳定同位素的元素, 激光核谱方法得到的同位素移位, 可以和电子散射及 μ 原子光谱得到的电荷半径结合, 通过King-plot方法刻度出相对可靠 F 和 K_{MS} 值, 用于与原子理论计算对比. 例如, Sn元素有最多的稳定同位素, 并且已经通过电子散射、 μ 原子X射线谱等方法得到了这些同位素的电荷半径. 文献^[137]通过测量多组不同原子跃迁的同位素移位, 刻度得到其 F 和 K_{MS} 参数, 与FSCC理论计算的结果进行对比和检验. 在误差范围内, 理论计算与实验值都符合的相当好, 充分证明了FSCC方法计算 F 与 K_{MS} 因子的可

靠性.

激光核谱实验测量的超精细结构常数 A 和 B , 通常需要结合其他实验方法给出磁矩 μ_I 以及谱学电四极矩 Q_s , 来计算电子云在原子核处产生的磁场 $B_e = A \cdot IJ/\mu_I$ 和电场梯度 $V_{zz} = B/(eQ_s)$, 从而可直接对原子理论计算的结果进行检验. 例如, 文献[136]对In原子能级的测量中, 结合文献给出的磁矩 μ_I 以及 Q_s 值, 就发现了对于激发态 $5s^25d^2D_{3/2}$ 和 $5s^25d^2D_{5/2}$, RCC计算得到的极超精细结构常数 A 与实验值不符. 通过分析各项带来的误差发现, 原子核磁矩分布以及QED效应带来的修正都非常微弱, 而电子关联带来的核心极化效应是提高理论计算结果准确性的关键. 实验也发现 B 常数的理论值与实验结果在 1σ 不确定度范围内符合得较好, 表明在原子理论计算中电子关联对 A 和 B 参数的影响不同[138].

2.3 原子分子体系中基本对称性相关研究

对称性是物理学中基本概念. 在原子分子、原子核和基本粒子等多个物质层次开展基本对称性检验等研究是当今物理学的前沿领域之一[51,98,99]. 理论预言表明, 宇称(parity, P)和电荷共轭-宇称(charge conjugation-parity, CP)对称性破缺效应在核电荷数较大的体系中更为显著, 然而此类体系多包含不稳定核素, 长期以来缺乏系统性的实验数据. 激光核谱技术通过在放射性核束装置开展包含不稳定核素的原子分子光谱性质的研究, 能够提供大量实验数据, 在原子分子理论计算的优化和精度提高中发挥了重要作用, 并为未来通过精密测量技术寻找P和CP对称性破缺效应的实验提供基础. 本节将介绍共线激光光谱技术在通向原子体系中的P破缺以及分子体系中CP破缺研究中的贡献和进展.

2.3.1 原子体系中的宇称不守恒检验

杨振宁与李政道于1956年提出, 在弱相互作用过程中宇称不守恒[139], 并很快由吴健雄等人的实验证实, 即在原子核的 β 衰变过程中的确存在宇称不守恒的现象[140]. 由于原子体系中电子与原子核之间同样存在弱相互作用, 早在1959年, 理论便预言了原子宇称不守恒(atomic parity violation, APV)现象的存在[141]. 但由于该效应极其微弱, 直至1978年才在Bi原子中首次观测

到APV信号[142]. APV为低能区的电弱相互作用提供了迄今最精确的探测途径, 与高能物理实验的结果形成有力互补, 其所对应的能区也被预言对超出标准模型的新物理敏感[124].

在原子系统中, APV效应会引起宇称相反电子态之间的微弱混合, 从而使实验上能够观测到原本禁戒的、发生在宇称相同态之间的非零电偶极跃迁振幅 $T_{if}(E1)$. 由于APV信号极弱, 通常需要采用干涉技术, 借助外场或允许跃迁以增强其响应. 利用此技术, 在 ^{133}Cs 原子的 $6S_{1/2} \rightarrow 7S_{1/2}$ 的跃迁中得到了目前最精确的APV测量结果[143]. 理论研究指出, APV的强度随核电荷数 Z 按 Z^3 规律增大, 因此在重元素中APV效应将显著增强[144]. 例如, 在Fr原子的 $7S_{1/2} \rightarrow 6D_{3/2,5/2}$ 跃迁中, APV信号预计比 ^{133}Cs 中 $6S_{1/2} \rightarrow 7S_{1/2}$ 跃迁强50倍以上[145]. 然而, 由于Fr元素没有稳定同位素, 目前关于其 $6D_{3/2}$ 和 $6D_{5/2}$ 等能级的实验数据仍然缺失, 导致理论计算缺乏有效约束, 不同理论模型对这些能级的预测差异可达 100 cm^{-1} [146~148]. 因此, 在开展Fr的APV测量之前, 在放射性核束装置上通过激光核谱实验系统研究其能级结构非常重要. 目前, 相关的实验已经在CERN-ISOLDE的CRIS谱仪上开展[149], 目的是精确测定 $6D_{3/2}$ 和 $6D_{5/2}$ 激发态的能级位置以及寿命, 并探测谱项为 nP 和 nF 的里德堡态, 以结合场电离的技术对Fr进行更高灵敏度的激光核谱测量(图6).

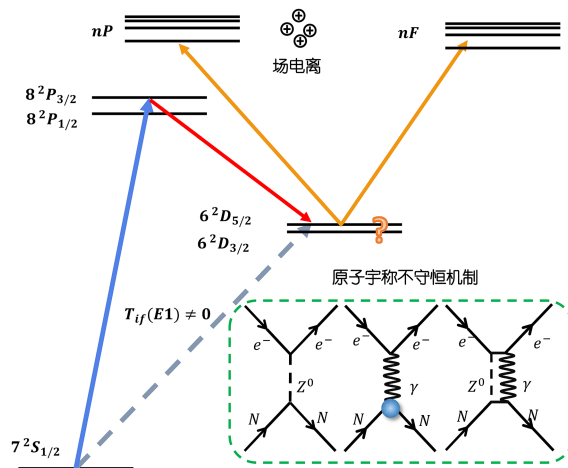


图6 Fr中原子宇称不守恒的相关能级[149]以及原子宇称不守恒的物理机制[124]

Figure 6 Energy levels in Fr atoms for atomic parity violation studies[149] and physical mechanism of atomic parity violation[124]

2.3.2 分子体系中电荷共轭-宇称不守恒检验

宇宙中正反物质不对称性的起源是现代物理学的前沿课题. 为解释这一现象, 物理学家Andrei Sakharov于1967年指出, 宇宙演化过程中必须满足三个条件, 其中电荷共轭(charge conjugation, C)与电荷共轭-宇称的同时破缺起着至关重要的作用^[150]. 目前实验上已在介子与重子体系中观测到CP破缺现象, 可由标准模型予以解释^[151~153]. 然而, 标准模型所预言的CP破缺强度过于微弱, 远不足以解释现代天文学的观测结果, 需要引入超出标准模型的CP对称性破缺机制. 低能区原子分子中EDM的探测是寻找CP对称性破缺效应的重要方向之一. 近年来的理论计算与初步实验结果表明, 采用重核放射性分子, 得益于分子内部的强有效电场以及八极形变重原子核中Schiff矩的增强, EDM探测的实验灵敏度有望提升5~7个量级^[51]. 然而重核分子大多为放射性分子, 其光谱信息几乎空白.

应用于放射性核束装置的激光核谱技术, 为放射性分子的光谱研究提供了绝佳的机会. 近几年, 通过共线激光谱技术对RaF分子的光谱测量实验表明: RaF分子有着相对简单的电子能级结构, 其激发态 $A^2\Pi_{1/2}$ 以下不存在其他亚稳态; RaF分子基态 $X^2\Sigma^+$ 与激发态 $A^2\Pi_{1/2}$ 之间的电子振动跃迁具有高度对角化的Franck-Condon因子^[47], 能够形成准封闭的跃迁循环, 为RaF分子的激光冷却提供了条件(如图7). 与此同时, RaF的激光核谱实验采用多步脉冲激光延时共振电离的方法, 测量了 $A^2\Pi_{1/2}$ 激发态的寿命^[154]. 其小于50 ns的能级寿命, 可以提供大于 $10^6/s$ 的光子散射率. 上述实验结果表明, RaF分子展现出良好的激光冷却可行性^[49]. 在此基础上, 通过进一步发展磁光阱或离子阱等关键技术, 有望实现放射性分子EDM的精密测量.

3 总结和展望

本文系统阐述了高精度共线激光谱技术的基本原理及其在原子核物理与原子分子物理交叉研究中的前

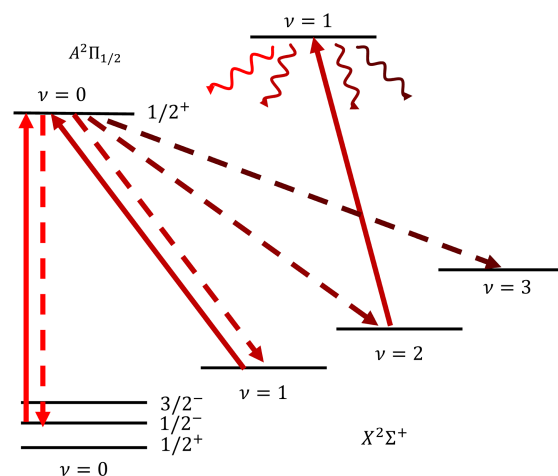


图7 RaF分子中可能的激光冷却模式^[49]

Figure 7 Possible laser cooling schemes for RaF molecules^[49]

沿进展. 作为一种探测原子与原子核相互作用的精密光谱手段, 共线激光谱技术凭借与放射性核束装置结合的独特优势, 持续推动着这两个研究方向在研究内容与方法上的深度交叉与协同创新. 在原子核物理层面, 激光核谱技术通过对原子核自旋、磁矩、电四极矩和电荷半径等基本性质的精确测量, 为奇特核结构现象的研究提供了关键实验依据. 在原子分子物理层面, 激光核谱技术不仅能够多种体系中(如不稳定核、高电荷态离子)开展QED理论检验的相关实验测量, 还能够检验与推动多体原子理论计算的发展. 此外, 激光核谱技术还逐步在未来基本对称性检验的实验中发挥作用. 随着新一代放射性核束装置、高功率窄线宽激光技术和高灵敏度探测方法的持续发展, 激光核谱技术有望对更广阔的核素版图与更丰富的对象开展精密激光谱探测. 未来, 对于远离稳定线的丰中子与丰质子核素(例如中重质量Sn核区、中质量Ni核区), 以及超重元素开展高精度光谱测量, 将有力推动不稳定原子核性质和奇特结构研究、QED理论与基本对称性检验, 以及原子多体理论计算等诸多方向的发展, 持续深化人类对微观物质结构及基本相互作用规律的认识.

参考文献

- 1 Yuan B, Yang Q. Spectrum Technology and Application (in Chinese). Zhejiang: Zhejiang University Press, 2019 [袁波, 杨青. 光谱技术及应用. 浙江: 浙江大学出版社, 2019]

- 2 Brix P. On the shoulders of giants — Early history of hyperfine structure spectroscopy. For Gisbert zu Putlitz. In: Atomic Physics Methods in Modern Research. Heidelberg: Springer, 1997. 439–448
- 3 Kragh H. The isotope effect: prediction, discussion, and discovery. *Stud Hist Philos Sci B Stud Hist Philos Mod Phys*, 2012, 43: 176–183
- 4 Pálffy A. Nuclear effects in atomic transitions. *Contemp Phys*, 2010, 51: 471–496
- 5 Yang X F, Wang S J, Wilkins S G, et al. Laser spectroscopy for the study of exotic nuclei. *Prog Part Nucl Phys*, 2023, 129: 104005
- 6 Ye Y L, Yang X F, Sakurai H, et al. Physics of exotic nuclei. *Nat Rev Phys*, 2025, 7: 21–37
- 7 Blaum K, Dilling J, Nörtershäuser W. Precision atomic physics techniques for nuclear physics with radioactive beams. *Phys Scr*, 2013, T152: 014017
- 8 Mueller P, Sulai I A, Villari A C C, et al. Nuclear charge radius of ^8He . *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 252501
- 9 Sanchez R, Nörtershäuser W, Ewald G, et al. Nuclear charge radii of $^{9,11}\text{Li}$: the influence of halo neutrons. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 033002
- 10 Nörtershäuser W, Zakova M, Cazan R, et al. Nuclear charge radii of $^{7,9,10}\text{Be}$ and the one-neutron halo nucleus ^{11}Be . *Phys Rev Lett*, 2008, 102: 062503
- 11 Otsuka T, Shimizu N, Tsunoda Y. Moments and radii of exotic Na and Mg isotopes. *Phys Rev C*, 2022, 105: 014319
- 12 Yordanov D, Bissell M, Blaum K, et al. Nuclear charge radii of $^{21-32}\text{Mg}$. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 042504
- 13 Cooper T G, Billowes J, Campbell P, et al. The nuclear magnetic moment of ^{26}Al by atomic beam laser spectroscopy. *J Phys G: Nucl Part Phys*, 1996, 22: 99
- 14 Papuga J, Bissell M L, Kreim K, et al. Spins and magnetic moments of ^{49}K and ^{51}K : establishing the $1/2^+$ and $3/2^+$ level ordering beyond $N = 28$. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 172503
- 15 Koszorús Á, Yang X F, Jiang W G, et al. Charge radii of exotic potassium isotopes challenge nuclear theory and the magic character of $N = 32$. *Nat Phys*, 2021, 17: 439–443
- 16 Garcia Ruiz R F, Bissell M L, Blaum K, et al. Ground-state electromagnetic moments of calcium isotopes. *Phys Rev C*, 2015, 91: 041304
- 17 Garcia Ruiz R F, Bissell M L, Blaum K, et al. Unexpectedly large charge radii of neutron-rich calcium isotopes. *Nat Phys*, 2016, 12: 594–598
- 18 Bai S W, Koszorús Á, Hu B S, et al. Electromagnetic moments of scandium isotopes and $N = 28$ isotones in the distinctive $0f_{7/2}$ orbit. *Phys Lett B*, 2022, 829: 137064
- 19 Bai S W, Yang X F, Koszorús Á, et al. Charge radii of neutron-rich scandium isotopes and the seniority symmetry in the $0f_{7/2}$ Shell. *Phys Rev Lett*, 2025, 134: 182501
- 20 Malbrunot-Ettenauer S, Kaufmann S, Bacca S, et al. Nuclear charge radii of the nickel isotopes $^{58-68,70}\text{Ni}$. *Phys Rev Lett*, 2022, 128: 022502
- 21 Sommer F, König K, Rossi D M, et al. Charge radii of $^{55,56}\text{Ni}$ reveal a surprisingly similar behavior at $N = 28$ in Ca and Ni isotopes. *Phys Rev Lett*, 2022, 129: 132501
- 22 de Groote R P, Billowes J, Binnersley C L, et al. Dipole and quadrupole moments of $^{73-78}\text{Cu}$ as a test of the robustness of the $Z = 28$ shell closure near ^{78}Ni . *Phys Rev C*, 2017, 96: 041302
- 23 de Groote R P, Billowes J, Binnersley C L, et al. Measurement and microscopic description of odd – even staggering of charge radii of exotic copper isotopes. *Nat Phys*, 2020, 16: 620–624
- 24 Yang X F, Wraith C, Xie L, et al. Isomer shift and magnetic moment of the long-lived $1/2^+$ isomer in $^{79}_{30}\text{Zn}_{49}$: signature of shape coexistence near ^{78}Ni . *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 182502
- 25 Wraith C, Yang X F, Xie L, et al. Evolution of nuclear structure in neutron-rich odd-Zn isotopes and isomers. *Phys Lett B*, 2017, 771: 385–391
- 26 Xie L, Yang X F, Wraith C, et al. Nuclear charge radii of $^{62-80}\text{Zn}$ and their dependence on cross-shell proton excitations. *Phys Lett B*, 2019, 797: 134805
- 27 Cheal B, Billowes J, Bissell M L, et al. Laser spectroscopy of gallium isotopes beyond $N = 50$. *J Phys: Conf Ser*, 2012, 381: 012071
- 28 Farooq-Smith G J, Vernon A R, Billowes J, et al. Probing the $_{31}\text{Ga}$ ground-state properties in the region near $Z = 28$ with high-resolution laser spectroscopy. *Phys Rev C*, 2017, 96: 044324
- 29 Kanellakopoulos A, Yang X F, Bissell M L, et al. Nuclear moments of germanium isotopes near $N = 40$. *Phys Rev C*, 2020, 102: 054331
- 30 Wang S J, Kanellakopoulos A, Yang X F, et al. Nuclear charge radii of germanium isotopes around $N = 40$. *Phys Lett B*, 2024, 856: 138867
- 31 Reponen M, de Groote R P, Al Ayoubi L, et al. Evidence of a sudden increase in the nuclear size of proton-rich silver–96. *Nat commun*, 2021, 12: 4596
- 32 Yordanov D T, Balabanski D L, Bissell M L, et al. Simple nuclear structure in $^{111-129}\text{Cd}$ from atomic isomer shifts. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 032501
- 33 Hammen M, Nörtershäuser W, Balabanski D L, et al. From calcium to cadmium: testing the pairing functional through charge radii measurements of $^{100-130}\text{Cd}$. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 102501
- 34 Vernon A R, Garcia Ruiz R F, Miyagi T, et al. Nuclear moments of indium isotopes reveal abrupt change at magic number 82. *Nature*, 2022, 607: 260–265
- 35 Vernon A R, Binnersley C L, Sahoo B K, et al. Variations in the charge radii of indium isotopes between $N = 52$ and 82. *Phys Rev C*, 2025, 111:

064325

- 36 Gorges C, Rodríguez L V, Balabanski D L, et al. Laser spectroscopy of neutron-rich tin isotopes: a discontinuity in charge radii across the $N = 82$ shell closure. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 192502
- 37 Yordanov D T, Rodríguez L V, Balabanski D L, et al. Structural trends in atomic nuclei from laser spectroscopy of tin. *Commun Phys*, 2020, 3: 10
- 38 Lechner S, Miyagi T, Xu Z, et al. Electromagnetic moments of the antimony isotopes $^{112-133}\text{Sb}$. *Phys Lett B*, 2023, 847: 138278
- 39 Cubiss J G, Andreyev A N, Barzakh A E, et al. Deformation versus sphericity in the ground states of the lightest gold isotopes. *Phys Rev Lett*, 2023, 131: 202501
- 40 Marsh B A, Day Goodacre T, Sels S, et al. Characterization of the shape-staggering effect in mercury nuclei. *Nat Phys*, 2018, 14: 1163–1167
- 41 Barzakh A E, Andreyev A N, Cocolios T E, et al. Changes in mean-squared charge radii and magnetic moments of $^{179-184}\text{Tl}$ measured by in-source laser spectroscopy. *Phys Rev C*, 2017, 95: 014324
- 42 De Witte H, Andreyev A N, Barré N, et al. Nuclear charge radii of neutron-deficient lead isotopes beyond $N = 104$ midshell investigated by in-source laser spectroscopy. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 112502
- 43 Barzakh A, Andreyev A N, Raison C, et al. Large shape staggering in neutron-deficient Bi isotopes. *Phys Rev Lett*, 2021, 127: 192501
- 44 Laatiaoui M, Lauth W, Backe H, et al. Atom-at-a-time laser resonance ionization spectroscopy of nobelium. *Nature*, 2016, 538: 495–498
- 45 Raeder S, Ackermann D, Backe H, et al. Probing sizes and shapes of nobelium isotopes by laser spectroscopy. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 232503
- 46 Chhetri P, Ackermann D, Backe H, et al. Precision measurement of the first ionization potential of nobelium. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 263003
- 47 Garcia Ruiz R F, Berger R, Billowes J, et al. Spectroscopy of short-lived radioactive molecules. *Nature*, 2020, 581: 396–400
- 48 Udrescu S M, Brinson A J, Ruiz R F G, et al. Isotope shifts of radium monofluoride molecules. *Phys Rev Lett*, 2021, 127: 033001
- 49 Udrescu S M, Wilkins S G, Breier A, et al. Precision spectroscopy and laser-cooling scheme of a radium-containing molecule. *Nat Phys*, 2024, 20: 202–207
- 50 Athanasakis-Kaklamanakis M. Laser spectroscopy of radioactive molecules for future searches of new physics. Doctor Dissertation. Belgium: KU Leuven, 2023
- 51 Arrowsmith-Kron G, Athanasakis-Kaklamanakis M, Au M, et al. Opportunities for fundamental physics research with radioactive molecules. *Rep Prog Phys*, 2024, 87: 084301
- 52 Reinhardt S, Saathoff G, Buhr H, et al. Test of relativistic time dilation with fast optical atomic clocks at different velocities. *Nat Phys*, 2007, 3: 861–864
- 53 Botermann B, Bing D, Geppert C, et al. Test of time dilation using stored Li^+ ions as clocks at relativistic speed. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 120405
- 54 Winzen D, Hannen V, Bussmann M, et al. Laser spectroscopy of the $^2S_{1/2} - ^2P_{1/2}, ^2P_{3/2}$ transitions in stored and cooled relativistic C^{3+} ions. *Sci Rep*, 2021, 11: 9370
- 55 Chen D Y, Wang H B, Wen W Q, et al. Laser spectroscopy of highly charged ions at the storage ring CSRe: Schottky-based spectroscopic investigation and XUV fluorescence detector development. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2024, 1065: 169496
- 56 Mohr K, Sánchez R, Nörtershäuser W, et al. A setup to study atomic state population dynamics and optical polarization at CRYRING@ ESR. *J Instrum*, 2025, 20: P06047
- 57 Seelig P, Borneis S, Dax A, et al. Ground state hyperfine splitting of hydrogenlike $^{207}\text{Pb}^{81+}$ by laser excitation of a bunched ion beam in the GSI experimental storage ring. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 4824
- 58 Horst M, Andelkovic Z, Brandau C, et al. Storage-ring laser spectroscopy of accelerator-produced hydrogen-like $^{208}\text{Pb}^{82+}$. *Nat Phys*, 2025, 21: 1057–1063
- 59 M Ginges J. QED tests in strong fields. *Nat Phys*, 2025, 21: 1034–1035
- 60 Ullmann J, Andelkovic Z, Brandau C, et al. High precision hyperfine measurements in Bismuth challenge bound-state strong-field QED. *Nat commun*, 2017, 8: 15484
- 61 Nörtershäuser W, Sánchez R. Laser spectroscopy at storage rings. *Phys Scr*, 2015, T166: 014020
- 62 Koszorús Á, de Groote R P, Cheal B, et al. Nuclear structure studies by collinear laser spectroscopy. *Eur Phys J A*, 2024, 60: 20
- 63 Kaufman S L. High-resolution laser spectroscopy in fast beams. *Opt Commun*, 1976, 17: 309–312
- 64 Wing W H, Ruff G A, Lamb Jr W E, et al. Observation of the infrared spectrum of the hydrogen molecular ion HD^+ . *Phys Rev Lett*, 1976, 36: 1488
- 65 Kudriavtsev Y A, Letokhov V. Laser method of highly selective detection of rare radioactive isotopes through multistep photoionization of accelerated atoms. *Appl Phys B*, 1982, 29: 219–221
- 66 Schulz C, Arnold E, Borchers W, et al. Resonance ionization spectroscopy on a fast atomic ytterbium beam. *J Phys B: At Mol Opt Phys*, 1991, 24: 4831
- 67 Nieminen A, Campbell P, Billowes J, et al. On-line ion cooling and bunching for collinear laser spectroscopy. *Phys Rev Lett*, 2002, 88: 094801

- 68 Frånberg H, Delahaye P, Billowes J, et al. Off-line commissioning of the ISOLDE cooler. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2008, 266: 4502–4504
- 69 Mané E, Billowes J, Blaum K, et al. An ion cooler-buncher for high-sensitivity collinear laser spectroscopy at ISOLDE. *Eur Phys J A*, 2009, 42: 503–507
- 70 Flanagan K T, Lynch K M, Billowes J, et al. Collinear resonance ionization spectroscopy of neutron-deficient francium isotopes. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 212501
- 71 Neugart R. Laser spectroscopy on mass-separated radioactive beams. *Nucl Instrum Methods Phys Res*, 1981, 186:165–175
- 72 Vernon A, de Groote R, Billowes J, et al. Optimising the Collinear Resonance Ionisation Spectroscopy (CRIS) experiment at CERN-ISOLDE. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2020, 463: 384–389
- 73 Kowalska M, Aschenbrenner P, Baranowski M, et al. New laser polarization line at the ISOLDE facility. *J Phys G: Nucl Part Phys*, 2017, 44: 084005
- 74 Minamisono K, Mantica P F, Klose A, et al. Commissioning of the collinear laser spectroscopy system in the BECOLA facility at NSCL. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2013, 709: 85–94
- 75 Kujanpää S, Raggio A, de Groote R P, et al. RAPTOR: a new collinear laser ionization spectroscopy and laser-radiofrequency double-resonance experiment at the IGISOL facility. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2023, 541: 388–391
- 76 de Groote R P, de Roubin A, Campbell P, et al. Upgrades to the collinear laser spectroscopy experiment at the IGISOL. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2020, 463: 437–440
- 77 Voss A, Procter T J, Shelbaya O, et al. The collinear fast beam laser spectroscopy (CFBS) experiment at TRIUMF. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2016, 811: 57–69
- 78 Liu Y S, Hu H R, Yang X F, et al. Commissioning of a radiofrequency quadrupole cooler-buncher for collinear laser spectroscopy. 2025, arXiv: 2502.10740
- 79 Bai S W, Yang X F, Wang S J, et al. Commissioning of a high-resolution collinear laser spectroscopy apparatus with a laser ablation ion source. *Nucl Sci Tech*, 2022, 33: 9
- 80 Wang S J, Yang X F, Bai S W, et al. Construction and commissioning of the collinear laser spectroscopy system at BRIF. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2022, 1032: 166622
- 81 Liu Y C, Yang X F, Bai S W, et al. Control and data acquisition system for collinear laser spectroscopy experiments. *Nucl Sci Tech*, 2023, 34: 38
- 82 Zhang P, Liu Y S, Bai S W, et al. Progress in the development of a collinear laser spectroscopy setup for the study of unstable nuclei (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 70: 3308–3317 [张鹏, 刘寅绅, 白世伟, 等. 用于不稳定原子核研究的共线激光谱仪研制进展. *科学通报*, 2022, 70: 3308–3317]
- 83 Hu H R, Guo Y F, Yang X F, et al. Development and characterization of a high-resolution, high-sensitivity collinear resonance ionization spectroscopy system. *Sci Bull*, 2025, 70: 2721–2724
- 84 Nan W, Guo B, Chen J, et al. Nuclear physics at BRIF. *Prog Part Nucl Phys*, 2025: 104188
- 85 Zhou X H, Yang J C, HIAF Project Team. Status of the high-intensity heavy-ion accelerator facility in China. *AAPPS Bull*, 2022, 32: 35
- 86 Yang F J. Atomic Physics (5th ed) (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2019 [杨福家. 原子物理学(第五版). 北京: 高等教育出版社, 2019]
- 87 Lu X T, Jiang D X, Ye Y L. Nuclear Physics (revised edition) (in Chinese). Beijing: China Atomic Energy Publishing & Media Company Limited, 2010 [卢希庭, 江栋兴, 叶沿林. 原子核物理(修订版). 北京: 原子能出版社, 2010]
- 88 Bohr A, Weisskopf V F. The influence of nuclear structure on the hyperfine structure of heavy elements. *Phys Rev*, 1950, 77: 94–98
- 89 Moskowitz P A, Lombardi M. Distribution of nuclear magnetization in mercury isotopes. *Phys Lett B*, 1973, 46: 334–336
- 90 Persson J R. Table of hyperfine anomaly in atomic systems–2023. *Atomic Data Nucl Data Tables*, 2023, 154: 101589
- 91 Neyens G. Nuclear magnetic and quadrupole moments for nuclear structure research on exotic nuclei. *Rep Prog Phys*, 2003, 66: 633–689
- 92 Cheal B, Cocolios T E, Fritzsche S. Laser spectroscopy of radioactive isotopes: role and limitations of accurate isotope-shift calculations. *Phys Rev A*, 2012, 86: 042501
- 93 Sahoo B K, Vernon A R, Ruiz R F G, et al. Analytic response relativistic coupled-cluster theory: the first application to indium isotope shifts. *New J Phys*, 2020, 22: 012001
- 94 König K, Sommer F, Lantis J, et al. Isotope-shift measurements and King-fit analysis in nickel isotopes. *Phys Rev C*, 2021, 103: 054305
- 95 Neugart R, Billowes J, Bissell M L, et al. Collinear laser spectroscopy at ISOLDE: new methods and highlights. *J Phys G: Nucl Part Phys*, 2017, 44: 064002
- 96 de Groote R P, Budinčević I, Billowes J, et al. Use of a continuous wave laser and pockels cell for sensitive high-resolution collinear resonance ionization spectroscopy. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 132501
- 97 Budinčević I, Billowes J, Bissell M L, et al. Laser spectroscopy of francium isotopes at the borders of the region of reflection asymmetry. *Phys Rev C*, 2014, 90: 014317

- 98 Aidala C, Aprahamian A, Bacca S, et al. A New Era of Discovery: The 2023 Long-Range Plan for Nuclear Science (V. 1.2). Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA (United States), 2023
- 99 Lewitowicz M, Widmann E, Körner G E. NuPECC long range plan 2024 for European nuclear physics. *Bull Am Phys Soc*, 2024
- 100 Lu Z T, Mueller P, Drake G, et al. Colloquium: laser probing of neutron-rich nuclei in light atoms. *Rev Mod Phys*, 2013, 85: 1383–1400
- 101 Epelbaum E, Hammer H W, Meissner U G. Modern theory of nuclear forces. *Rev Mod Phys*, 2009, 81: 1773–1825
- 102 Lonardoni D, Carlson J, Gandolfi S, et al. Properties of nuclei up to $A = 16$ using local chiral interactions. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 122502
- 103 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O, et al. Measurements of interaction cross sections and nuclear radii in the light p-shell region. *Phys Rev Lett*, 1985, 55: 2676
- 104 Hansen P, Jonson B. The neutron halo of extremely neutron-rich nuclei. *Europhys Lett*, 1987, 4: 409
- 105 Kobayashi T, Shimoura S, Tanihata I, et al. Electromagnetic dissociation and soft giant dipole resonance of the neutron-dripline nucleus ^{11}Li . *Phys Lett B*, 1989, 232: 51–55
- 106 Ewald G, Nörtershäuser W, Dax A, et al. Nuclear charge radii of $^{8,9}\text{Li}$ determined by laser spectroscopy. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 113002
- 107 Maaß B, Müller P, Nörtershäuser W, et al. Towards laser spectroscopy of the proton-halo candidate boron-8. *Hyperfine Interact*, 2017, 238: 25
- 108 Imgram P. High-precision laser spectroscopy of helium-like carbon $^{12}\text{C}^{4+}$. Doctor Dissertation. Darmstadt: Technische University Darmstadt, 2023
- 109 Imgram P, König K, Maaß B, et al. Collinear laser spectroscopy of highly charged ions produced with an electron-beam ion source. *Nucl Phys A*, 2023, 108: 062809
- 110 Yerokhin V A, Patkóš V, Pachucki K. QED calculations of energy levels of helium-like ions with $5 \leq Z \leq 30$. *Nucl Phys A*, 2022, 106: 022815
- 111 Imgram P, König K, Maaß B, et al. Collinear laser spectroscopy of $2^3S_1 \rightarrow 2^3P_J$ transitions in helium-like $^{12}\text{C}^{4+}$. *Phys Rev Lett*, 2023, 131: 243001
- 112 Kramida A, Ralchenko Y, Reader J, et al. NIST Atomic Spectra Database (version 5.10). 2022
- 113 Müller P, Heinz M, Imgram P, et al. The nuclear charge radius of ^{13}C . *Nat commun*, 2025, 16: 6234
- 114 Ohayon B, Abeln A, Bara S, et al. Towards precision muonic X-ray measurements of charge radii of light nuclei. *Physics*, 2024, 6: 206–215
- 115 Vernon A, Binnersley C, Sahoo B, et al. Variations in the charge radii of indium isotopes between $N = 52$ and 82. *Phys Rev C*, 2025, 111: 064325
- 116 Kartheim J, Ricketts C, Garcia Ruiz R, et al. Electromagnetic properties of indium isotopes illuminate the doubly magic character of ^{100}Sn . *Nat Phys*, 2024, 20: 1719–1725
- 117 Jin H, Hasegawa M, Tazaki S, et al. Large-scale shell-model calculation with core excitations for neutron-rich nuclei beyond ^{132}Sn . *Phys Rev C*, 2011, 84: 044324
- 118 Rodríguez L V, Balabanski D, Bissell M, et al. Doubly-magic character of ^{133}Sn studied via electromagnetic moments of ^{133}Sn . *Phys Rev C*, 2020, 102: 051301
- 119 Hinke C, Böhmer M, Boutachkov P, et al. Superallowed Gamow–Teller decay of the doubly magic nucleus ^{100}Sn . *Nature*, 2012, 486: 341–345
- 120 Bader V, Gade A, Weisshaar D, et al. Quadrupole collectivity in neutron-deficient sn nuclei: ^{104}Sn and the role of proton excitations. *Phys Rev C*, 2013, 88: 051301
- 121 Vaman C, Andreoiu C, Bazin D, et al. $Z = 50$ Shell gap near ^{100}Sn from intermediate-energy Coulomb excitations in even-mass $^{106-112}\text{Sn}$ isotopes. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 162501
- 122 Gustafsson F P, Rodríguez L V, Ruiz R F, et al. Charge radii measurements of exotic tin isotopes in the proximity of $N = 50$ and $N = 82$. 2025, arXiv: 2504.17060
- 123 Yordanov D T, Balabanski D, Bieroń J, et al. Spins, electromagnetic moments, and isomers of $^{107-129}\text{Cd}$. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 192501
- 124 Safronova M, Budker D, DeMille D, et al. Search for new physics with atoms and molecules. *Rev Mod Phys*, 2018, 90: 025008
- 125 Fan X, Myers T, Sukra B, et al. Measurement of the electron magnetic moment. *Phys Rev Lett*, 2023, 130: 071801
- 126 Yan Z C, Nörtershäuser W, Drake G. High precision atomic theory for Li and Be^+ : QED shifts and isotope shifts. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 243002
- 127 Sansonetti C J, Simien C E, Gillaspay J D, et al. Absolute transition frequencies and quantum interference in a frequency comb based measurement of the $^{6,7}\text{Li}$ D lines. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 023001
- 128 Nörtershäuser W, Geppert C, Krieger A, et al. Precision test of many-body QED in the $\text{Be}^+ 2p$ fine structure doublet using short-lived isotopes. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 033002
- 129 Indelicato P. QED tests with highly charged ions. *J Phys B: At Mol Opt Phys*, 2019, 52: 232001
- 130 Riis E, Sinclair A G, Poulsen O, et al. Lamb shifts and hyperfine structure in $^6\text{Li}^+$ and $^7\text{Li}^+$: theory and experiment. *Phys Rev A*, 1994, 49: 207–220
- 131 Scholl T J, Cameron R, Rosner S D, et al. Precision measurement of relativistic and QED effects in heliumlike beryllium. *Phys Rev Lett*, 1993, 71: 2188–2191
- 132 Skripnikov L V, Schmidt S, Ullmann J, et al. New nuclear magnetic moment of ^{209}Bi : resolving the bismuth hyperfine puzzle. *Phys Rev Lett*,

- 2018, 120: 09300
- 133 Schmidt S, Billowes J, Bissell M, et al. The nuclear magnetic moment of ^{208}Bi and its relevance for a test of bound-state strong-field QED. *Phys Lett B*, 2018, 779: 324–330
 - 134 Pašteka L, Eliav E, Reitsma M, et al. Relativistic atomic structure calculations in support of spectroscopy. 2025, arXiv: 2508.12751
 - 135 Wilkins S, Perrett H, Udrescu S, et al. Ionization potential of radium monofluoride. 2024, arXiv: 2408.1467
 - 136 Vernon A, Ricketts C, Billowes J, et al. Laser spectroscopy of indium rydberg atom bunches by electric field ionization. *Sci Rep*, 2020, 10: 12306
 - 137 Gustafsson F P, Ricketts C M, Reitsma M L, et al. Tin resonance-ionization schemes for atomic- and nuclear-structure studies. *Phys Rev A*, 2020, 102: 052812
 - 138 Kumar P, Li C B, Sahoo B. Diverse trends of electron correlation effects for properties with different radial and angular factors in an atomic system: a case study in Ca^+ . *J Phys B: At Mol Opt Phys*, 2018, 51: 055101
 - 139 Lee T D, Yang C N. Question of parity conservation in weak interactions. *Phys Rev*, 1956, 104: 254
 - 140 Wu C S, Ambler E, Hayward R W, et al. Experimental test of parity conservation in beta decay. *Phys Rev*, 1957, 105: 1413
 - 141 Zel'dovich Y B. Parity nonconservation in the first order in the weak-interaction constant in electron scattering and other effects. *J Exp Theor Phys*, 1959, 36: 964–966
 - 142 Barkov L, Zolotarev M. Parity violation in bismuth atoms and weak interaction neutral currents. *Zh Eksp Teor Fiz*, 1980, 79: 713–729
 - 143 Wood C, Bennett S, Cho D, et al. Measurement of parity nonconservation and an anapole moment in cesium. *Science*, 1997, 275: 1759–1763
 - 144 Bouchiat M, Bouchiat C. Weak neutral currents in atomic physics. *Phys Lett B*, 1974, 48: 111–114
 - 145 Roberts B, Dzuba V, Flambaum V. Parity and time-reversal violation in atomic systems. *Annu Rev Nuc Part Sci*, 2015, 65: 63–86
 - 146 Dzuba V, Flambaum V, Sushkov O. Calculation of energy levels, E1 transition amplitudes, and parity violation in francium. *Phys Rev A*, 1995, 51: 3454
 - 147 Safronova U, Johnson W, Safronova M. Excitation energies, polarizabilities, multipole transition rates, and lifetimes of ions along the francium isoelectronic sequence. *Phys Rev A*, 2007, 76: 042504
 - 148 Tang Y B, Lou B Q, Shi T Y. Relativistic multireference coupled-cluster theory based on a B-spline basis: Application to atomic francium. *Phys Rev A*, 2017, 96: 022513
 - 149 de Groote R P, Lassegues P. Characterization of the atomic 6D-states in neutral francium using collinear resonance ionization spectroscopy. CERN-INTC-2023-035/INTC-P-664, 2023
 - 150 Sakharov A D. Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe. *Usp Fiz Nauk*, 1991, 161: 61–64
 - 151 Christenson J H, Cronin J W, Fitch V L, et al. Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson. *Phys Rev Lett*, 1964, 13: 138
 - 152 Sachs R G. CP violation in K^0 decays. *Phys Rev Lett*, 1964, 13: 286
 - 153 LHCb Collaboration. Observation of charge – parity symmetry breaking in baryon decays. *Nature*, 2025, 643: 1223
 - 154 Athanasakis-Kaklamanakis M, Wilkins S G, Lassègues P, et al. Radiative lifetime of the $A^2\Pi_{1/2}$ state in RaF with relevance to laser cooling. *Phys Rev A*, 2024, 110: L010802

Summary for “基于高精度共线激光光谱技术的核物理和原子分子物理交叉研究”

Interdisciplinary research in nuclear physics and atomic and molecular physics based on high-precision collinear laser spectroscopy

Shao-Jie Chen, Dong-Yang Chen*, Xiao-Fei Yang*, Han-Rui Hu, Yang-Fan Guo, Zhou Yan, Wen-Cong Mei & Yan-Lin Ye

School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China

* Corresponding authors, E-mail: chendongyang@pku.edu.cn; xiaofei.yang@pku.edu.cn

The hyperfine structure reflects the electromagnetic interactions between the atomic nucleus and the surrounding electrons. Their spectral features simultaneously encode information about both nuclear properties and the structure of atomic and molecular systems. High-precision measurements of hyperfine structures and isotope shifts using advanced laser spectroscopy techniques enable the model-independent extraction of multiple fundamental properties of atomic nuclei, such as spins, magnetic moments, electric quadrupole moments, and charge radii. Such measurements provide critical experimental inputs for the discovery and investigation of exotic phenomena in unstable nuclei, including halo structure, island of inversion, shell evolution, and shape coexistence, as well as for testing nuclear theoretical models. Additionally, the integration of laser spectroscopy with radioactive ion beam facilities has significantly advanced frontier research in atomic and molecular physics, such as experimental validation of quantum electrodynamics, benchmarking the accuracy of atomic and molecular structure calculations, and exploration of fundamental symmetries.

In recent years, the continued development of radioactive ion beam facilities has expanded the nuclear chart, enabling experimental access to an increasing number of unstable nuclei. However, the short lifetimes, low production yields, and substantial contamination from stable and long-lived isomers present major challenges for laser spectroscopy measurements. Among various methods, collinear laser spectroscopy, owing to its high spectral resolution, has played an irreplaceable role in studying the exotic structures of unstable nuclei across various mass regions, while also contributing to related research in atomic and molecular physics. It has been widely implemented at major radioactive ion beam facilities worldwide. This review will systematically discuss the measurement principles and methodological features of collinear laser spectroscopy based on fluorescence detection and collinear resonance ionization spectroscopy based on ion detection. It will also emphasize the innovative applications and recent advances of these two techniques in the interdisciplinary research between nuclear physics and atomic and molecular physics.

collinear laser spectroscopy, collinear resonance ionization spectroscopy, hyperfine structure, unstable nuclei, highly charged ion, radioactive molecules

doi: [10.1360/CSB-2025-5455](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5455)