

专题: 阿秒物理

高电荷态离子阿秒激光光谱研究展望*

张大成^{1)†} 葛韩星¹⁾ 巴雨璐¹⁾ 汶伟强²⁾ 张怡¹⁾陈冬阳²⁾ 汪寒冰²⁾ 马新文²⁾

1) (西安电子科技大学光电工程学院, 西安 710071)

2) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(2023 年 6 月 14 日收到; 2023 年 8 月 8 日收到修改稿)

高电荷态离子 (highly charged ions, HCI) 的光谱测量不仅可以检验量子电动力学效应和相对论效应等基本物理模型, 还能够为天体物理、聚变等离子体物理甚至 HCI 光钟等研究提供关键原子物理数据. HCI 离子能级跃迁大多在极紫外甚至 X 射线波段, 受限于目前的光源技术较难直接产生该波段激光, 实验室对于 HCI 离子的激光光谱测量十分有限. 阿秒光源具有极紫外甚至软 X 波段的高光子能量和超短的脉冲持续时间, 为实验室开展 HCI 的光谱测量与超短能级寿命研究等提供了新的机遇. 本文分析了目前国际上利用同步辐射光、自由电子激光以及飞秒高次谐波等光源已开展的一些 HCI 离子光谱实验测量的基本方法、研究进展等, 总结了阿秒光源、离子靶等技术的研究现状, 讨论了将极紫外阿秒光源与不同 HCI 离子靶的技术结合开展 HCI 离子阿秒时间分辨激光光谱测量的可行性, 并提出了一个 HCI 离子阿秒光谱测量的初步设计方案, 为未来开展 HCI 光谱精密测量与离子能级寿命测量等研究提供参考.

关键词: 阿秒脉冲, 高电荷态离子, 精密激光光谱, 能级结构**PACS:** 32.80.Fb, 32.80.-t, 42.62.Fi, 32.30.Rj**DOI:** 10.7498/aps.72.20230986

1 引言

高电荷态离子 (highly charged ion, HCI), 又称高离化态离子, 是指原子被剥掉多个核外电子后处在高度带电状态的离子, 其广泛存在于各种天体和人工制造的等离子体中^[1]. 宇宙中超过 95% 的可见物质是由等离子体组成的, 其中恒星、超新星、近恒星云、激波和活跃星系核喷射物等处于高温等离子体状态, 包含大量的 HCI 离子, 它们主要是通过光电离和电子碰撞电离产生^[2]. HCI 光谱是了解天体物质成分、离子所处天体的等离子体环境状态等关键参数最直接甚至是唯一的手段, 对于理解和发展天体物理和宇宙模型必不可少^[3]. HCI 的

光电离截面、光吸收截面、能级寿命、跃迁速率等基本参数, 对于研究从太阳日冕到星系中心黑洞周围的吸积盘等天体物理中等离子体的密度、温度等特性具有重要意义^[4,5]. 目前对于低价离子的光电离实验数据和理论模型计算结果符合比较好, 但对于高价 HCI 离子, 理论计算与实验测量值偏差较大, 需要大量高精度的绝对光电离截面测量数据来验证及修正相关理论模型^[6,7]. 因此, 实验室开展 HCI 光谱测量可为天文观测提供高精度光谱数据库和建立天体演化模型提供重要数据支撑^[8].

与中性原子或低电荷态离子相比, HCI 随着离子核电荷数 Z 的不断增高, 其核外电子所能感受到的原子核的库仑场强不断增强, 离子能级结构中涉及的量子电动力学 (quantum electrodynamics,

* 国家自然科学基金 (批准号: U2032136, U2241288) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dch.zhang@xidian.edu.cn

QED) 效应 ($\sim Z^4$)、相对论效应 ($\sim Z^2$)、超精细分裂 ($\sim Z^3$) 及原子核尺寸效应 ($\sim Z^5 \sim Z^6$) 等会急剧增大^[9]. 因此, 开展不同核电荷数 Z 的 HCl 光谱的精密测量, 对于理解 QED 效应、相对论效应、甚至开展原子核性质研究具有至关重要的意义^[2]. 其中 HCl 中基态超精细分裂 (hyperfine splitting, HFS) 精密测量是精确检验 QED 效应的理想体系^[10]. 除此之外, HCl 能级寿命测量对于原子结构的理论发展十分重要. 测量 HCl 短寿命能级的传统实验方法包括束箔技术、重离子存储环、离子阱等^[5,11–17], 这些实验方法主要是研究 ms 至 ns 量级的寿命. 然而, 重离子的能级寿命随核电荷序数 Z 的增加急剧变短, 达到飞秒甚至更短时间尺度, 使得相关短寿命能级与光谱的实验测量数据十分有限. 因此, 发展新方法开展高 Z 重离子的超短寿命能级测量对于能级结构的理解具有重要意义. 再者, 深入理解认识 HCl 对光的发射和吸收对于模拟地球等离子体、核聚变研究以及探索热致密物质的状态方程至关重要^[2].

HCl 光谱精密测量的实验数据仍然非常有限, 以往主要是通过被动观测光谱测量获得, 其测量精度与灵敏度均有待提高^[18,19]. 利用激光主动激发的激光光谱技术是获得高精度光电离截面、能级结构、能级寿命等数据的重要方法^[20]. 然而, HCl 的电离能从数 eV 到数百 eV 不等, 实验室制备的离子靶密度又通常较低 ($\sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$), 比气体靶中的中性原子或分子的数量密度小 5—10 个数量级, 因此, 实验室开展 HCl 激发光谱测量需要非常高的光子能量和光子通量^[21]. 目前对于 HCl 共振激发光谱实验研究仅有利用自由电子激光、同步辐射等光源完成的有限工作. 阿秒光源是利用飞秒激光驱动气体靶等通过非线性效应产生的具有极短脉冲的极紫外波段的相干光, 具有高光子能量、超短脉冲宽度以及高峰值功率等特点. 特别是随着先进阿秒光源、欧洲极端光设施 (ELI-ALPS) 等重大阿秒科学大科学设施的建设, 更高通量、重频、光子能量的大型极紫外超快光源可以在未来提供, 这使得利用阿秒光源开展 HCl 的激光光谱测量成为可能.

本文总结了国际上利用同步辐射光、自由电子激光器以及飞秒高次谐波等光源开展 HCl 光谱测量的进展. 通过分析这些光源与阿秒光源的参数特点, 讨论了未来利用阿秒光源开展 HCl 离子能级寿命、能级结构测量的可行性, 为理解天文光谱观

测、QED 理论模型检验、核聚变中热束缚条件下的等离子体规律温稠密物质的状态方程等研究提供参考.

2 HCl 激发光谱测量进展

共振激光光谱学方法是研究原子和分子结构最灵敏、最精确的工具之一. 1992 年, 丹麦奥胡斯大学利用 ASTRID 存储环 (Aarhus storage ring in Denmark, ASTRID) 开展了 100 keV 的 $^7\text{Li}^+$ 离子的激光冷却和高精度光谱测量. 利用可见光波段激光将亚稳态 $1s2s \ ^3S_1$ 的 $^7\text{Li}^+$ 激发到 $1s2p \ ^3P_2$ 态, 并通过 $F'' = 5/2 - F' = 7/2$ 的 HFS 进行激光冷却, 测得其静止时的跃迁波长为 548.6 nm, 上能级寿命为 43 ns^[22]. 1994 年, Klaft 等^[23] 在德国重离子研究中心 GSI 的重离子存储环 ESR 上, 采用激光诱导荧光技术测量了类氢 $^{209}\text{Bi}^{82+}$ 基态超精细结构 $F = 4$ 至 $F = 5$ 的跃迁波长为 243.87(4) nm, $F = 5$ 亚能级的寿命为 0.351(16) ms, 这也是人们在光学系统中首次直接观测到 HFS. 2017 年德国 GSI 的 Ullmann 等^[24] 完成了类氢和类锂 Bi 离子的 HFS 精密测量实验, 实验与理论结果差异巨大, 提出了所谓的“超精细分裂之谜”. 这些精密测量实验极大地激发了人们开展基于原子分子以及 HCl 精密测量的兴趣. 德国 GSI 上的 HITRAP 减速器将 HCl 离子能量降低至 6 keV/u, 然后被 Penning 阱捕获, 并通过电子冷却和电阻冷却将离子冷却到液氮温度, 进而可以开展 HCl 的高精度激光光谱测量^[25]. 电子束离子阱 (electron beam ion trap, EBIT) 技术的发展, 使得在实验室可以更容易地获得高电荷态的中重质量离子, 并通过光谱测量这些离子的精细和超精细结构. 2011 年, 德国海德堡的马克斯·普朗克核物理研究所的科研人员利用线宽为 1.2 GHz 染料激光器在 EBIT 中开展类硼离子 Ar^{13+} 的 $1s^2 2s^2 2p$ 的 $^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$ 跃迁的共振激光光谱学实验, 测得亚稳态 $^2P_{3/2}$ 的寿命为 9.573 ms; 结合蒸发冷却技术后, 进一步得到 Ar^{13+} 离子的 $1s^2 2s^2 2p$ 的 $^2P_{3/2} - ^2P_{1/2}$ 跃迁的精确波长为 441.25568 (26) nm, 测量精度达到了 $\Delta\lambda/\lambda = 6 \times 10^{-7}$, 尽管这与理论值 441.261(70) nm 已经符合得很好, 但理论计算精度比实验测量低 2 个数量级, 从而对多电子体系能级理论计算提出挑战^[3]. 2015 年, 该研究所在低温射频离子阱中, 利用激光冷却的方式

将 Be^+ 成功冷却到亚开尔文温度, 实现了库仑晶化束和 Ar^{13+} 离子的协同冷却, 从而有效抑制了多普勒效应引起的谱线展宽, 极大地提高了激光光谱实验的分辨率, 为高精度检验新型原子钟和自然常数等奠定了基础^[26].

由于 HCI 的跃迁主要在 XUV 甚至 X 射线波段, 可见光波段所能测量的离子光谱十分有限, 开展更多 HCI 能级测量需要适于激发离子能级跃迁的激光光源. 同步辐射可以提供高亮度的极紫外至 X 射线波段光源, 很早便被用于 HCI 激发光谱研究. 早在 20 世纪 80 年代, Lyon 等^[27] 首次在英国 Daresbury 的同步辐射光源进行了 Ba^+ 离子的光电离实验. 他们利用光子能量 16.0—29.5 eV 的同步辐射光对基态 Ba^+ 的光电离的绝对截面进行了测量, 获得了 75 个电离峰, 其中最高的峰对应的光电离截面大于 10^{-15} cm^2 . 2002 年, Covington 等^[28] 利用美国劳伦斯伯克利国家实验室先进光源 (advanced light source, ALS) 结合离子-光子束 (IPB) 终端, 在 40—71 eV 光子能量范围内测量了 Ne^+ 的 $2\text{P}_{3/2}^0$ 态和 $2\text{P}_{1/2}^0$ 态的绝对光离截面, 光谱分辨率在 22—2 meV 内. 2005 年, Bizau 等^[29] 利用 ASTRID 储存环上产生的同步辐射激发由电子回旋共振 (electron cyclotron resonance, ECR) 离子源产生的 N^{2+} , N^{3+} , O^{3+} , O^{4+} , F^{3+} , F^{4+} 和 Ne^{4+} 等离子, 测量了它们的绝对光电离截面. 2010 年, Simon 等^[30] 利用德国 BESSY II 同步辐射产生的高光子通量 X 射线和 FLASH-EBIT 装置产生的 N^{3+} , Ar^{8+} 等离子, 研究了其光电离过程, 从而将共振光谱学扩展到软 X 射线波段, 为理论模型检验提供了高分辨高精度的实验数据. 2013 年, Rudolph 等^[31] 利用德国汉堡 DESY 同步光源的 PETRA III 所产生的光子能量约 6.6 keV 的单色 X 射线测量了从类氦到类氟铁离子 (Fe^{24+} 到 Fe^{17+}) 的 $K\alpha$ 跃迁的光吸收, 并计算了它们的跃迁几率和跃迁能量. 2014 年, Schippers 等^[32] 将光子-离子共线束应用于 PETRA III 的新光子-离子光谱仪, 测量了 Xe^{q+} ($q = 1-5$) 离子的多光子电离, 以及 Ne^+ 的单光子、双光子和三光子电离^[33], W^{4+} 的单光子电离^[34], Fe^+ 单光子 m 次光电离 ($m = 1, 2, \dots, 6$) 的绝对截面^[35]. 尽管利用同步辐射可以实现对 HCI 共振激发光谱的研究, 然而同步辐射装置无法获得飞秒量级的脉冲宽度, 不能开展高时间分辨光谱测量.

自由电子激光能产生极紫外甚至 X 射线波段

的相干光, 其脉冲宽度可短至 fs 量级, 峰值功率高, 能在获得高单色性的同时保持较高的峰值功率. 位于德国 DESY 的 FLASH 是国际上第一台工作在 XUV、软 X 射线波段的自由电子激光器, 其光子能量可以覆盖原子序数 $Z = 15$ (所需激发光子能量约为 20 eV) 到 $Z = 75$ (所需激发光子能量约为 200 eV) 的类锂离子 $2^2\text{S}_{1/2}-2^2\text{P}_{1/2}$ 跃迁光谱测量实验^[2], 结合为软 X 射线波段光谱研究设计的 EBIT, 可开展 XUV 波段的 HCI 离子的共振荧光激光光谱实验. FLASH 以及 XFEL 自由电子激光能提供几 eV 至几十 keV 的光子, 可研究周期表中大部分元素类锂离子的 $2^2\text{S}_{1/2}-2^2\text{P}_{1/2}$ 跃迁 (图 1)^[36]. 2007 年, Epp 等^[36] 将自由电子激光 FLASH 和 EBIT 结合, 首次利用自由电子激光测量了类锂 Fe^{23+} 离子的共振荧光光谱, 研究了 HCI 离子兰姆位移密切相关的 $1s^2s\ 2^2\text{S}_{1/2}$ 态到 $1s^2p\ 2^2\text{P}_{1/2}$ 态的跃迁 (48.6 eV). 然而受限于光源技术, 目前对于 X 射线波段内得到的能级跃迁精度比可见光范围内 HCI 的精细和超精细跃迁仍要相差几个量级.

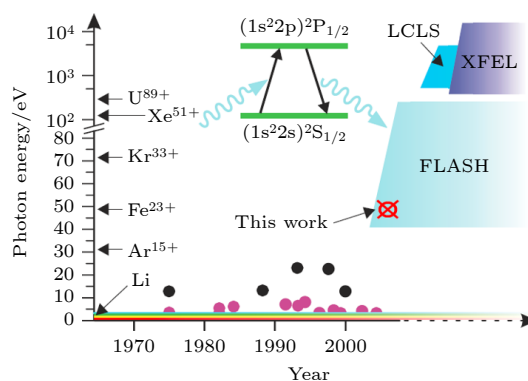


图 1 FLASH 和 XFEL 光子能量范围与可研究的 $2^2\text{S}_{1/2}-2^2\text{P}_{1/2}$ 跃迁离子种类^[36]

Fig. 1. Photon energy range covered by FLASH and XFEL and transition energy $2^2\text{S}_{1/2}-2^2\text{P}_{1/2}$ for some systems^[36].

飞秒激光驱动产生的高次谐波 (HHG) 作为一种台面式低成本的极紫外相干光源, 其所产生的光子能量最高已达 keV^[37]. 2015 年, Rothhardt 等^[38] 提出了将高功率飞秒 HHG 光源与 GSI 重离子束冷却储存环结合进行类锂银离子 XUV 波段激光光谱学研究. 如图 2(a) 所示, 他们采用重频为 MHz 的高功率飞秒光纤激光器驱动气体靶在 40 nm (光子能量约 30 eV) 处产生的单个谐波通量可以达到 10^{13} 光子/s, 其辐射通量已达到与同步辐射相当的水平, 并且共振增强腔 HHG 可以产生光子能

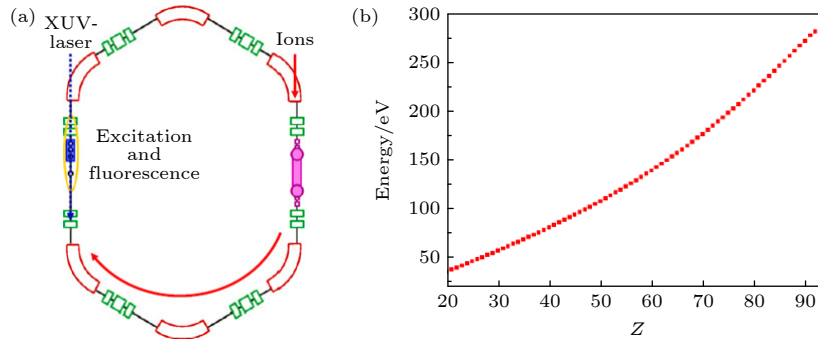


图 2 (a) 德国储存环 ESR 上开展 XUV 波段激光光谱的实验装置示意图; (b) 类锂离子 $^2S_{1/2}-^2P_{1/2}$ 跃迁能级间隔与 Z 的关系图^[38]

Fig. 2. (a) Schematic of an XUV laser spectroscopy experiment at the storage ring ESR in Germany; (b) $^2S_{1/2}-^2P_{1/2}$ transition energies for Li-like ions plotted as a function of the nuclear charge Z ^[38].

量带宽减小到 $\Delta E/E$ 约为 3×10^{-3} 的窄带谐波, 从而有望在重离子冷却储存环上开展相对论能量的 $Z = 47$ 的类锂离子的 $^2S_{1/2}-^2P_{1/2}$ 跃迁 (跃迁能量约 100 eV) 光谱测量, 这为 QED 效应和核修正检验提供了高灵敏度的检测方法, 他们通过计算估计实验测量的荧光计数率可达到每秒几十个. 利用高功率飞秒激光振荡器通过共振增强腔产生的 HHG 光子能量较低, 通常在 5—25 eV, 只能测量 $Z = 18$ 以下的 HCI 的 $^2S_{1/2}-^2P_{1/2}$ 的跃迁能级以及 QED 效应随 Z 序数的变化规律. 利用飞秒放大器驱动的桌面式 HHG 系统的光子能量可达 20—200 eV, 光子通量可达 10^{13} 光子/s, 可以开展更宽范围的 HCI 光谱测量, 但其产生的光源单色性较差, 因此仍需研究如何将 HHG 所产生的 XUV 光的线宽 ($\Delta\lambda/\lambda$) 压缩至 10^{-4} 以下, 以提高 HCI 能级跃迁的测量精度^[39].

3 HCI 离子阿秒激光光谱测量分析

飞秒激光驱动 HHG 的极紫外辐射具有飞秒甚至阿秒级的超快时间特性, 且 HHG 与驱动激光天然同步, 可开展最短至阿秒级时间分辨的光谱实验. 特别是台面式极紫外 HHG 光源已经较为成熟, 许多实验室已利用台面式极紫外 HHG 开展光谱实验^[40]. 对于 HCI 离子短波长的跃迁, 激发截面非常小, 而光源光子通量、辐射收集效率以及实验室可制备的 HCI 密度等仍然比原子激光光谱测量等弱几个数量级. 因此, 要实现对 HCI 离子高激发态能级以及截面更小的跃迁的测量, 需要高通量、高重频的阿秒光源, 或者是能够产生高电荷态、高流强的离子靶, 同时还需要发展高灵敏的探测方法.

欧洲以及中国等也都在建设阿秒大科学装置, 这些阿秒大科学装置可以提供更高光子通量和光子能量的光源, 进而开展极紫外波段, 飞秒乃至阿秒时间分辨的 HCI 离子能级结构、能级寿命测量实验. 国际上已建成的大型离子束装置有德国重离子研究中心 GSI 的 ESR、中国科学院近代物理研究所的 CSR 等, 以及德国正在建设的 FAIR 项目和中国正在建设的 HIAF 项目等. 由于阿秒光源与离子束装置的建设与运行维护等需要完全不同的技术, 目前国际上尚没有同时具备阿秒光源大科学装置与重离子加速器等两大科学装置的实验室. 为实现对 HCI 离子的阿秒激光光谱测量, 可以根据待测体系的特点以及各类不同光源、离子束装置的特点, 分别在阿秒大科学装置上建设 HCI 光谱测量终端以及在重离子加速器冷却储存环上增加台面式极紫外阿秒光源的 HCI 离子激光光谱测量平台. 本节将分别从光源、离子靶以及测量方法等方面讨论 HCI 离子阿秒时间分辨激光光谱测量可能的方案与可行性.

3.1 极紫外阿秒光源

自 2001 年首次获得阿秒脉冲以来^[41], 实验室产生阿秒光源的主要方式仍是利用飞秒激光驱动气体靶产生极紫外高次谐波. 2017 年, 瑞士苏黎世联邦工业大学 (ETH) 使用台面式 Ti:Sa 飞秒激光经过光参量放大 (OPA), 产生了 1.8 μm 红外驱动激光, 经空芯光纤压缩后, 脉宽为 11.5 fs, 脉冲能量为 480 μJ . 再利用该飞秒激光驱动氖或氩气体, 产生了最短脉宽为 43 as 的孤立脉冲, 最高光子能量达到 180 eV, 带宽近 100 eV^[42]. 此外, 他们还利用单脉冲能量 2.5 mJ 的钛宝石飞秒激光驱动高压

氛气, 已经产生了 100—350 eV 的软 X 射线超连续谱, 利用这一超宽带软 X 射线光源可以对碳的 K 壳层吸收边和硫的所有 L 壳层吸收边进行瞬态吸收光谱测量^[40]. 同年, Müller 等^[34]使用光参量啁啾脉冲放大器 (OPCPA) 产生了载波包络相位 (CEP) 稳定的 1.8 μm 飞秒驱动激光脉冲, 脉宽为 12 fs, 重复频率为 1 kHz. 他们利用该中红外飞秒激光驱动氛气, 获得了脉宽为 53 as, 100—330 eV 的超带宽极紫外阿秒光脉冲, 并将其应用于碳 K 壳层吸收光谱的研究. 随着全固态飞秒激光技术的发展, 具有 MHz 重频的高功率、窄脉宽全固态飞秒激光也已经成为实验室产生 HHG 的重要驱动光源, 利用其产生的 HHG 光子通量已可以达到 3×10^{13} 光子/s^[43], 能够满足 HCI 离子光谱测量需求. 除此之外, 德国耶拿大学利用高重频高功率光纤飞秒激光器为在重离子加速器上开展 XUV 波段激光光谱实验研制光源. 光纤飞秒激光器产生的 1 μm 波段激光经倍频和脉宽压缩后驱动气体靶, 在光子能量为 26.5 eV 的单谐波线上获得了功率为 (12.9 ± 3.9) mW 的极紫外光脉冲, 对应的光子通量为 3×10^{15} 光子/s, 在 30 eV 以上的光子能量下平均功率也已大于 1 mW^[44].

国际上正在建设多个可提供高通量、高光子能量阿秒脉冲的阿秒大科学装置, 包括欧洲极端光基础设施阿秒脉冲光源 (ELI-ALPS)、北京怀柔综合极端条件实验室以及正在筹建的先进阿秒光源等. ELI-ALPS 设计有 5 条光束线, 其中 4 条光束线利用气体靶产生高次谐波 (GHHG), 一条束线通过表面等离子体相干尾流发射产生的新型表面高次

谐波 (SHHG). ELI-ALPS 在平均功率、脉冲持续时间和重复频率等方面比台式的极紫外阿秒光源等有很大提高, 其能够提供的最高光子能量为 120 eV, 最大光子通量为 1.25×10^{12} 光子/s, 最短脉冲小于 500 as^[45]. 北京怀柔的综合极端条件实验装置 (SECUF) 中也包含了阿秒激光源 (ALS), 共有 4 条 XUV 光束线. 第 1 束线是一个中心光子能量约为 90 eV 的高能亚 100 as 束线, 重复频率为 1 kHz; 第 2 束线由 200 kHz—1 MHz 的高功率飞秒光纤激光器驱动, 具有高的重复频率以及窄的 XUV 带宽; 第 3 束线是由 CEP 稳定的亚 10 fs 钛蓝宝石激光脉冲驱动的单阿秒宽频 XUV 波束线, 重复频率为 10 kHz; 第 4 束线由 CEP 稳定的亚 10 fs OPCPA 激光脉冲驱动, 可以产生具有更高重复频率的宽带孤立阿秒脉冲, 重复频率达到了 100 kHz. 表 1 给出了 ALS (SECUF) 与 ELI-ALPS, RAL, seeded FEL 和 SASE FEL 等国际同类装置主要指标的对比. 这些光源都为实验室开展 HCI 高精度能级寿命测量以及高激发态能级测量等提供了非常好的光源条件.

3.2 HCI 离子靶

开展 HCI 离子精密光谱实验测量的另一个难题在于 HCI 靶的制备. 目前实验室产生 HCI 离子的主要方法有 EBIT、ECR 离子源和重离子加速器冷却储存环等.

3.2.1 电子束离子阱

EBIT 是一种结构紧凑、成本相对较低, 可以

表 1 ALS (SECUF) 与 HHG, seeded FEL 和 SASE FEL 等 XUV 光源的主要参数比较
Table 1. Comparison of ALS (SECUF) and other XUV light sources based on HHG, seeded FEL, and SASE FEL.

光源	产生方式	脉宽	光子通量/(光子·s ⁻¹)	调谐范围/eV	重复频率
ELI-ALPS	HHG	<100 as	1.25×10^{12}	10—120	1—100 kHz
ALS (SECUF) Beamline 1	HHG	<100 as	$\sim 10^9$ — 10^{10}	30—100	1—3 kHz
ALS (SECUF) Beamline 2	HHG	<200 fs	10^{11}	20—80	1 MHz
ALS (SECUF) Beamline 3	HHG	<200 as	10^{10}	50—100	10 kHz
ALS (SECUF) Beamline 4	HHG	<200 as	10^{11}	60—96	100 kHz
Artemis (RAL)	HHG	10—50 fs (APT)	1.8×10^{10} @30 eV	10—100	1 kHz
LCLS (SLAC)	SASE FEL	10—1000 fs	10^{14}	500—800	120 Hz
Dreamline (SSRF)	SASE FEL	—	3.5×10^{11} @800 eV	20—2000	2 Hz
FLASH (DESY)	SASE FEL	50—200 fs	10^{12} — 10^{14}	24—310	10 Hz
FERMI (Elettra ST)	seeded FEL	150 fs	3.7×10^{13}	15.5—62.0	10 Hz
DCLS (Dalian)	seeded FEL	30/130/1000 fs	$> 2.5 \times 10^{13}$	8.3—25	—

产生和约束 HCl 的装置, 可以剥离原子中大部分电子使其成为 HCl 离子. 一个桌面级的 EBIT 甚至可以完全剥离最重的 U 原子的电子, 是研究低密度天体等离子体辐射的理想装置. EBIT 还可以将注入的低价离子逐渐剥离到高电荷态, 从而可以系统地研究各个价态离子的光谱. 目前, 利用 EBIT 在 HCl 离子的发射光谱测量方面已开展了大量工作, 包括跃迁光子的发射和吸收, 以及离子能级结构等 [12,46–49]. 国际上已有 DREEBIT 等公司可以提供商用 EBIT 装置 [50,51], 国内复旦大学等也根据光谱测量等实验需求自主研制了各类不同参数的 EBIT [52,53]. 为了研制超精密光学原子钟和寻找精细结构常数的变化, 2019 年, 中国科学院武汉物理与数学研究所和复旦大学合作研制了一台低能量、紧凑型的 Shanghai-Wuhan EBIT 作为 HCl 源, 能够产生 W^{14+} , Ar^{13+} 等光学离子钟所需的备选离子并测量了其发射光谱, 为开展光钟离子能级精密测量提供了有力工具 [54–57]. 由于 EBIT 束流较弱, 激光激发所得到的退激发光计数率低, 测量难度较大, 目前只有德国在 FLASH 上利用 EBIT 开展了 HCl 离子的激光光谱实验测量 [36].

3.2.2 ECR 离子源

ECR 离子源是利用 ECR 产生高能电子, 高能电子与中性原子碰撞产生 HCl 离子, 再利用高压将 HCl 离子束引出磁约束腔体获得 HCl 束流的装置, 其产生的 HCl 离子流强可达 μA 甚至 mA [58,59]. 欧洲核子研究中心 (CERN) 的重离子注入 ECR 源可以产生超过 $100 \mu A$ 的 Pb^{27+} 束流. 中国科学院近代物理研究所研制的 ECR 离子源产生的 O^{7+} 束流强度达到了 $235 \mu A$, Ar^{11+} 束流强度达到了 $240 \mu A$, Xe^{26+} 的束流强度也超过了 $90 \mu A$ [60]. 丹麦奥胡斯大学就是利用 ASTRID 同步辐射光和 ECR 离子源结合, 开展了类铍的 N^{3+} , O^{4+} 等离子以及分子离子的实验测量 [29]. 近年来随着超导技术的发展, 超导 ECR 离子源得到快速发展. 美国劳伦斯伯克利国家实验室的 VENUS 离子源 [61] 以及中国科学院近代物理研究所的 SECRAL 离子源 [62] 相继建成, 并已为加速器提供束流. 其中, 中国的 SECRAL 能够产生的 Ar^{12+} 的束流强度达到了 $1420 \mu A$, Xe^{26+} 的束流强度超过 $1100 \mu A$, Xe^{30+} 的束流强度为 $322 \mu A$, $^{209}Bi^{31+}$ 的束流强度为 $680 \mu A$, $^{209}Bi^{50+}$ 的束流强度为 $10 \mu A$ [63]. 可以看

出, 超导 ECR 源能够提供的束流强度和高电荷态较常规 ECR 源均有大幅提高, 非常有利于开展光激发截面小的 HCl 离子激光光谱测量.

3.2.3 重离子加速器冷却储存环

重离子加速器冷却储存环可以通过加速剥离的方式进一步提高前端离子源产生的 HCl 的电荷态, 从而获得高流强 HCl 离子束 [64]. 重离子加速器提供的离子束通常具有很高的能量, 例如在德国 ESR 以及兰州重离子加速器冷却器储存环 CSR_e 上, 离子速度均可达相对论能量. 根据多普勒效应, 这极大降低了探测 HCl 光谱时对激发激光光子能量的要求 [65–69]. 国际上利用加速器冷却储存环已开展了多种离子的激光光谱学研究. 早在 1990 年, Schröder 等 [70] 在德国 TSR 冷却储存环上利用 514.5 nm 的 Ar^{+} 离子激光器和 584.8 nm 的环形染料激光器双向冷却的方式首次实现能量为 13.3 MeV/u 的 $^7Li^{+}$ 离子束的纵向冷却, 冷却温度达到了 3 K , 实验通过测量退激发光的方式精密测量了类氢 $^7Li^{+}$ 的 $2s \rightarrow 3s_1(F=5/2) \rightarrow 2p \rightarrow 3p_2(F=7/2)$ 跃迁的波长 [71,72]. 2006 年, Schramm 等 [73] 利用 257 nm 的连续激光在德国 ESR 上首次开展了对相对论能量的 C^{3+} 离子束的激光冷却和激光精密谱学实验研究. 此后, 在该装置上利用可见光波段激光也实现了对类氢 $^{207}Pb^{81+}(F=0 \leftrightarrow F=1)$, $^{209}Bi^{82+}(F=4 \leftrightarrow F=5)$ 和类锂 $^{209}Bi^{80+}(F=1 \leftrightarrow F=2)$ 等离子体的 HFS 和寿命的精密测量 [24,74]. 2018 年, 中国科学院近代物理研究所与西安电子科技大学共同在 CSR_e 装置上使用 220 nm 的紫外激光, 实现了能量为 275.7 MeV/u 的类锂 $^{16}O^{5+}$ 离子束的激光冷却 [68,69], 并开展了 $^{16}O^{5+}$ 离子 $2s_{1/2}-2p_{1/2}$ 精密激光光谱学的初步测量. 目前, 国际上还在建设更高能量和流强的重离子加速器冷却储存环, 德国 GSI 在建的 FAIR 项目中, 两个同步加速器 SIS-100 和 SIS-300 预期可以将重离子束加速到几十 GeV/u [75,76]. 中国科学院近代物理研究所在广东惠州在建的强流重离子加速器装置 HIAF, 将超导直线加速器与高能同步加速器结合, 产生的离子束最高能量可达 GeV/u 量级 [77–79]. 这些新建的高能强流加速器上, 利用相对论多普勒频移效应, 结合台面式 XUV 光源未来能够将可测量的 HCl 能级跃迁从百 eV 量级推进至 keV 量级, 并能够测量更低激发截面的跃迁.

3.3 探测方法

3.3.1 荧光检测

激光泵浦-探测技术是高精度测量短寿命能级的方法,已广泛应用于中性原子能级寿命的测量^[16,20].其基本原理是通过调谐泵浦脉冲激光的波长与目标粒子能级共振,将粒子布居到待测激发态能级,并同步监测荧光信号,得到荧光最强时对应的激光波长获得跃迁能级精确信息.然后利用另一束探测激光经一定时间延迟后,以共振或非共振激发的方式将处于激发态的粒子进一步激发到另一个激发态或将目标粒子电离,通过同步监测高激发态的退激荧光光强或电离粒子产额随两束激光延迟间隔的演化得到目标激发态的能级寿命(图3).这种泵浦-探测实验对能级寿命测量的绝对精度,仅受到统计数据以及泵浦和探测激光脉冲脉宽的限制,可以为理论模型检验提供高精度的实验数据. HCI 离子的能级及其寿命等也可以通过激光泵浦-探测的方法进行精密测量.利用两个飞秒激光脉冲来分别激发和探测激发态的布居数,可以获得更短寿命的激发态粒子数随时间的演化规律.目前,利用激光光谱的方法进行 HCI 离子的超短能级寿命的高精度测量非常有限,只有极少数的实验中通过将飞秒级自由电子激光与 EBIT 结合.采用 XUV 波段泵浦-探测技术可以实现对更多 HCI 离子能级寿命的高精度测量.2015 年,德国马克斯·普朗克核物理研究所提出了利用 PETRA III 同步辐射产生的高通量单色 X 射线共振激发 FLASH-EBIT 产生的高荷电 Fe^{23+} ,实验装置如图4所示.在 EBIT 的轴向上利用一个沿离子束方向的漂移管产生的静电

势将离子囚禁在阱中.在 EBIT 侧壁 3 个不同角度还安装有高纯锗探测器,用于探测离子退激荧光.他们通过荧光探测,对铁的 K 壳空穴的辐射和俄歇过程进行研究^[80].中国科学院近代物理研究所在 CSRe 上已经加装了适用于前向发射极紫外荧光收集的光子探测系统,可在未来的 HCI 离子激光光谱研究中通过荧光探测进行离子能级信息的测量^[81].

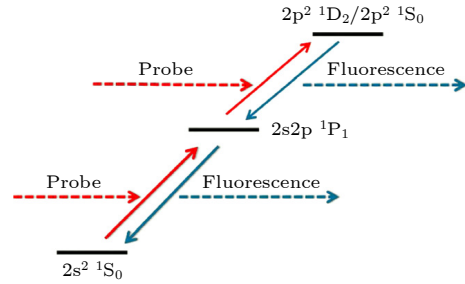


图3 类铍 C 离子 $1s^2 2snp \ ^1P_1$ ($n = 2-5$) 能级寿命的荧光测量方法示意图^[16]

Fig. 3. Schematic diagram of lifetime measurement for the $1s^2 2snp \ ^1P_1$ ($n = 2-5$) states in Be-like carbon ion by fluorescence method^[16].

3.3.2 离子探测

利用荧光光谱测量与质谱测量结合的方式可以大幅提高探测灵敏度,这种测量方式在原子短寿命能级高精度测量中已有应用.2014 年,Träbert 等^[5]提出利用泵浦-探测电离产物的方案测量 Fe^{16+} 离子能级寿命,其实实验原理如图5所示, LCLS 上测量 EBIT 中 HCI 离子能级,离子被 X 射线泵浦光共振激发到待测能级后,第 2 束探测光脉冲进一步电离被激发的离子,产生 Fe^{17+} 离子并被引出离子

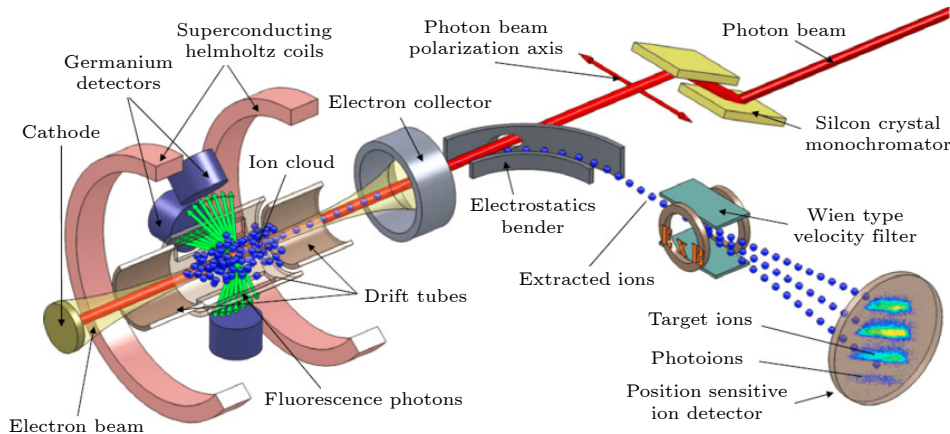


图4 在 FLASH-EBIT 上开展 HCI 光谱测量的实验装置示意图^[80]

Fig. 4. Schematic diagram of the experimental setup for HCI spectral measurement on FLASH-EBIT^[80].

阱, 通过测量不同荷质比离子的计数, 同步测量 Fe^{17+} 计数与激光脉冲延迟时间的曲线, 即可得到 Fe^{16+} 激发能级布居演化, 进而得到其能级寿命的衰减曲线. 在 PETRA III 同步辐射上的 HCI 光谱测量实验装置中 (图 4), 通过降低收集极板的电势可以将离子从阱内引出, EBIT 外安装有一个 90° 的静电能量速度选择器, 可以将不同荷质比的离子在空间上分开, 并被位置灵敏离子探测器记录, 从而实现光电离产物的高灵敏测量 [81].

由于离子靶的密度很低, 与气体靶中中性原子或分子的数量密度相比, 要小 10 个数量级, 要获得有效的荧光或者离子计数需要非常高的光子通量. 利用光子-离子共线束技术可以获得更大的光子-离子相互作用距离, 从而提高激发电离产物. Bizau 等 [29] 采用离子束与光束共线的方式在 ASTRID 储存环产生的同步辐射上开展了 HCI 离子光谱研究, 其实验装置如图 6 所示, 由 ECR 离子源产生的电荷态为 q 的离子经离子束线传输后与同步辐射光在 50 cm 长的距离上共线作用, 将

离子进一步电离至 $q+1$ 态, 再利用二极磁铁 M2 将同步辐射光电离产生的电荷态为 $q+1$ 的离子与目标离子进行空间分离, 再分别用粒子探测器和法拉第筒探测这两种离子的产额. 利用该方法, 他们实现了对类铍的 N^{3+} (光子能量范围 62—89 eV), O^{4+} (100—130 eV), 类硼的 N^{2+} (39—138 eV), O^{3+} (65—99 eV), F^{4+} (100—140 eV), 类碳的 F^{3+} (75—110 eV) 和 Ne^{4+} (110—170 eV) 的绝对光离截面的测量 [29].

3.3.3 阿秒吸收光谱测量

阿秒光脉冲可以提供超宽带的 XUV 光子, 已在原子内壳层电子结构研究方面开展了吸收光谱测量. 2018 年, Chew 等 [82] 利用光参量啁啾脉冲放大器产生 2 mJ 载波包络相位稳定的 $1.7 \mu\text{m}$ 飞秒驱动激光脉冲, 脉宽为 11 fs, 重复频率为 1 kHz. 如图 7 所示, 飞秒驱动激光被分成两束, 一束用于驱动气体靶产生极紫外阿秒脉冲, 另一束作为探测光在轮胎镜之后与阿秒脉冲共线传输作用在待测

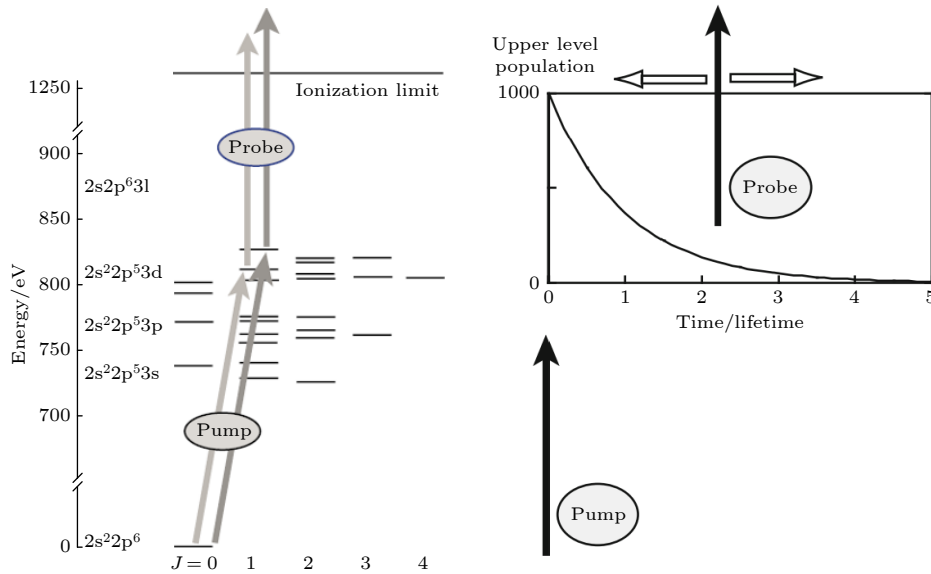


图 5 类 Ne 的 Fe^{16+} 离子泵浦-探测实验示意图 [6].

Fig. 5. Schematics of a pump-probe experiment on Ne-like iron ions (Fe^{16+}) [6].

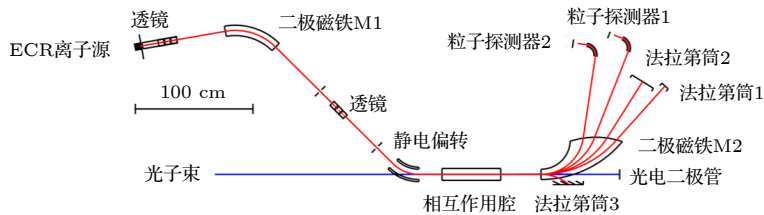
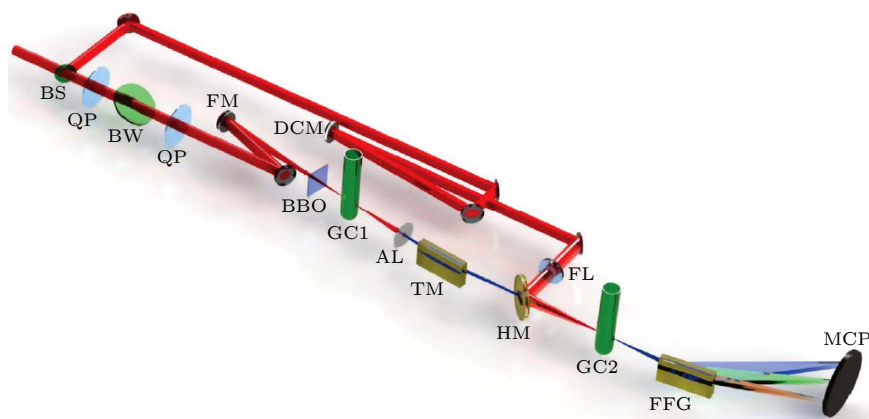


图 6 ASTRID 和 ECR 离子源结合装置示意图 [29].

Fig. 6. Schematic diagram of the ASTRID and ECR ion source combining device [29].

图 7 阿秒瞬态吸收实验装置示意图^[84]Fig. 7. Schematic diagram of experimental setup for attosecond transient absorption^[84].

分子气体靶上. 通过改变 HHG 与驱动激光之间的延迟时间可以进行阿秒瞬态吸收光谱测量. 利用该方法, 他们测量了氙的 $2p^{-1}L_{2,3}$ 吸收边 (~ 250 eV) 处的阿秒瞬态吸收光谱, 证明了俄歇衰变和遂穿电离在多电子原子内壳层空穴驱动演化中的共同作用. 2010 年, Wang 等^[83] 首次用阿秒瞬态吸收光谱结合泵浦-探测技术证明了 Ar 原子自电离过程的时间尺度小于 10 fs. 借鉴阿秒瞬态吸收谱测量技术对原子内壳层电子、分子结构的测量实验, 也可以将阿秒瞬态吸收光谱技术应用于 HCl 的跃迁能级及激发态寿命测量.

3.4 HCl 离子阿秒光谱测量方式

3.4.1 阿秒大科学装置上建设 EBIT 终端

FLASH-EBIT 的建成与实验研究为在阿秒光源等大型光源装置上开展 HCl 精密光谱测量提供了很好的参考. EBIT 系统相对简单、体积较小, 成本也较低, 可以方便地安装在阿秒光源等大科学装置上. 可以利用如图 8 所示的方法进行测量, 利用阿秒光束线将极紫外阿秒脉冲导入离子阱中心区域, 通过共振吸收激发 EBIT 中的 HCl 离子, 离子阱侧面装有多组 X 射线荧光探测器, 用于同步监测荧光计数, 从而获得饱和激发条件. 由于 EBIT 产生的靶密度较低, 为获得有效计数, 需要高通量光源, 以提高荧光或离子产额. 因此, 在阿秒光源大科学装置上开展 HCl 离子激光光谱测量, 可首先考虑采用高重频的阿秒光脉冲与离子能级共振激发的方式实现. 而高重频飞秒激光的单脉冲能量相对较低, 例如在重频为 1 MHz 的束线上, 所设计的 XUV 光子能量范围为 20—60 eV, 光谱线宽

小于 50 meV, 利用该光源可以测量类铍的 C 离子等低 Z 离子的激发态寿命. 而当阿秒光脉冲的脉冲能量达到 1 μ J 以上时, 就有望开展阿秒 XUV-泵浦 XUV-探测的激光光谱实验, 获得 HCl 离子能级的阿秒级高精度时间分辨光谱.

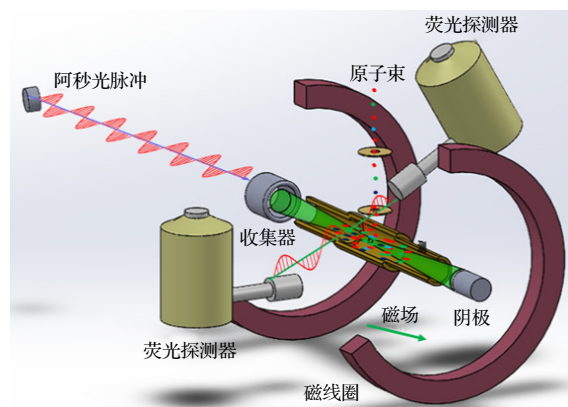
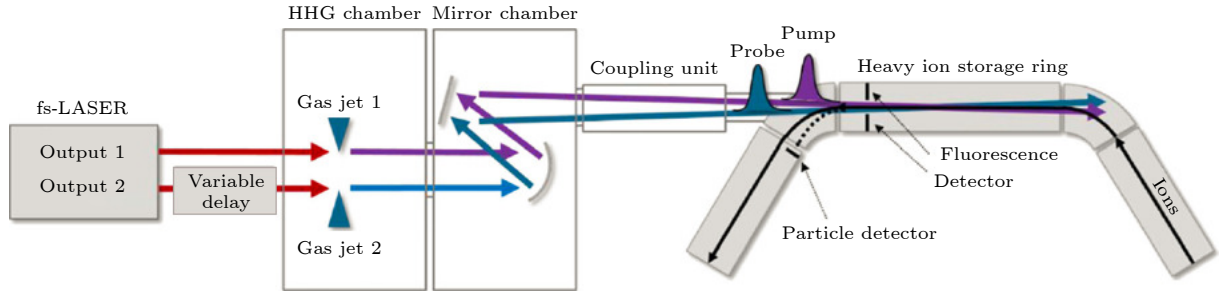


图 8 基于 EBIT 的 HCl 离子阿秒光谱测量装置示意图

Fig. 8. Schematic diagram of the experimental setup for attosecond spectroscopy of HCl on EBIT.

3.4.2 台式极紫外阿秒光源与重离子加速器冷却储存环结合

随着全固态高重频、高功率泵源技术发展, 未来易于获得台式高重频高通量阿秒脉冲, 由于这些 XUV 源体积紧凑、环境适应性好, 因此, 它们可以靠近储存环放置, 实现与 HIAF 等加速器冷却储存环的结合, 开展高 Z 的 HCl 离子能级测量. 尽管台式超快 XUV 光源的单脉冲能量有限, 但其重复频率最高可达 MHz, 且重离子束团以每秒数十万次频率在储存环中旋转, XUV 光束可以在加速器直线段与离子束长距离共线作用, 因此, 利用台

图 9 储存环上开展 HCI 离子 XUV-泵浦 XUV-探测的示意图^[16]Fig. 9. Schematic diagram of a XUV-pump XUV-probe experiment on HCI at storage rings^[16].

面式超快 XUV 光源与重离子加速器冷却储存环结合有望在短测量时间内获得非常高的信噪比和统计数据. 利用 XUV 泵浦-探测方法实验测量 HCI 离子超短寿命激发态测量的实验装置^[16], 如图 9 所示. 一台飞秒激光器经分光后获得两束高精度同步的飞秒激光脉冲, 利用光学延迟线高精度控制两个脉冲之间的时间延迟, 这两个飞秒脉冲随后聚在两个单独的气体喷嘴产生两束 XUV 波段 HHG. 两束 XUV 光合束后, 再与存储环中的 HCI 束共线作用, 对 HCI 离子进行激发和电离. 通过调整泵浦-探测脉冲之间的延迟时间并同步记录电离信号, 即可获得飞秒级精度的 HCI 能级寿命信息^[16]. 此外, 重离子加速器冷却储存环能够提供周期表中几乎所有稳定元素的离子束, 并将离子加速至相对论能量, 利用多普勒频移效应, 能够将可测量的 HCI 能级跃迁从台面式 XUV 光源自身可提供的百 eV 量级推进至离子坐标系中的 keV 量级, 从而实现更宽范围内离子能级的激光光谱测量.

综上所述, 我们初步设计了一个可以开展 HCI 离子阿秒光谱测量的实验装置, 如图 10 所示. 将离子源或加速器产生的离子束与阿秒光源产生的极紫外光束在直线束线段进行共线相互作用. 阿秒光源可通过泵浦光分光后分别驱动两个气体靶产生两束波长可独立控制的极紫外光源, 再经空间延迟后进入离子束共线作用区. 共线作用区侧方安装 X 射线探测器用于饱和激发荧光测量, 离子束经过共线作用区后进入偏转磁铁将电离产生的不同电荷态离子在空间分开, 并被位置灵敏探测器记录, 从而得到阿秒光电离后离子产额信息. 通过改变两束阿秒光驱动的延迟并同步测量退激荧光和离子产额计数等可以获得 HCI 离子能级及其寿命等信息. 对于极紫外波段 HCI 离子能级及寿命测量等, 目前仅有 FLASH 自由电子激光开展了相关

的工作. 尽管 FLASH 自由电子激光的脉冲能量可以达到 mJ 量级, 比阿秒光源的 μJ 高了 3 个量级, 但是典型脉冲宽度相差近 3 个量级. 因此, 两种光源典型峰值功率处于同等水平, 而阿秒光源的重复频率可以达到 MHz 量级, 比 FLASH 高 4 个量级, HCI 离子激光光谱测量的计数率也会比自由电子激光要大幅提高. 特别是, 阿秒光源的脉冲宽度可以达到 100 as 以内, 可以开展阿秒级的 HCI 离子能级寿命的精密测量. 利用阿秒光源的峰值功率、重复频率等典型参数对常见的 Fe^{23+} , Cu^{26+} , O^{5+} 等 HCI 离子的 XUV 激光激发谱进行估算. 根据已知的光激发截面、探测效率等估算, 当离子流强达到百 pA 量级、阿秒脉冲光强达到 100 nJ 以上等, 则每秒钟有望获得数十个荧光或光电离计数, 这对于光谱实验测量而言具有可行性. 因此, 未来利用阿秒光源开展 HCI 离子激光光谱测量具有可行性.

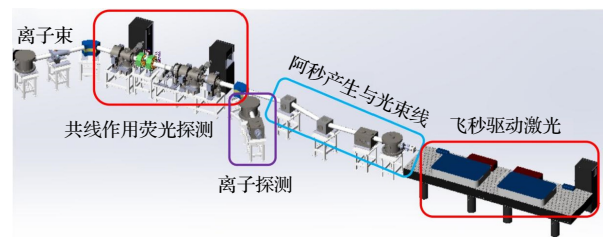


图 10 HCI 离子阿秒光谱测量装置示意图

Fig. 10. Schematic diagram of the setup for attosecond spectroscopy of HCI.

4 总结与展望

HCI 的光电离、光吸收等过程在天体物理等离子体中起着至关重要的作用, 在地面实验室进行 HCI 离子激光光谱测量对于天文观测提供高精度光谱数据库和建立天体演化模型等具有重要数据

支撑. 阿秒技术提供了一种极紫外甚至软 X 波段的超短脉冲, 为实验室开展 HCI 的光谱与超短能级寿命等提供了新的机遇. 本文总结了国际上利用同步辐射、自由电子激光等已开展的一些 HCI 离子光谱测量的实验方法、研究进展等, 简要介绍了国际上阿秒光源、离子靶等技术的发展现状. 目前将阿秒光源与 HCI 相结合进行离子能级及寿命测量的工作尚未有相关报道, 但通过与自由电子激光、同步辐射等光源上已有实验对比, 本文分析了将极紫外阿秒光源与 HCI 离子靶的技术结合开展 HCI 离子阿秒时间分辨精密光谱测量的可行性, 可以为离子能级结构计算、QED 理论高精度检验、天文光谱观测等研究提供新平台. 中国科学院近代物理研究所正在建设强流重离子加速器 (HIAF) 大科学装置等高能重离子储存环, 利用台面式极紫外阿秒激光束与离子束作用, 可利用多普勒效应开展最高可达 keV 范围的能级跃迁和超短能级寿命精密测量, 将极大地拓展 HCI 激光光谱研究范围.

参考文献

- [1] Beyer H F, Shevelko V P 2002 *Introduction to the Physics of Highly Charged Ions* (Boca Raton: CRC Press) pp1–2
- [2] Epp S W, López-Urrutia J R C, Simon M C, Baumann T, Brenner G, Ginzel R, Guerassimova N, Mäkel V, Mokler P H, Schmitt B L, Tawara H, Ullrich J 2010 *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* **43** 194008
- [3] Mackel V, Klawitter R, Brenner G, Crespo Lopez-Urrutia J R, Ullrich J 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 143002
- [4] Huang Z K, Wen W Q, Xu X, Mahmood S, Wang S X, Wang H B, Dou L J, Khan N, Badnell N R, Preval S P, Schippers S, Xu T H, Yang Y, Yao K, Xu W Q, Chuai X Y, Zhu X L, Zhao D M, Mao L J, Ma X M, Li J, Mao R S, Yuan Y J, Wu B, Sheng L N, Yang J C, Xu H S, Zhu L F, Ma X 2018 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **235** 2
- [5] Träbert E 2014 *Appl. Phys. B* **114** 167
- [6] Al Shorman M M, Gharaibeh M F, Bizau J M, Cubaynes D, Guilbaud S, Hassan N E, Miron C, Nicolas C, Robert E, Sakho I, Blancard C, McLaughlin B M 2013 *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* **46** 195701
- [7] Champeaux J P, Bizau J M, Cubaynes D, Blancard C, Nahar S, Hitz D, Bruneau J, Wuilleumier F J 2003 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **148** 583
- [8] Liang G Y, Li F, Wang F L, Wu Y, Zhong J Y, Zhao G 2014 *Astrophys. J.* **783** 124
- [9] Indelicato P 2019 *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* **52** 232001
- [10] Nörtershäuser W 2011 *Hyperfine Interact.* **199** 131
- [11] Yang L S, Church D A 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 3860
- [12] Träbert E 2002 *Phys. Scr.* **T100** 88
- [13] Träbert E 2005 *Phys. Scr.* **T120** 56
- [14] Karn R K, Mishra C N, Ahmad N, Safvan C P, Nandi T 2015 *J. Atomic, Molecular, Condensate & Nano Phys.* **2** 127
- [15] Saito M, Chikaoka A, Majima T, Imai M, Tsuchida H, Haruyama Y 2018 *Nucl. Instrum. Meth. B* **414** 68
- [16] Rothhardt J, Bilal M, Beerwerth R, Volotka A V, Hilbert V, Stöhlker T, Fritzsche S, Limpert J 2019 *X-Ray Spectrom.* **49** 165
- [17] Franzke B, Geissel H, Münzenberg G 2008 *Mass Spectrom. Rev.* **27** 428
- [18] Martinson I 1989 *Rep. Prog. Phys.* **52** 157
- [19] Beyer H F, Gassner T, Trassinelli M, Heß R, Spillmann U, Banaś D, Blumenhagen K H, Bosch F, Brandau C, Chen W, Dimopoulou C, Förster E, Grisenti R E, Gumberidze A, Hagmann S, Hillenbrand P M, Indelicato P, Jagodzinski P, Kämpfer T, Kozhuharov C, Lestinsky M, Liesen D, Litvinov Y A, Loetzsch R, Manil B, Märtin R, Nolden F, Petridis N, Sanjari M S, Schulze K S, Schwemlein M, Simionovici A, Steck M, Stöhlker T, Szabo C I, Trotsenko S, Uschmann I, Weber G, Wehrhan O, Winckler N, Winters D F A, Winters N, Ziegler E 2015 *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* **48** 144010
- [20] Patterson B M, Sell J F, Ehrenreich T, Gearba M A, Brooke G M, Scoville J, Knize R J 2015 *Phys. Rev. A* **91** 012506
- [21] Schippers S, Kilcoyne A L D, Phaneuf R A, Muller A 2016 *Contemp Phys* **57** 215
- [22] Hangst J S, Berg-Sørensen K, Jessen P S, Kristensen M, Molmer K, Nielsen J S, Poulsen O, Schiffer J P, Shi P 1992 *Nucl. Instrum. Meth. B* **68** 17
- [23] Kluft I I, Borneis S, Engel T, Fricke B, Grieser R, Huber G, Kuhl T, Marx D, Neumann R, Schroder S, Seelig P, Volker L 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 2425
- [24] Ullmann J, Andelkovic Z, Brandau C, Dax A, Geithner W, Geppert C, Gorges C, Hammen M, Hannen V, Kaufmann S, König K, Litvinov Y A, Lochmann M, Maaß B, Meisner J, Murböck T, Sánchez R, Schmidt M, Schmidt S, Steck M, Stöhlker T, Thompson R C, Trageser C, Vollbrecht J, Weinheimer C, Nörtershäuser W 2017 *Nat. Commun.* **8** 15484
- [25] Andjelkovic Z, Bharadia S, Sommer B, Vogel M, Nörtershäuser W 2010 *Hyperfine Interact.* **196** 81
- [26] Bundesanstalt P T <https://phys.org/news/2015-03-frozen-highly-ions-highest-precision.html> [2023-6-7]
- [27] Lyon I C, Peart B, West J B, Dolder K 1986 *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* **19** 4137
- [28] Covington A M, Aguilar A, Covington I R, Gharaibeh M F, Hinojosa G, Shirley C A, Phaneuf R A, Álvarez I, Cisneros C, Dominguez-Lopez I, Sant'Anna M M, Schlachter A S, McLaughlin B M, Dalgarno A 2002 *Phys. Rev. A* **66** 062710
- [29] Bizau J M, Champeaux J P, Cubaynes D, Wuilleumier F J, Folkmann F, Jacobsen T S, Penent F, Blancard C, Kjeldsen H 2005 *Astron. Astrophys.* **439** 387
- [30] Simon M C, Schwarz M, Epp S W, Beilmann C, Schmitt B L, Harman Z, Baumann T M, Mokler P H, Bernitt S, Ginzel R, Higgins S G, Keitel C H, Klawitter R, Kubiček K, Mäkel V, Ullrich J, López-Urrutia J R C 2010 *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* **43** 065003
- [31] Rudolph J K, Bernitt S, Epp S W, Steinbrugge R, Beilmann C, Brown G V, Eberle S, Graf A, Harman Z, Hell N, Leutenegger M, Muller A, Schlage K, Wille H C, Yavas H, Ullrich J, Crespo Lopez-Urrutia J R 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 103002
- [32] Schippers S, Ricz S, Buhr T, Borovik A, Hellhund J, Holste K, Huber K, Schäfer H J, Schury D, Klumpp S, Mertens K, Martins M, Flesch R, Ulrich G, Rühl E, Jahnke T, Lower J, Metz D, Schmidt L P H, Schöffler M, Williams J B, Glaser L, Scholz F, Seltmann J, Viehhaus J, Dorn A, Wolf A, Ullrich J, Müller A 2014 *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* **47** 115602
- [33] Müller A, Bernhardt D, Borovik A, Buhr T, Hellhund J, Holste K, Kilcoyne A L D, Klumpp S, Martins M, Ricz S,

- Seltmann J, Viehhaus J, Schippers S 2017 *Astrophys. J.* **836** 166
- [34] Müller A, Schippers S, Hellhund J, Kilcoyne A L D, Phaneuf R A, McLaughlin B M 2017 *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* **50** 085007
- [35] Schippers S, Martins M, Beerwerth R, Bari S, Holste K, Schubert K, Viehhaus J, Savin D W, Fritzsche S, Müller A 2017 *Astrophys. J.* **849** 5
- [36] Epp S W, Lopez-Urrutia J R, Brenner G, Mackel V, Mokler P H, Treusch R, Kuhlmann M, Yurkov M V, Feldhaus J, Schneider J R, Wellhofer M, Martins M, Wurth W, Ullrich J 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 183001
- [37] Stutzki F, Gaida C, Gebhardt M, Jansen F, Wienke A, Zeitner U, Fuchs F, Jauregui C, Wandt D, Kracht D, Limpert J, Tünnemann A 2014 *Opt. Lett.* **39** 4671
- [38] Rothhardt J, Hädrich S, Demmler S, Krebs M, Winters D F A, Kühl T, Stöhlker T, Limpert J, Tünnemann A 2015 *Phys. Scr.* **T166** 014030
- [39] Kühl T, Rothhardt J https://www.hi-jena.de/en/research_areas/photon_particle_spectroscopy/laser_generated_radiation/x_ray_laser_spectroscopy/ [2023-6-7]
- [40] Pertot Y, Schmidt C, Matthews M, Chauvet A, Huppert M, Svoboda V, von Conta A, Tehlar A, Baykusheva D, Wolf J P, Wörner H J 2017 *Science* **355** 264
- [41] Drescher M, Hentschel M, Kienberger R, Tempea G, Spielmann C, Reider G A, Corkum P B, Krausz F 2001 *Science* **291** 1923
- [42] Gaumnitz T, Jain A, Pertot Y, Huppert M, Jordan I, Ardana-Lamas F, Wörner H J 2017 *Opt. Express* **25** 27506
- [43] Teng H, He X K, Zhao K, Wei Z Y 2018 *Chin. Phys. B* **27** 074203
- [44] Klas R, Kirsche A, Gebhardt M, Buldt J, Stark H, Hädrich S, Rothhardt J, Limpert J 2021 *Photonix* **2** 4
- [45] Kühn S, Dumergue M, Kahaly S, Mondal S, Füle M, Csizmadia T, Farkas B, Major B, Várallyay Z, Cormier E, Kalashnikov M, Calegari F, Devetta M, Frassetto F, Månsson E, Poletto L, Stagira S, Vozzi C, Nisoli M, Rudawski P, MacIot S, Campi F, Wikmark H, Arnold C L, Heyl C M, Johnsson P, L' Huillier A, Lopez-Martens R, Haessler S, Bocoum M, Boehle F, Vernier A, Iaquaniello G, Skantzakis E, Papadakis N, Kalpouzos C, Tzallas P, Lépine F, Charalambidis D, Varjú K, Osvay K, Sansone G 2017 *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* **50** 132002
- [46] Meissl W, Simon M C, Crespo López-Urrutia J R, Tawara H, Ullrich J, Winter H P, Aumayr F 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 093303
- [47] Kozlov M G, Safronova M S, Crespo López-Urrutia J R, Schmidt P O 2018 *Rev. Mod. Phys.* **90** 045005
- [48] Bouza Z, Scheers J, Ryabtsev A, Schupp R, Behnke L, Shah C, Sheil J, Bayraktar M, López-Urrutia J R C, Ubachs W, Hoekstra R, Versolato O O 2020 *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* **53** 195001
- [49] Grilo F, Shah C, Kühn S, Steinbrügge R, Fujii K, Marques J, Feng Gu M, Paulo Santos J, Crespo López-Urrutia J R, Amaro P 2021 *Astrophys. J.* **913** 140
- [50] Karlušić M, Kozubek R, Lebius H, Ban-d'Etat B, Wilhelm R A, Buljan M, Siketić Z, Scholz F, Meisch T, Jakšić M, Bernstorff S, Schleberger M, Šantić B 2015 *J. Phys. D Appl. Phys.* **48** 325304
- [51] Schmidt M, Hass M, Zschornack G, Rappaport M L, Heber O, Prygarin A, Shachar Y, Vaintraub S 2015 *AIP Conf. Proc.* **1640** 149
- [52] Xiao J, Zhao R, Jin X, Tu B, Yang Y, Di L, Hutton R, Zou Y 2013 *IPAC 2013: Proceedings of the 4th International Particle Accelerator Conference* Shanghai, China, May 12–17, 2013 p434
- [53] Wang N X, Chen Y L, Yan H P, Jiang D K, Zhu X K, Guo P L, Wang F T, Ding L R, Shi J, Li W, Lu D, Zou Y M 2006 *Nucl. Sci. Tech.* **29** 169 (in Chinese) [王纳秀, 陈永林, 阎和平, 蒋迪奎, 朱希恺, 郭盘林, 王福堂, 丁立人, 施锦, 李炜, 路迪, 邹亚明 2006 *核技术* **29** 169]
- [54] Lu Q, Yan C L, Xu G Q, Fu N, Yang Y, Zou Y, Volotka A V, Xiao J, Nakamura N, Hutton R 2020 *Phys. Rev. A* **102** 042817
- [55] Liang S Y, Zhang T X, Guan H, Lu Q F, Xiao J, Chen S L, Huang Y, Zhang Y H, Li C B, Zou Y M, Li J G, Yan Z C, Derevianko A, Zhan M S, Shi T Y, Gao K L 2021 *Phys. Rev. A* **103** 022804
- [56] Liu X, Zhou X P, Wen W Q, Lu Q F, Yan C L, Xu G Q, Xiao J, Huang Z K, Wang H B, Chen D Y, Shao L, Yuan Y, Wang S X, Ma W L, Ma X W 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 033201 (in Chinese) [刘鑫, 周晓鹏, 汶伟强, 陆祺峰, 严成龙, 许幅芹, 肖君, 黄忠魁, 汪寒冰, 陈冬阳, 邵林, 袁洋, 汪书兴, 马万路, 马新文 2022 *物理学报* **71** 033201]
- [57] Liang S Y, Lu Q F, Wang X C, Yang Y, Yao K, Shen Y, Wei B, Xiao J, Chen S L, Zhou P P, Sun W, Zhang Y H, Huang Y, Guan H, Tong X, Li C B, Zou Y M, Shi T Y, Gao K L 2019 *Rev. Sci. Instrum.* **90** 093301
- [58] Zhao H W, Liu Z W, Zhang W, Zhang X Z, Yuan P, Guo X H, Zhang Z M, Wang Y F 2000 *At. Energy Sci. Technol.* **34** 282 (in Chinese) [赵红卫, 刘占稳, 张汶, 张雪珍, 袁平, 郭晓虹, 张子民, 王义芳 2000 *原子能科学技术* **34** 282]
- [59] Xia J W, Zhan W L, Wei B W, Yuan Y J, Zhao H W, Yang J C, Shi J, Sheng L N, Yang W Q, Mao L J 2016 *Chin. Sci. Bull.* **61** 11 (in Chinese) [夏佳文, 詹文龙, 魏宝文, 原有进, 赵红卫, 杨建成, 石健, 盛丽娜, 杨维青, 冒立军 2016 *科学通报* **61** 11]
- [60] Zhang Z M, Zhao H W, Zhang X Z, Guo X H, Li X X, Li J Y, Feng Y C, Wang H, Ma B H, Gao J Y, Cao Y, Sun L T, Ma L 2003 *Chin. Phys. C* **10** 914 (in Chinese) [张子民, 赵红卫, 张雪珍, 郭晓虹, 李锡禹, 李锦玉, 冯玉成, 王辉, 马保华, 高级元, 曹云, 孙良亭, 马雷 2003 *高等物理与核物理* **10** 914]
- [61] Leitner M A, Lyneis C M, Taylor C E, Abbott S R 2001 *Phys. Scr.* **T92** 171
- [62] Zhao H W, Sun L T, Zhang X Z, Zhang Z M, Guo X H, He W, Yuan P, Song M T, Li J Y, Feng Y C, Cao Y, Li X X, Zhan W L, Wei B W, Xie D Z 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 03A333
- [63] Zhao H W, Sun L T, Guo J W, Lu W, Xie D Z, Hitz D, Zhang X Z, Yang Y 2017 *Phys. Rev. Accel. Beams* **20** 094801
- [64] Steck M, Yuri A L 2020 *Prog. Part. Nucl. Phys.* **115** 103811
- [65] Tu X L, Chen X C, Zhang J T, Shuai P, Yue K, Xu X, Fu C Y, Zeng Q, Zhou X, Xing Y M, Wu J X, Mao R S, Mao L J, Fang K H, Sun Z Y, Wang M, Yang J C, Litvinov Y A, Blaum K, Zhang Y H, Yuan Y J, Ma X W, Zhou X H, Xu H S 2018 *Phys. Rev. C* **97** 014321
- [66] Wen W Q, Ma X, Bussmann M, Yuan Y J, Zhang D C, Winters D F A, Zhu X L, Li J, Liu H P, Zhao D M, Wang Z S, Mao R S, Zhao T C, Wu J X, Ma X M, Yan T L, Li G H, Yang X D, Liu Y, Yang J C, Xia J W, Xu H S 2014 *Nucl. Instrum. Meth. A* **736** 75
- [67] Wang H B, Wen W Q, Huang Z K, Zhang D C, Hai B, Bussmann M, Winters D, Zhao D M, Zhu X L, Li J, Li X N, Mao L J, Mao R S, Zhao T C, Yin D Y, Wu J X, Yang J C, Yuan Y J, Ma X 2018 *Nucl. Instrum. Meth. A* **908** 244
- [68] Wen W, Wang H, Huang Z, Zhang D, Chen D, Winters D,

- Klammes S, Kiefer D, Walther T, Litvinov S, Siebold M, Loeser M, Khan N, Zhao D, Zhu X, Li X, Li J, Zhao T, Mao R, Wu J, Yin D, Mao L, Yang J, Yuan Y, Bussmann M, Ma X 2019 *Hyperfine Interact.* **240** 45
- [69] Wang H, Wen W, Huang Z, Zhang D, Chen D, Zhao D, Zhu X, Winters D, Bussmann M, Ma X 2020 *X-Ray Spectrom.* **49** 138
- [70] Schröder S, Klein R, Boos N, Gerhard M, Grieser R, Huber G, Karafillidis A, Krieg M, Schmidt N, Kühl T, Neumann R, Balykin V, Grieser M, Habs D, Jaeschke E, Krämer D, Kristensen M, Music M, Petrich W, Schwalm D, Sigray P, Steck M, Wanner B, Wolf A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 2901
- [71] Reinhardt S, Saathoff G, Buhr H, Carlson L A, Wolf A, Schwalm D, Karpuk S, Novotny C, Huber G, Zimmermann M, Holzwarth R, Udem T, Hänsch T W, Gwinner G 2007 *Nat. Phys.* **3** 861
- [72] Saathoff G, Karpuk S, Eisenbarth U, Huber G, Krohn S, Horta R M, Reinhardt S, Schwalm D, Wolf A, Gwinner G 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 190403
- [73] Schramm U, Bussmann M, Habs D, Steck M, Kühl T, Beckerts K, Beller P, Franzke B, Nolden F, Saathoff G, Reinhardt S, Karpuk S 2006 *Hyperfine Interact.* **162** 181
- [74] Seelig P, Borneis S, Dax A, Engel T, Faber S, Gerlach M, Holbrow C, Huber G, Kühl T, Marx D, Meier K, Merz P, Quint W, Schmitt F, Tomaselli M, Völker L, Winter H, Würtz M, Beckert K, Franzke B, Nolden F, Reich H, Steck M, Winkler T 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4824
- [75] Stöhlker T, Litvinov Y A, Bräuning-Demian A, Lestinsky M, Herfurth F, Maier R, Prasuhn D, Schuch R, Steck M, for the S C 2014 *Hyperfine Interact.* **227** 45
- [76] Henning W F 2008 *Nucl. Phys. A* **805** 502C
- [77] Yang J C, Xia J W, Xiao G Q, Xu H S, Zhao H W, Zhou X H, Ma X W, He Y, Ma L Z, Gao D Q, Meng J, Xu Z, Mao R S, Zhang W, Wang Y Y, Sun L T, Yuan Y J, Yuan P, Zhan W L, Shi J, Chai W P, Yin D Y, Li P, Li J, Mao L J, Zhang J Q, Sheng L N 2013 *Nucl. Instrum. Meth. B* **317** 263
- [78] Yang J C, Zeng G, Xiao G Q, Peng L Q, Xia J W, Zhao H W, Xu H S, Zhou X H, Yuan Y J, Ma L Z, Gao D Q, Xu Z, Sun L T, Mao L J, He Y, Zhang J H, Hu Z G, Ma X W, Su Y W, Zhang W, Mao R S, Sheng L N, Shen G D, Wang S C 2020 *Chin. Sci. Bull.* **65** 8 (in Chinese) [杨建成, 曾钢, 肖国青, 彭良强, 夏佳文, 赵红卫, 徐珊珊, 周小红, 原有进, 马力祯, 高大庆, 许哲, 孙良亭, 冒立军, 何源, 张军辉, 胡正国, 马新文, 苏有武, 张玮, 毛瑞士, 蒙峻, 姚庆高, 盛丽娜, 申国栋, 王思成 2020 *科学通报* **65** 8]
- [79] Zhao H W, Xu H S, Xiao G Q, Xia J W, Yang J C, Zhou X H, Xu N, He Y, Ma X W, Yang L, Chen X R, Tang X D, Zhao Y T, Sun Z Y, Wang Z G, Hu Z G, Zhang J H, Ma L Z, Yuan Y J, Zhan W L 2020 *Sci. China Phys. Mech. Astron.* **50** 77 (in Chinese) [赵红卫, 徐珊珊, 肖国青, 夏佳文, 杨建成, 周小红, 许怒, 何源, 马新文, 杨磊, 陈旭荣, 唐晓东, 赵永涛, 孙志宇, 王志光, 胡正国, 张军辉, 马力祯, 原有进, 詹文龙 2020 *中国科学: 物理学 力学 天文学* **50** 77]
- [80] Steinbrügge R, Bernitt S, Epp S W, Rudolph J K, Beilmann C, Bekker H, Eberle S, Müller A, Versolato O O, Wille H C, Yavaş H, Ullrich J, Crespo López-Urrutia J R 2015 *Phys. Rev. A* **91** 032502
- [81] Chen D Y, Wang H B, Huang Z K, Zhao D M, Liu X, Zhou X P, Liu J L, Li C C, Yang J J, Zhang D C, Wen W Q, Ma X W 2022 *Nucl. Phys. Rev.* **39** 224 (in Chinese) [陈冬阳, 汪寒冰, 黄忠魁, 赵冬梅, 刘鑫, 周晓鹏, 刘建龙, 李长春, 杨金晶, 张大成, 汶伟强, 马新文 2022 *原子核物理评论* **39** 224]
- [82] Chew A, Douguet N, Cariker C, Li J, Lindroth E, Ren X, Yin Y, Argenti L, Hill W T, Chang Z 2018 *Phys. Rev. A* **97** 031407
- [83] Wang H, Chini M, Chen S, Zhang C H, He F, Cheng Y, Wu Y, Thumm U, Chang Z 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 143002
- [84] Wang X W, Chini M, Cheng Y, Wu Y, Chang Z H 2013 *Appl. Opt.* **52** 323

SPECIAL TOPIC—Attosecond physics

Prospect for attosecond laser spectra of highly charged ions^{*}Zhang Da-Cheng^{1)†} Ge Han-Xing¹⁾ Ba Yu-Lu¹⁾ Wen Wei-Qiang²⁾Zhang Yi¹⁾ Chen Dong-Yang²⁾ Wang Han-Bing²⁾ Ma Xin-Wen²⁾¹⁾ (*School of Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China*)²⁾ (*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

(Received 14 June 2023; revised manuscript received 8 August 2023)

Abstract

The spectra of highly charged ions (HCIs) are of great significance for astronomical observation, astrophysical model establishment, and test of quantum electrodynamics (QED) theory. However, the transitions of HCI are mostly in the extreme ultraviolet or even X-ray range, the excitation spectra of HCI measured by laser spectroscopy in laboratory are very limited due to lack of the suitable light source. Up to now, only few experiments on the spectra of HCIs performed on synchrotron radiation, free electron laser or heavy-ions storage ring have been reported, which are summarized in this work. With the development of attosecond technology, several attosecond light source facilities have been built, such as extreme light infrastructure attosecond light pulse source (ELI-ALPS) and synergetic extreme condition user facility (SECUF), which have high photon energy and ultra-short pulse duration in the extreme ultraviolet and even soft X-ray range, providing new opportunities for laboratory research on HCI spectra and ultra short energy level lifetimes. Electron beam ion trap (EBIT), electron cyclotron resonance (ECR), and heavy-ion storage ring are usually used to generate ion target. But it is difficult to combine the attosecond laser source with large scale facility of HCI, for none of laboratories has both these two facilities now. Thus, two possible experimental schemes for attosecond spectrum of HCIs are proposed in this work. One scheme is that an EBIT can be designed as a terminal of attosecond laser facility, such as ELI-ALPS and SECUF, which can output different laser beams with high photon energy, ultra-short pulse duration or high flux. Another scheme is that a table-top HHG system pumped by an all-solid-state femtosecond laser or fiber femtosecond laser with high power can be combined with heavy-ion storage ring, such as ESR, CSRe, HIAF, and FAIR. Owing to high energy of ions in storage ring, the measurable energy levels of HCIs can even be extended to keV by the Doppler shift. Three different measurement methods: fluorescence detection, ion detection and attosecond absorption spectroscopy, can be used to obtain the HCI spectrum. Finally, a preliminary experimental setup for attosecond laser spectrum of HCI is proposed. The proposal on combining extreme ultraviolet attosecond light source with HCI target is discussed, and the feasibility of attosecond time-resolved precision spectrum for HCI is analyzed according to the typical parameters of attosecond light source and the known excitation cross-section and detection efficiency, which can provide a new platform for implementing ion level structure calculation, QED theory high-precision test and astronomical spectroscopic observation. It can be used to measure the ultra-short lifetime, low excitation cross-section ionic energy level, and even some transitions with large energy interval. We hope that this work can provide a reference for the experimental measuring of HCI spectrum and ion energy level lifetime in future.

Keywords: attosecond pulse, highly charged ion, precision laser spectrum, energy level structure**PACS:** 32.80.Fb, 32.80.-t, 42.62.Fi, 32.30.Rj**DOI:** 10.7498/aps.72.20230986^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U2032136, U2241288).[†] Corresponding author. E-mail: dch.zhang@xidian.edu.cn



高电荷态离子阿秒激光光谱研究展望

张大成 葛韩星 巴雨璐 汶伟强 张怡 陈冬阳 汪寒冰 马新文

Prospect for attosecond laser spectra of highly charged ions

Zhang Da-Cheng Ge Han-Xing Ba Yu-Lu Wen Wei-Qiang Zhang Yi Chen Dong-Yang Wang Han-Bing Ma Xin-Wen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 193201 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230986

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230986>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用三色组合脉冲激光获得孤立阿秒脉冲发射

Isolated attosecond pulse generation from helium atom irradiated by a three-color laser pulse

物理学报. 2022, 71(5): 054204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211502>

低能高电荷态离子与Al表面作用产生的X射线

X-ray emission produced by interaction of slow highly charged ions with Al surfaces

物理学报. 2021, 70(19): 193201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210757>

Co,Zn共掺铌酸锂电子结构和吸收光谱的第一性原理研究

First-principle calculation of electronic structures and absorption spectra of lithium niobate crystals doped with Co and Zn ions

物理学报. 2018, 67(18): 184209 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180735>

基于正交偏振场的双光学控制方案获得孤立阿秒脉冲产生

Isolated attosecond pulse generation from a double optical gating scheme based on orthogonal polarization field

物理学报. 2019, 68(21): 214201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190847>

强激光等离子体相互作用驱动高次谐波与阿秒辐射研究进展

Research progress of high-order harmonics and attosecond radiation driven by interaction between intense lasers and plasma

物理学报. 2021, 70(8): 084206 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210339>

利用脉宽10 fs偏振控制脉冲获得孤立阿秒脉冲

Isolated attosecond pulse generation from polarization gating pulse with 10 fs duration

物理学报. 2019, 68(18): 184201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190392>