

专题: 少电子原子分子精密谱

高电荷态类硼离子 ${}^2P_{3/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}$ 跃迁的实验和理论研究进展*刘鑫¹⁾ 汶伟强²⁾ 李冀光³⁾ 魏宝仁¹⁾ 肖君^{1)†}

1) (复旦大学现代物理研究所, 核物理与离子束应用教育部重点实验室, 上海 200433)

2) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

3) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2024 年 8 月 27 日收到; 2024 年 9 月 9 日收到修改稿)

高电荷态离子 (highly charged ion, HCI) 的精细结构及辐射跃迁性质的精确测量不仅可以检验基本物理模型, 包括: 强场量子电动力学 (quantum electrodynamics, QED) 效应、电子关联效应、相对论效应、原子核效应等, 而且能够为天体物理和聚变等离子体物理提供关键原子物理参数. 相对于研究较多的类氢和类锂离子体系, 类硼离子的精细结构禁戒跃迁的相对论效应和 QED 效应的贡献很大, 高精度实验测量与理论计算为进一步检验多电子体系的基本物理模型提供了重要途径. 此外, 类硼离子也被认为是最佳的高电荷态离子光钟候选体系. 本文主要介绍了类硼离子基态 ${}^2P_{3/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}$ 跃迁的实验和理论研究最新进展, 概述了其精细结构和超精细结构的研究现状, 并讨论了使用电子束离子阱结合高分辨光谱学实验技术开展类硼离子超精细分裂实验测量的方案, 为未来开展类硼离子超精细分裂实验研究并在更高精度上检验 QED 效应, 提取原子核磁化分布半径, 检验相关的核结构模型等研究提供了参考.

关键词: 高电荷态离子, 超精细结构, 量子电动力学, 高电荷态离子光钟**PACS:** 31.15.aj, 32.10.Fn, 33.15.Pw, 31.30.J-**DOI:** 10.7498/aps.73.20241190**CSTR:** 32037.14.aps.73.20241190

1 引言

高电荷态离子 (highly charged ion, HCI), 又称高离化态离子, 是指原子被电离掉多个核外电子后处在高度带电状态的离子, 其广泛分布于各种天体和人造等离子体中^[1]. 与中性原子及低电荷态离子相比, 高电荷态离子随着原子序数 Z 以及离子电荷态的不断增高, 其核外电子所感受到的原子库仑场强不断增强, 离子能级结构中涉及的量子电动力学 (quantum electrodynamics, QED) 效应、相对论效应、超精细分裂以及原子核尺寸效应等会急

剧增大, 这些效应对离子能级结构产生的影响也会更明显^[2]. 其中 HCI 的精细结构和基态能级超精细分裂 (hyperfine splitting, HFS) 的精密测量为精确检验 QED 效应和研究原子核性质提供了一种绝佳的实验研究检验手段^[3].

类硼离子结构如图 1 所示, 其 $1s^2 2s^2 2p \ {}^2P_{1/2}$ 和 ${}^2P_{3/2}$ 能级在非相对论框架内是简并的, 能级分裂的大小主要由相对论效应和 QED 效应决定. 因此, 对 $1s^2 2s^2 2p \ {}^2P_{3/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}$ 跃迁的波长和跃迁速率的精确测量, 可以对电子关联效应、相对论效应和 QED 效应等开展高精度的检验. 此外, 在类硼离子的等电子序列中, 其磁偶极跃迁在天体物理和实验室人

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFA1602504) 和国家自然科学基金 (批准号: 12374228, 12393824, 12474250) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xiao_jun@fudan.edu.cn

造等离子体的温度、密度和丰度诊断应用中具有非常重要的意义^[4-9]. 这些跃迁线的强度对等离子体的电子密度、温度和电荷状态非常敏感, 尤其是类硼离子 $1s^2 2s^2 2p \ ^2P_{3/2} \rightarrow \ ^2P_{1/2}$ 间的磁偶极跃迁是许多日冕线的起源, 因此研究天文观测相关的类硼离子的谱线有助于分析日冕、行星状星云^[10] 和太阳耀斑^[11]. 除此之外, 部分中 Z 类硼离子的基态禁戒跃迁位于光学波段且 $^2P_{3/2}$ 能级的寿命为毫秒量级, 使其不仅具有非常窄的跃迁线宽, 还对外部磁场、黑体辐射和斯塔克效应等引起的扰动不敏感. 因此, 基于类硼离子的基态精细结构跃迁的 HCI 光钟有望在实验精度上突破目前最先进的光晶格和单电荷态离子光钟^[12], 还对检验精细结构常数 α 随时空的变化以及洛伦兹局域不变性等尤为敏感, 为探索标准模型之外的新物理提供可能^[4,13,14].

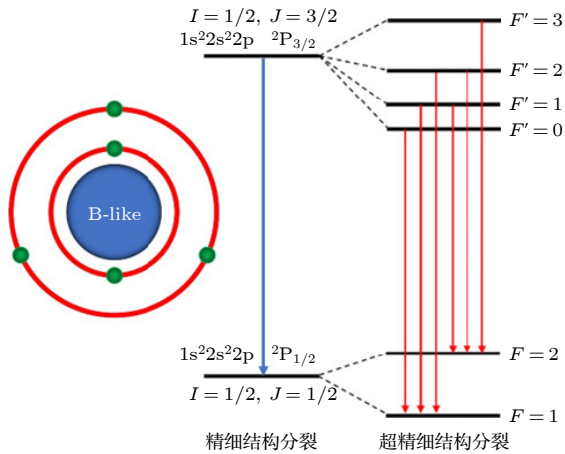


图 1 类硼离子结构示意图 (以核自旋为 $1/2$ 的类硼离子为例)

Fig. 1. Schematic structure of boron like ions (Take the example of a boron like ion with a nuclear spin of $1/2$).

目前, 国际上开展高电荷态离子精密光谱实验研究主要基于电子束离子阱 (electron beam ion trap, EBIT) 和重离子储存环 (heavy-ions storage ring) 两类装置. 类硼离子精细结构的实验研究从天文观测开始^[15], 然后在实验室开展发射光谱测量^[16-18], 再发展到利用激光结合 EBIT 开展的精密光谱测量^[19], 最近利用量子逻辑光谱成功实现了首个高电荷态离子能级精密测量实验研究^[20], 并实现了基于类硼 Ar^{13+} 离子中的 $^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$ 跃迁的 HCI 光钟^[12]. 类硼 Ar^{13+} 离子光钟的成功实现, 不仅使得 M1 跃迁的频率不确定度提高到 10^{-16} 量级, 还将 $1s^2 2s^2 2p \ ^2P_{3/2} \rightarrow \ ^2P_{1/2}$ 的绝对跃迁频率和同位素位移 (^{40}Ar

对 ^{36}Ar) 的不确定度分别提高了 8 个和 9 个数量级, 这些精密测量高精度检验了 QED 效应和核反冲效应, 并提升同位素位移计算精度, 同时也对理论计算提出了更高的挑战.

伴随着实验测量精度的不断提升, 类硼离子的理论研究由最开始的非相对论的 Hartree-Fock 方法, 还发展了基于相对论的多组态 Dirac-Hartree-Fock (MCDHF) 方法和多体微扰方法, 这些方法使得类硼离子基态精细结构分裂结果计算精度得到了显著提高, 这不仅深入探究了电子关联效应对精细结构的影响, 还实现了对超精细结构的精确预测. 高电荷态离子超精细分裂理论计算方面也获得了重要进展, 对于少电子体系高电荷态离子的超精细分裂的研究, 已经完成了类氢离子^[21-28], 类锂离子^[22,24,29-31] 和类铍离子^[31] 的计算. 对于类硼离子, 其基态能级的超精细分裂只有磁偶极相互作用, 相对于包括了磁偶极和电四极相互作用的激发态能级的超精细分裂更简单, 更有利于高精度的理论计算. 另外一方面, 基态能级的超精细分裂的值比激发态能级超精细分裂的值更大, 分裂的能级数量更少, 呈现的光谱结构相对更简单, 因而也更有利于实验测量. 从 1995 年对类氢和类锂离子的超精细分裂的首次计算^[32], 到 Shabaev 等^[33] 和 Volotka 等^[34] 提出由于同核不同电荷态的高电荷态离子超精细分裂中存在特定差异, 对这些不同电荷态的离子的研究可以降低甚至消除玻尔-魏斯科普夫 (Bohr-Weisskopf, BW) 效应在 QED 等基本物理检验中带来的影响. 然而, 当时德国 ESR 上开展了类氢和类锂 $^{209}\text{Bi}^{80+, 82+}$ 离子超精细结构精密激光光谱学实验, 发现实验结果和理论计算结果存在超过 7 个标准差的误差^[24], 引起了所谓的“Hyperfine Puzzle”^[35,36]. 虽然后来被证明这是由于对原子核的性质不了解导致的差异^[37], 但为了加深对原子核性质的理解, 人们开始对类硼离子的超精细分裂开展研究, 同核的类氢和类硼离子或者类锂和类硼离子的特定差异研究可以减小 BW 效应的影响. 尽管当前对类硼离子超精细分裂的理论研究有了一定进展^[38-40], 但有关类硼离子超精细分裂的实验测量并未有实验报道.

本文主要总结了国际上利用 EBIT 和储存环等装置开展类硼离子精细结构以及超精细结构光谱精密测量的实验和理论研究进展. 在第 2 节介绍类硼离子基态精细结构和超精细结构理论研究进

展. 在第 3 节介绍类硼离子基态精细结构和超精细分裂的实验研究进展. 最后, 在第 4 节对本文作简要总结, 提出当前研究遇到的主要问题和挑战, 并展望了今后的研究目标和方向.

2 理论研究进展

2.1 类硼离子基态精细结构理论研究进展

对于类硼离子基态精细结构的理论研究, 1979 年, Cheng 等^[41] 利用基于 MCDF 方法对类硼等电子序列中的一部分高 Z 离子进行了广泛的研究, 为类硼离子基态精细结构提供了可靠的理论数据, 对于理解这些离子的电子结构和相关物理性质具有重要意义. 1987 年, Verhey 等^[42] 使用基于 MCDF 的变体 extended average level (MCDF-EAL) 方法对类硼等电子序列离子基态精细结构能级之间的 M1 跃迁进行了计算. 1996 年, Safronova 等^[43] 用 RMBPT 方法计算了 $5 \leq Z \leq 100$ 的类硼离子的 15 个态的能量, 其中包含了二阶的 Breit-Coulomb 相互作用. 2001 年, Charro 等^[44] 对类硼等电子序列离子中的 M1 和 E2 跃迁概率进行了相对论量子缺陷轨道计算, 对每条跃迁线沿着等电子序列的跃迁强度规律也进行了相应的研究.

基于 EBIT 上类硼 Ar^{13+} 离子的高精度光谱实验测量结果, 2005 年, Tupitsyn 等^[45] 使用 Dirac-Fock-Sturm 的组态相互作用 (CIDFS) 方法来考虑电子关联效应, 计算了类硼离子的 $2s^2 2p \ ^2P_{3/2} \rightarrow \ ^2P_{1/2}$ 的跃迁速率, 为理解类硼离子的跃迁机制提供了重要的数据支持, 并验证了 CIDFS 方法在电子关联效应和跃迁速率计算中的应用价值. 2005 年, Koc^[46] 使用相对论组态相互作用方法 (relativistic configuration interaction, RCI) 方法, 计算了 $31 \leq Z \leq 60$ 类硼离子 $1s^2 2s^2 2p \ ^2P_{3/2}$ 和 $1s^2 2s^2 p^2 \ ^4P_{1/2}$ 两个态的跃迁能. 这些结果不仅为高 Z 类硼离子的光谱分析提供了重要的理论数据支持, 还验证了 MRRCI 方法在处理复杂电子系统相对论效应和电子关联效应方面的强大能力.

2006 年, Volotka 等^[47] 基于 CIDFS 方法计算了 αZ 中类硼离子基态精细结构能级间 M1 跃迁的单电子 QED 修正. 2009 年, Koc^[48] 再次使用 MRRCI 方法, 计算了 $14 \leq Z \leq 30$ 类硼离子 $^2P_{3/2}$ 能级的寿命, 还通过评估电子自能和真空极化估计了 QED 修正. 2012 年, Rynkun 等^[49] 根据 RCI 计

算, 报道了 $7 \leq Z \leq 30$ 之间的所有类硼离子 $1s^2 2s^2 2p$, $2s^2 p^2$ 和 $2p^3$ 组态中 E1, M1, E2, M2 跃迁线的能量、跃迁速率、线强度、振荡强度和寿命. 2013 年, Artemyev 等^[50] 利用 QED 从头计算方法对 $17 \leq Z \leq 100$ 类硼离子基态的精细结构分裂进行了计算, 同时还考虑了一些高阶的 QED 贡献. 他们在扩展的 Furry 图中评估了能级分裂, 并利用四个不同的屏蔽势来估计电子间关联的影响. 与以前的计算相比, 理论计算的准确性有了显著的提高. 2016 年, Fischer 等^[51] 报道了 $Z = 8-29, 36$ 和 42 的类硼离子 $^2P_{3/2}$ 态寿命的全相对论变分计算的结果, 此研究不仅提供了新的高精度计算结果, 还通过验证不同理论方法的一致性, 为类硼离子的理论研究提供了坚实的基础. 2017 年, Malyshev 等^[52] 对 $16 \leq Z \leq 96$ 类硼离子的基态电离能进行了高精度的 QED 计算, 显著提升了对高 Z 类硼离子电离能的理解, 展示了 QED 效应在计算中的重要性. 2018 年, Bilal 等^[53] 计算了氦、铁、钼、钨四种元素的类硼离子基态精细结构能级之间的磁偶极 (M1) 跃迁线的强度, 利用一阶微扰理论计算了能级和波函数, 并且考虑了电子间相互作用和 Breit 相互作用.

2021 年, Natarajan^[54] 用 MCDF 方法计算了 $14 \leq Z \leq 92$ 类硼离子 $1s^2 2s^2 2p$ 态的 M1 和 E2 两种精细结构能级之间的跃迁能量以及跃迁速率. 在活动空间近似中考虑并计算了电子与原子核的相互作用, 包括了有限核尺寸, Breit 相互作用和 QED 修正, 最终理论计算的结果与已有的实验和理论数据非常吻合. 同年, Liu 等^[55] 在高精度实验结果的基础上, 用 QED 从头计算方法计算评估了类硼离子 S^{11+} 和 Cl^{12+} 中的 M1 跃迁能量, 并与实验数据进行比较, 这为在少电子 HCI 体系中进行中高精度测试 QED 效应和电子关联效应提供了可能. 当前研究表明, 通过 MCDHF 方法系统的考虑电子关联效应和计算 QED 修正, 能够准确计算并获得类硼离子的精细结构相关的物理数据. 此外, RMBPT 方法在类硼离子的精细结构计算中通过系统地考虑相对论效应和电子关联效应, 能够有效地处理电子之间的多体相互作用, 特别是对于高电荷态离子, 通过多阶微扰计算逐步改进计算精度, 能够高精度计算能级分裂、跃迁速率和跃迁强度等重要物理量. 类硼离子精确的理论计算结果如图 2 所示. 截止目前, 从低 Z 到高 Z 类硼离子精细结构的理论计算相对精度达到 $10^{-4} - 10^{-5}$ 量级.

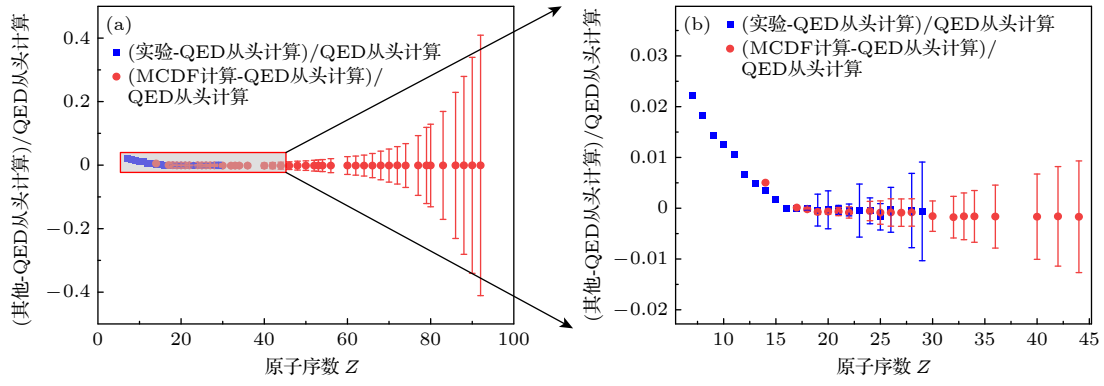


图 2 (a) 通过 QED 从头计算的类硼离子 $^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$ 禁戒跃迁能量的结果与实验结果和 MCDF 计算结果的对比 (QED 从头计算^[50]; MCDF^[54]; 实验结果^[6,12,55,56]); (b) $Z < 45$ 的放大图

Fig. 2. (a) Comparison of the results of the forbidden transition energies of the boron-like ions $^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$ calculated by *ab initio* with experimental and MCDF calculations results (*ab initio*^[50]; MCDF^[54]; experimental results^[6,12,55,56]); (b) enlarged view of $Z < 45$.

2.2 类硼离子基态超精细结构理论研究进展

在精细结构理论计算精度提高的同时, 关于超精细分裂的理论计算也在不断发展. 超精细结构计算的重点是通过精确的量子力学方法, 描述原子或分子中电子与原子核之间的相互作用以及电子之间的相互作用, 从而计算出超精细能级分裂和相关的物理性质. 对于类硼离子, 其基态超精细分裂能量 ΔE 可以表示为^[38,57]:

$$\Delta E = \alpha(\alpha Z)^3 g_I \frac{m_e}{m_p} \frac{2I+1}{36} \frac{1}{(1+m_e/M)^3} \times \left[A(\alpha Z)(1-\delta)(1-\varepsilon) + \frac{1}{Z} B(\alpha Z) + \frac{1}{Z^2} C(Z, \alpha Z) + \chi_{\text{QED}} \right], \quad (1)$$

其中 $g_I = \mu/(\mu_N I)$ 是磁矩为 μ 、自旋为 I 的原子核的 g 因子; α 为精细结构常数; Z 为核电荷数; m_e 和 m_p 分别为电子和质子的质量; $A(\alpha Z)$ 为相对论修正因子; δ 为核电荷分布修正因子; ε 为核磁化分布 (BW) 修正因子; $B(\alpha Z)$ 和 $C(Z, \alpha Z)$ 分别表示电子间相互作用的一阶修正和高阶修正项; χ_{QED} 为 QED 辐射修正项.

2001 年, Shabaev 等^[33] 在对类氢、类锂 Bi 离子的研究中证明了在同核不同电荷态离子 (如类氢、类锂和类硼离子) 的超精细分裂的特定差异中, 通过修正 BW 效应可以实现 QED 效应的检验精度到 1% 左右. 2008 年, Volotka 等^[38] 使用严格 QED 方法和大规模 CIDFS 方法, 首次开展了类硼离子超精细分裂的理论研究, 计算了 $7 \leq Z \leq 28$ 之间的

类氢、类锂和类硼离子的基态能级超精细分裂. 他们在考虑了多种单环辐射和高阶多体效应修正的基础上使用单粒子核模型评估 BW 效应的影响, 其计算结果的不确定度达到了 0.01%. 中 Z 区域类硼离子超精细分裂的计算结果给出的不确定度为 0.04%—0.06%, 但该结果仍需实验验证. 2017 年, Ullmann 等^[24] 在 ESR 上通过激光精密谱获得了更高精度的类氢和类锂 Bi 离子的基态超精细分裂结果, 但与 2012 年 Volotka 等^[34] 计算的类氢和类锂 Bi 离子理论值之间仍存在约 0.5% 的差异. 他们认为这个差异主要源于核磁矩测量的误差以及理论计算中的 QED 效应受到 BW 效应的影响. 为解决这些问题, Shabaev 等提出可通过同核类氢和类硼或同核类锂和类硼离子的超精细分裂的特定差异来实现更高精度的 QED 效应的检验. 因此, 2019 年 Glazov 等^[39] 使用严格 QED 方法和大规模 CIDFS 方法计算了中高 Z 区域 ($Z = 49$ —83) 类硼离子的基态超精细分裂, 考虑了更高阶电子间相互作用的贡献. 他们不仅修正了 QED 值的有效势, 还在单粒子核模型中纳入了核磁化分布的影响, 最终计算结果的不确定度为 0.03%—0.18%. 截至目前, 基态超精细分裂的理论计算已覆盖大部分类硼离子, 类硼离子超精细分裂的理论研究表明, 在利用 MCDHF 大规模 CIDFS 等理论方法通过考虑核电荷分布、核磁化分布以及 BW 效应等修正因素后, 计算结果的精度和准确性得到显著提升, 亟需类硼离子超精细分裂的实验测量结果.

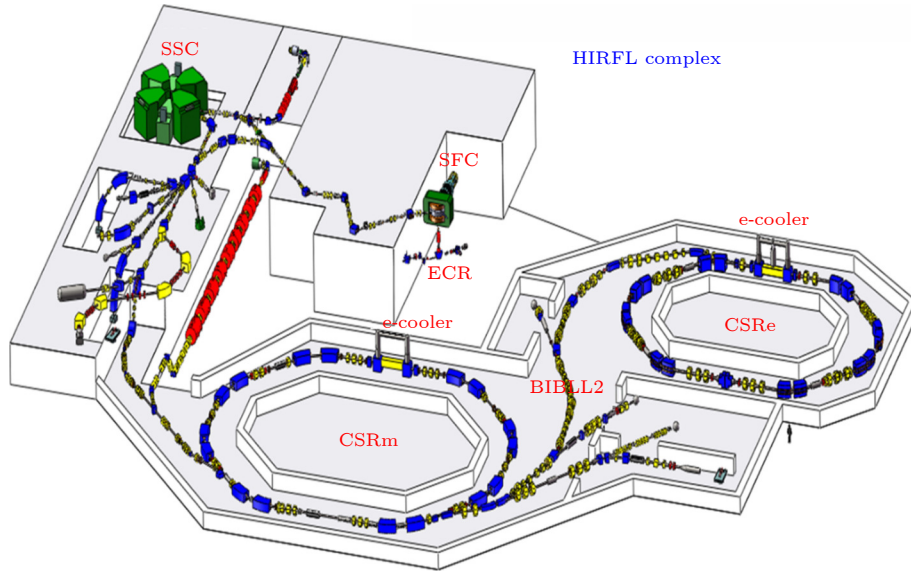


图3 兰州重离子储存环示意图, 包括 ECR 离子源、扇聚焦回旋加速器 (SFC)、大型分离扇回旋加速器 (SSC)、SSC 直线注入器 (SSC Linac)、冷却储存环主环 (CSRm) 和实验环 (CSRe)^[62]

Fig. 3. Schematic diagram of the heavy ion storage ring in Lanzhou, includes the ECR ion source, the sector focusing cyclotron (SFC), the large separating sector cyclotron (SSC), the SSC linear injector (SSC Linac), the CSRm and the CSRe^[62].

3 实验研究进展

3.1 实验装置简介

国际上主要利用两类实验装置开展高电荷态离子能级结构的精密测量, 分别是重离子冷却储存环^[58]和 EBIT^[17]. 重离子冷却储存环是一种利用大型加速器加速并利用储存环约束高电荷态离子的实验装置, 适合开展高精度重离子谱学实验研究^[59,60]. 目前国际上只有两台重离子冷却储存环装置在运行, 分别是德国的达姆施塔特的重离子研究所的实验冷却储存环 (experimental storage ring, ESR)^[61]和我国中国科学院近代物理研究所的重离子冷却储存环 (heavy ion cooler storage ring, HIRFL-CSR)^[62], 如图 3 所示为我国位于兰州的重离子储存环的示意图. 值得一提的是, 由中国科学院近代物理研究所负责筹建的我国“十二五”大科学装置, 强流重离子加速器装置 (high intensity heavy ion accelerator facility, HAIF) 也即将建成于广东惠州^[63]. 总体而言在重离子冷却储存环上开展的高电荷态类硼离子的工作相对较少^[64–67], 大部分类硼离子的研究工作主要还是在 EBIT 中开展的.

EBIT 是一种集光源和离子源于一身, 可以产生并约束高电荷态离子的装置, 其装置原理结构如图 4 所示. 电子束从电子枪中被引出后, 被漂移管和电子枪之间的高电压差加速. 同时, 电子束受到

超导线圈产生的强磁场约束, 使得电子束在中心漂移管段时半径达到最小. 在中心漂移管中, 电子束与引入阱中的低电荷态离子或中性原子分子碰撞, 使离子或原子的电子不断被剥离, 电荷态不断升高, 直至达到平衡状态. 通过调节注气量、电子束能量和势阱深度等参数, 可以选择性的产生所需要价态的离子. 阱区的高电荷态离子和电子之间会发生丰富的原子过程, 包括电子碰撞电离 (electron impact ionization, EII)、电子碰撞激发 (electron impact excitation, EIE)、辐射退激 (radiative de-excitation)、碰撞退激 (collisional de-excitation)、

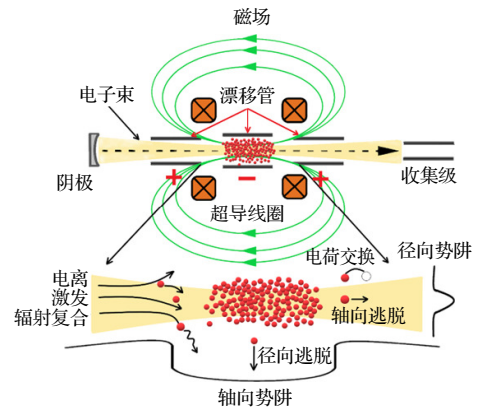


图4 电子束离子阱 EBIT 的原理结构图以及其中发生的一些原子物理过程^[68]

Fig. 4. Schematic diagram of the principle structure of an electron beam ion trap and some atomic processes occurring within^[68].

表 1 已有 EBIT 的主要参数
Table 1. Main parameters of available EBIT.

名称	年份	国家	能量/keV	束流/mA/	磁场/T	参考文献
Super EBIT	1986	美国	10—200	150	3	[79]
EBIT-II	1993	美国	30	200	3	[80]
NIST EBIT	1993	美国	33	200	3	[81]
Oxford EBIT	1993	英国	0.7—50	200	2.8	[82]
Berlin EBIT	1997	德国	40	200	3	[83]
Tokyo EBIT	1996	日本	180	330	5	[84]
Heidelberg EBIT	2000	德国	100	535	8	[85]
Shanghai EBIT	2005	中国	130	160	5	[86]
Stockholm EBIT	2007	瑞典	27	150	3	[87]
TITAN EBIT	2007	加拿大	27	500		[88]
CoBIT	2008	日本	0.1—1	10	0.2	[89]
SH-PermEBIT	2012	中国	0.06—5	10.2	0.48	[73]
SH-HtscEBIT	2013	中国	0.03—4	10	0.25	[74]
HC-EBIT	2018	德国	10	80	0.86	[90]
SW-EBIT	2019	中国	0.03—4	9	0.21	[77]

辐射复合 (radiative recombination, RR)、双电子复合 (dielectronic recombination, DR), 以及离子与离子之间的电荷交换等. 在这些过程中, 往往伴随着各种不同能量的光子吸收或出射, 对这些发射光子波长的精密测量便能反映出离子的能级结构信息.

EBIT 具有体积小、运行灵活的特点, 同时在 EBIT 中进行高电荷态离子的光谱测量基本不需要考虑多普勒频移等问题, 因此, 结合高分辨光谱仪及高精度光谱校刻就可以实现高电荷态离子能级的精密测量, 如表 1 所列, 目前国际上主要有美国劳伦斯立弗莫尔国家实验室的 LLNL EBIT^[69]、美国国家标准科学与技术研究院的 NIST EBIT^[70]、德国马普核物理研究所的 Heidelberg EBIT^[20]、日本东京电气通信大学的 Tokyo EBIT^[71] 等多台超级 EBIT 装置以及上述部分单位的小型 EBIT 装置在开展高电荷态离子物理实验研究. 我国复旦大学自主研制的上海 EBIT 是国内唯一一台超级 EBIT 装置^[72], 复旦大学还先后研制了多台小型 EBIT 装置^[73,74]. 近年来中国科学院近代物理研究所、中国科学院国家天文台、中国科学院精密测量科学与技术创新研究院及西北师范大学等多家单位也先后在一些特定领域利用小型 EBIT 装置开展高电荷态离子精密谱学实验研究^[75–78].

3.2 类硼离子精细结构实验研究进展

类硼高电荷态离子谱学的实验研究, 可以追溯到 1943 年, Edlén^[15] 利用天文观测提供了类硼等电子序列的 M1 跃迁波长. 1983 年, Edlén^[6] 使用

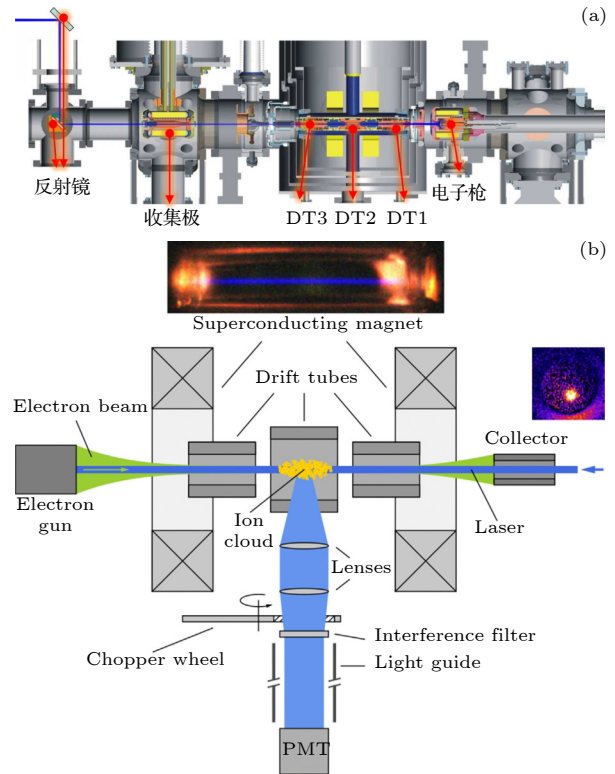


图 5 (a) 德国马克斯-普朗克研究所的激光精密谱学实验装置^[93]. 蓝色激光束通过反射镜从 EBIT 的收集极进入 EBIT 的中心漂移管, 与高电荷态离子相互作用; (b) Ar^{13+} 离子的激光结合精密谱学实验原理图^[19]

Fig. 5. (a) Laser Precision Spectroscopy Experimental Setup in Max Planck Institute of Germany^[93]. The blue laser beam passes through a reflector from the collection pole of the EBIT into the central drift tube of the EBIT, where it interacts with highly charged state ions; (b) principle Diagram of Laser-Combined Precision Spectroscopy Experiment for Ar^{13+} ion^[19].

MBPT 方法得到的计算结果与 1943 年天文观测结果进行了比较, 解析了早期的实验数据. 但是天文观测的精度小于 10^{-4} , 为了获得更精确的类硼离子光谱. 1997 年, Bieber 等^[16]在 Oxford EBIT 上对类硼 Ar^{13+} 离子中 $1s^2 2s^2 2p\ ^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$ 的 M1 精细结构跃迁进行了高精度测量, 该跃迁位于可见光波段, 波长测量的精度为 7×10^{-6} , 这为多电子体系原子结构的计算提供了一个重要的实验参考. 2000 年, Träbert 等^[65-67,91]在德国 TSR 和美国 LLNL EBIT 上先后测量了类硼 Cl^{12+} , Ar^{13+} 和 Ti^{17+} 离子中 $1s^2 2s^2 2p\ ^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$ 的 M1 跃迁的跃迁概率. 他们首次提出来自 Cl^{12+} 离子的这条 M1 跃迁线是日冕线, 发现当时理论计算对类硼离子体系 M1 跃迁概率预测的不确定度小于 10%.

类硼 Ar^{13+} 离子基态精细结构的跃迁研究是整个类硼离子精密测量研究中最具有代表性的工作. 2003 年, Draganić 等^[17]利用 Heidelberg EBIT 对类硼 Ar^{13+} 中 $1s^2 2s^2 2p\ ^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$ 的跃迁能进行了高精度测量, 在改善了光谱校刻等实验装置的基础上, 其实验测量的精度比 1997 年 Bieber^[16]在 Oxford EBIT 上测量的精度高了 200 倍, 显示出 EBIT 在少电子体系中研究 QED 效应的巨大潜力. 2006 年, Lapierre 等^[92]在 Heidelberg EBIT 上以亚 10^{-6}

的精度测定了 Ar^{13+} 离子的 $1s^2 2s^2 2p\ ^2P_{3/2}$ 亚稳态能级的寿命. 同年 Orts 等^[18]在 Heidelberg EBIT 上不仅观测到了 $^{40}\text{Ar}^{13+}$ 的塞曼分裂, 还完成了类硼 $^{36}, ^{40}\text{Ar}^{13+}$ 同位素位移的精密测量, 并研究了其中的相对论电子关联效应、QED 效应和核反冲效应. 随着激光光谱技术的发展, 2011 年, Mäckel 等^[19]利用激光结合 Heidelberg EBIT 上针对类硼 Ar^{13+} 离子的禁戒跃迁 $1s^2 2s^2 2p\ ^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$ 实现了共振激光光谱实验, 其实验装置及原理图见图 5 所示, 他们使用蒸发冷却技术获得了更高分辨的波长, 测得该跃迁波长为 441.25568(26) nm, 精度达到亚 10^{-6} 数量级.

在类硼 Ar^{13+} 离子激光光谱的测量中, 尽管已经通过蒸发冷却大大降低了 EBIT 中离子的多普勒效应带来的影响, 但是激光光谱的实验精度还远远达不到作为光学频率标准. 为了进行更高精度的光谱测量实现高电荷态离子光钟, 必须充分考虑并有效克服多普勒效应所带来的影响. 将 EBIT 中产生的离子引出并注入到 Penning 阱或 Paul 阱中进一步冷却, 从而减少多普勒效应的影响, 可将实验测量的精度进一步提高到 10^{-9} 水平. 2015 年, Schmöger 等^[94]在 EBIT 中产生 $^{40}\text{Ar}^{13+}$, 通过中心漂移管上施加的快速高压脉冲, 将 $^{40}\text{Ar}^{13+}$ 离子引出减速并注入到 Paul 阱中, 如图 6 所示, 随后 $^{40}\text{Ar}^{13+}$ 离

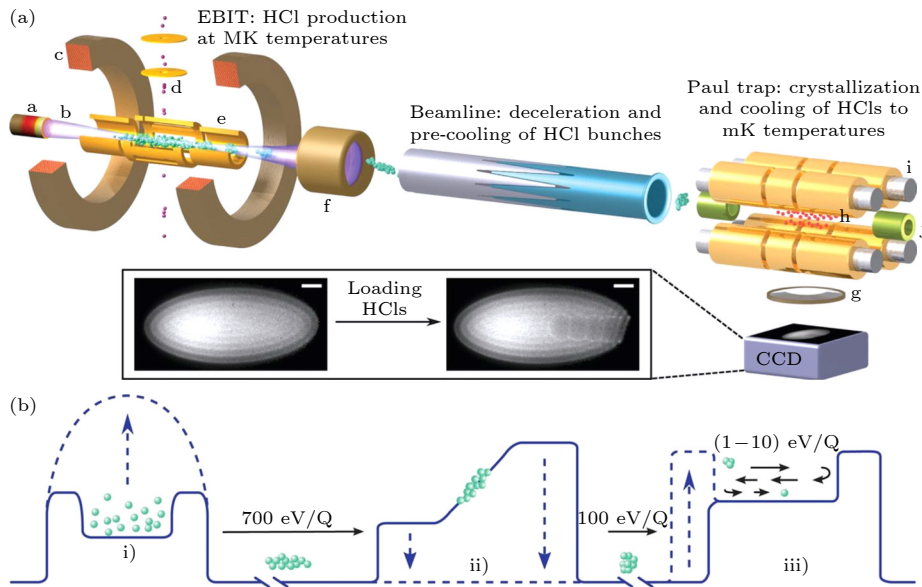


图 6 (a) 实验装置示意图, 包括一个作为 HCl 生产场所的 EBIT、一条用于减速和减少 HCl 串能量扩散的光束线、一个具有外部离子注入功能的低温保罗阱 (用于存储 HCl 并将其协同冷却至毫开尔文状态) 以及一个用于在 313 nm 处对 Be^+ 冷却剂离子进行激光诱导荧光检测的成像系统^[94]; (b) 离子引出过程中漂移管电压变化示意图^[94]

Fig. 6. (a) Illustration of experimental setup consisting of an EBIT as HCl production site, a beamline for deceleration and reduction of energy spread of HCl bunches, a cryogenic Paul trap with external ion injection capabilities for HCl storage and sympathetic cooling to the millikelvin regime, and an imaging system for laser-induced fluorescence detection of the Be^+ coolant ions at 313 nm^[94]; (b) schematic of the drift tube voltage change during ion elicitation^[94].

子与经过激光冷却的 Be^+ 离子通过库仑相互作用实现协同冷却, 使得 $^{40}\text{Ar}^{13+}$ 在低温线形射频阱中被重新捕获, 实现了单个激光冷却的 Be^+ 离子对单个 Ar^{13+} 离子的协同冷却. 这个实验中, 高电荷态离子的温度从兆开 (MK) 量级降低到毫开 (mK) 量级, 温度下降了 7 个数量级, 不仅为开展高精度激光光谱学研究高电荷态离子扫清了主要障碍, 还为实现量子逻辑光谱提供了必要条件.

如图 7 所示是产生 HCI 和制备库仑晶体的时间序列图, 类硼 $^{40}\text{Ar}^{13+}$ 离子的库仑晶体制备完成后, 于 2020 年, Micke 等 [20] 对其进行了开创性的光学测量. 他们将 EBIT 产生的高电荷态氩离子与激光冷却后的 Be^+ 离子一起囚禁于线性 Paul 阱中, 通过协同冷却将 $^{40}\text{Ar}^{13+}$ 离子冷却到迄今为止最低的温度 ($< 50 \mu\text{K}$), 形成了一个双离子晶体. 同时使用量子逻辑光谱 [95] 精确解析了 $^{40}\text{Ar}^{13+}$ 离子的光谱结构, 主要包括 441 nm 禁戒跃迁的跃迁频率、激发态寿命和 g 因子, 测量精度达到 10^{-15} 数量级, 相对于传统光谱测量技术实现了 8 个数量级的精度提高, 并为高电荷态离子光钟的研究取得了关键的突破. 在高精度量子逻辑光谱的基础上, 2022 年, King 等 [12] 首次实现了基于类硼 Ar^{13+} 的 HCI 光钟, 将 Ar^{13+} 离子钟的系统频率的不确定性降低到 2.2×10^{-17} . 通过如图 8 所示的光学频率比较方法, 与单个 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子的本地光学时钟进行比较, 并利用之前对其绝对频率的测量结果, 确定了该跃迁绝对频率的不确定度为 1.5×10^{-16} . 与 2006 年的工作相比, 同位素移动 ($^{36}, ^{40}\text{Ar}$) 的测量精度从 1895(93) MHz [18] 提高到 1878.11053251(11) MHz, 提高了 9 个数量级. 该跃迁的绝对跃迁频率和同位素移动 ($^{36}, ^{40}\text{Ar}$) 测量的不确定度提高了 8 个数量级 [96]. Ar^{13+} 光钟的建立, 不仅为 HCI 光钟的发展奠定了重要的实验基础, 还为未来探索超越标准模型的新物理提供了重要参考.

除此之外, 2021 年, Liu 等 [55] 在 SH-HtscEBIT 上测量了类硼 S^{11+} 和 Cl^{12+} 基态 $2\text{P}_{3/2} \rightarrow 2\text{P}_{1/2}$ 的 M1 跃迁波长, 实验精度达到 10^{-6} 量级. 图 9 显示了类硼离子 ($16 \leq Z \leq 29$) 基态 M1 跃迁的实验值 [6,55] 与 Artemyev 等 [50] 用 QED 从头计算方法计算的理论结果之间的跃迁能量差 (ΔE). 图 9 显示了类硼离子 ($16 \leq Z \leq 29$) 的实验值 (Edlén [6] 和 Liu 等的实验测量值) 与 Artemyev 等 [50] 用 QED 从头计算方法计算的理论结果之间的跃迁能差 (ΔE). 从

图 9 中可以看出, 在 Z 值为 18 左右的区域, 实验的精确度远高于理论, 理论与实验的结果是一致的. 因此, 对 $Z \geq 20$ 的高电荷类硼离子进行高精度的实验测量, 不仅有助于检验之前的实验结果 (见表 2) 以及 Artemyev 等的理论, 还为将来实现类硼离子超精细分裂的实验测量奠定了基础.

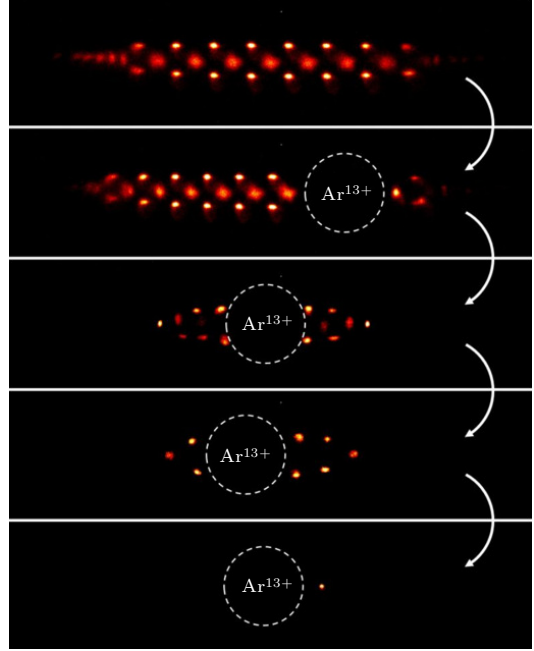


图 7 制备双离子晶体的时间序列, 从上到下依次为, 由 50—100 个荧光 $^9\text{Be}^+$ 离子组成的激光冷却库仑晶体被限制在保罗阱中. 单个 Ar^{13+} 离子沿晶体轴线注入, 共冷却, 最后与 $^9\text{Be}^+$ 共晶化. 由于高电荷状态对 $^9\text{Be}^+$ 的排斥作用, 它呈现为一个巨大的暗空洞. 在没有激光冷却的情况下, 多余的 $^9\text{Be}^+$ 离子通过调节 Paul 阱射频电势, 从而减少多余的离子. 最后, 制备出 $\text{Ar}^{13+}-^9\text{Be}^+$ 双离子晶体 [20].

Fig. 7. Time sequence of HCI recapture and two-ion crystal preparation. In order from top to bottom, a laser-cooled Coulomb crystal of 50–100 fluorescing $^9\text{Be}^+$ ions is confined in the Paul trap. A single Ar^{13+} ion is injected along the crystal axis, sympathetically cooled and finally co-crystallized with $^9\text{Be}^+$. It appears as a large dark void owing to the repulsion of the $^9\text{Be}^+$ by the high charge state. Excess $^9\text{Be}^+$ ions are removed by modulating the Paul trap radio-frequency potential in the absence of laser cooling, resulting in heating and ion losses. Finally, the $\text{Ar}^{13+}-^9\text{Be}^+$ two-ion crystal is prepared [20].

3.3 高电荷态离子超精细结构实验研究进展

近几十年来, 高电荷态离子的超精细分裂的相关实验, 主要也是在重离子冷却储存环和 EBIT 中开展的, 如表 3 所列, 1994 年 Klaft 等 [21] 首次使用激光结合德国重离子研究中心的重离子储存环

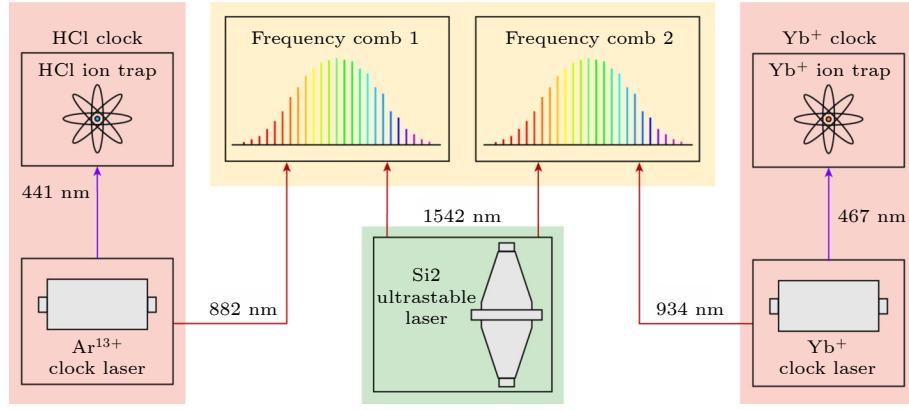


图 8 两个时钟激光器 (Ar^{13+} 和 $^{171}\text{Yb}^{+}$) 分别锁定在自己的本地腔体和频率梳上进行预稳定, 并通过数字控制环路最终转向相应的光学转换. 两个频率梳锁定在异常稳定的低温硅腔上. 通过这种方法, 每个光频梳可以获得其时钟激光器与稳定激光器之间的频率比^[12]
Fig. 8. Each of the two clock lasers (Ar^{13+} and $^{171}\text{Yb}^{+}$) is locked for pre-stabilization to its own local cavity and frequency comb, and ultimately steered to the corresponding optical transition by a digital control loop. The two frequency combs are locked to the exceptionally stable cryogenic silicon cavity Si2. This method yields for each comb the frequency ratio between its clock laser and the Si2-stabilized laser. The dedicated laboratories are linked through phase-stabilized optical fibres^[12].

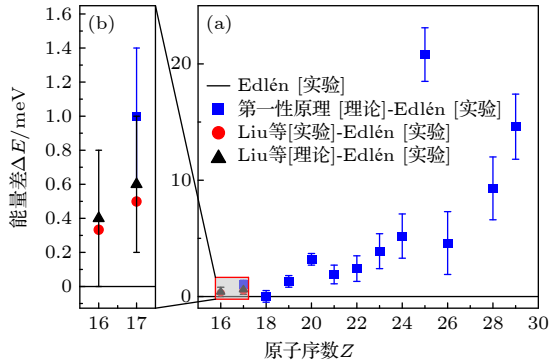


图 9 类硼离子 $16 \leq Z \leq 29$ 的计算结果与实验测量结果的比较^[55], 图中 0 处的黑色基线表示 Edlén^[6] 与自己结果的 ΔE , 蓝色■表示 QED 从头计算^[50] 理论计算结果与 Edlén^[6] 的 ΔE , 红色●表示 Liu 等^[55] 的实验测量结果与 Edlén^[6] 的 ΔE , 黑色▲表示 Liu 等^[55] 的理论计算结果与 Edlén^[6] 的 ΔE

Fig. 9. Comparison of calculated results with experimental measurements for the boron-like ions $16 \leq Z \leq 29$ ^[55], where the black baseline at 0 denotes the ΔE of Edlén^[6] versus its own results, the blue box (■) denotes the ΔE of theoretical calculations of first principles^[50] versus Edlén^[6], the red circle (●) denotes the experimental measurements of Xin Liu et al.^[55] experimental measurements with ΔE of Edlén^[6], and black triangle (▲) denotes the theoretical calculations of Xin Liu et al.^[55] with ΔE of Edlén^[6].

ESR 完成了类氢铋离子 $^{209}\text{Bi}^{82+}$ 核外 1s 电子基态超精细分裂的测量. 紧接着 Crespo 等^[25] 在劳伦斯利弗莫尔实验室的电子束离子阱 SuperEBIT 上使用发射光谱测量了类氢 $^{165}\text{Ho}^{66+}$ 中 1s 能级的超精细分裂. 在此基础上 Seeling 等^[27] 在 ESR 完成了类氢铅离子 $^{207}\text{Pb}^{81+}$ 的超精细分裂激光精密谱测量. 随后, 人们在 SuperEBIT 上测量了另外四种类氢离子的 1s 能级的超精细分裂, 即 $^{185}\text{Re}^{74+}$, $^{187}\text{Re}^{74+}$,

$^{203}\text{Tl}^{80+}$ 和 $^{205}\text{Tl}^{80+}$ ^[26,28]. 德国 ESR 上开展了类氢和类锂的 $^{209}\text{Bi}^{80+}$, $^{82+}$ 离子的超精细分裂精密激光光谱学实验^[24]. 从 1994 年至 2017 年间, 随着实验技术的不断发展, 实验的测量精度从 10^{-4} 量级提升到 10^{-6} 量级. 同时, 实验结果与理论结果的差异揭示了当前研究仍存在问题, 这些差异表明当前理论模型在描述高电荷态离子超精细结构时受到限制, 需要更精确或更完善的理论框架来解释. 例如, 类氢和类锂超精细分裂实验中观察到的“Hyperfine Puzzle”说明了对原子核结构和核磁矩数据精确理解非常重要^[35-37]. 然而, 对于类硼离子, 目前尚未有超精细分裂的相关实验结果被报道.

为填补类硼离子超精细分裂实验数据的空白, 通过类硼离子超精细分裂的理论计算结果, 从其中选择适合实验测量的类硼离子, 以高斯线形作为光谱模拟的基础线形, 结合小型 EBIT 实验装置的参数^[68,74], 使用理论计算对应离子的超精细结构常数, 模拟超精细能级间跃迁的光谱, 进而得到了如图 10 所示的类硼离子超精细分裂光谱图. 除此之外, 还应该考虑这些分类硼离子超精细分裂对应的塞曼分裂以及同位素移动效应. 我们利用 GRASP 中的 rhfszeeman 程序包计算了选定类硼离子在 0—1 T 外磁场作用下的塞曼分裂大小^[97], 只需要保证外磁场不大于 0.2 T, 塞曼分裂的大小对目标待测类硼离子超精细分裂的实验测量的影响就可以忽略不计. 只要满足模拟中的实验分辨以及磁场强度, 理论上就可以实现类硼离子超精细分裂的实验测量.

表 2 目前已经报道的类硼离子基态精细结构分裂 ${}^2P_{3/2}-{}^2P_{1/2}$ 实验测量结果, 其中括号中的数字表示跃迁能量的不确定度

Table 2. Experimental measurements of the boron-like ion ground-state fine-structure splitting ${}^2P_{3/2}-{}^2P_{1/2}$ that have been reported so far, where the numbers in parentheses indicate the uncertainties in the transition energies.

离子	跃迁能量/eV	参考文献	离子	跃迁能量/eV	参考文献
N ²⁺	0.02157(13)	[6]	⁴⁰ Ar ¹³⁺	2.8090135821306312(5)	[12]
O ³⁺	0.04786(13)	[6]	³⁶ Ar ¹³⁺	2.8090058148895724(5)	[12]
F ⁴⁺	0.0924(4)	[6]	K ¹⁴⁺	3.5963(31)	[6]
Ne ⁵⁺	0.1623(5)	[6]	Ca ¹⁵⁺	4.5397(37)	[6]
Na ⁶⁺	0.2652(8)	[6]	Sc ¹⁶⁺	5.6583(4)	[6]
Mg ⁷⁺	0.4094(3)	[6]	Ti ¹⁷⁺	6.9732(4)	[56]
Al ⁸⁺	0.6063(13)	[6]	V ¹⁸⁺	8.5061(50)	[6]
Si ⁹⁺	0.8665(3)	[6]	Cr ¹⁹⁺	10.2815(17)	[56]
P ¹⁰⁺	1.202(2)	[6]	Mn ²⁰⁺	12.3100(12)	[6]
S ¹¹⁺	1.628860(6)	[55]	Fe ²¹⁺	14.6640(35)	[56]
Cl ¹²⁺	2.158835(10)	[55]	Ni ²³⁺	20.3286(68)	[56]
			Cu ²⁴⁺	23.7154(93)	[56]

表 3 已有的高电荷态离子的超精细分裂实验测量结果

Table 3. Existing experimental measurements of hyperfine splitting of highly charged ions.

离子	精度	类型	年份	实验装置	跃迁能级	结果	
$^{209}\text{Bi}^{82+}$	1.6×10^{-4}	类氢	1994	ESR	$(1s_{1/2})_{F=4,5}$	243.87(4) nm ^[21]	
$^{165}\text{Ho}^{66+}$	2.6×10^{-4}	类氢	1996	SuperEBIT	$(1s_{1/2})_{F=3,4}$	572.61(15) nm ^[25]	
$^{185}\text{Re}^{74+}$ $^{187}\text{Re}^{74+}$	6.6×10^{-4}	类氢	1998	SuperEBIT	$(1s_{1/2})_{F=2,3}$	456.05(30) nm ^[26] 451.69(30) nm ^[26]	
$^{209}\text{Bi}^{80+}$	3.1×10^{-2}	类锂	1998	SuperEBIT	$(1s^2s_{1/2})_{F=4,5}$	0.820(26) eV ^[29]	
$^{207}\text{Pb}^{81+}$	1.9×10^{-4}	类氢	1998	ESR	$(1s_{1/2})_{F=0,1}$	1019.7(2) nm ^[27]	
$^{203}\text{Tl}^{80+}$ $^{205}\text{Tl}^{80+}$	8.9×10^{-5}	类氢	2001	SuperEBIT	$(1s_{1/2})_{F=0,1}$	385.822(30) nm ^[28] 382.184(34) nm ^[28]	
Sc^{18+}	1.3×10^{-2}	类锂	2008	ESR	$(1s^2s_{1/2})_{F=3,4}$	0.00620(8) eV ^[30]	
$^{141}\text{Pr}^{56+}$	6.1×10^{-3}	类锂	2014	SuperEBIT	$(1s^2s_{1/2})_{F=2,3}$	0.1965(12) eV ^[31]	
	1.7×10^{-2}				$(1s^2p_{1/2})_{F=2,3}$	0.0640(11) eV ^[31]	
$^{141}\text{Pr}^{55+}$	9.4×10^{-3}	类铍			$(1s^2s_{1/2}p_{1/2})_{F=5/2,7/2}$	0.1494(14) eV ^[31]	
	1.8×10^{-2}				$(1s^2s_{1/2}p_{1/2})_{F=3/2,5/2}$	0.1033(19) eV ^[31]	
	7.1×10^{-3}				$(1s^2s_{1/2}p_{1/2})_{F=3/2,7/2}$	0.2531(18) eV ^[31]	
$^{209}\text{Bi}^{82+}$	2.1×10^{-4}	类氢	2014	ESR	$(1s_{1/2})_{F=4,5}$	5.0863(11) eV ^[22]	
$^{209}\text{Bi}^{80+}$	2.3×10^{-4}	类锂			$(1s^2s_{1/2})_{F=4,5}$	0.79750(18) eV ^[22]	
$^{209}\text{Bi}^{82+}$	2.4×10^{-5}	类氢	2015	ESR	$(1s_{1/2})_{F=4,5}$	243.821(6) nm ^[23]	
$^{209}\text{Bi}^{82+}$	1.7×10^{-5}	类氢	2017	ESR	$(1s_{1/2})_{F=4,5}$	243.8221(8)(43) nm ^[24]	
$^{209}\text{Bi}^{80+}$	9.0×10^{-6}	类锂			$(1s^2s_{1/2})_{F=4,5}$	1554.377(4)(14) nm ^[24]	

4 总结与展望

类硼离子基态的精细结构分裂和超精细分裂对检验 QED 效应、相对论效应和检验相关核结构

模型等基础前沿物理研究有重要的作用, 并能够为天体物理和聚变等离子体物理研究提供关键原子物理参数. 类硼离子精密谱研究不仅推动了实验技术的发展, 提升了测量精度, 并且有效地推动了相

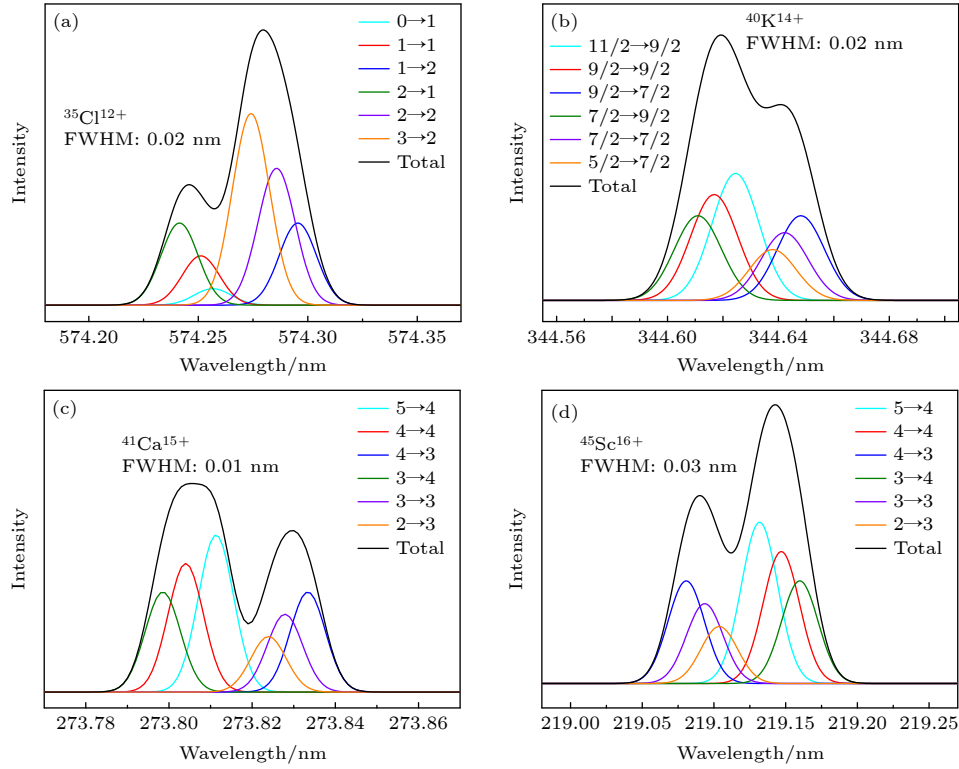


图 10 部分适合光学波段测量的类硼离子基态超精细分裂模拟光谱图, 图中给出了模拟光谱的分辨率. 每条线代表 $F(^2P_{3/2}) \rightarrow F(^2P_{1/2})$ 跃迁线

Fig. 10. Simulation of the ground-state hyperfine splitting spectra of some boron-like ions, with the resolution of the corresponding simulated spectra shown. Each line represents the $F(^2P_{3/2}) \rightarrow F(^2P_{1/2})$ transition line.

关理论模型的发展. 本文总结了国际上利用 EBIT 和重离子储存环等已开展的一些类硼离子精细结构光谱测量的实验方法、实验测量和理论研究进展等, 简要介绍了类硼 Ar^{13+} 高电荷态离子光钟的发展历程及最新进展, 提出了类硼离子精密谱实验测量和理论计算所面临的机遇和挑战. 目前类硼离子超精细结构的实验研究工作尚未有相关报道, 我们结合现有小型 EBIT 装置, 通过对类硼离子的理论研究, 分析了开展类硼离子超精细分裂精密光谱测量的可行性, 可为 HCI 光钟研究、原子核性质研究、高精度检验 QED 理论等研究提供新的平台. 利用当前正在升级中的 EBIT 装置在类硼离子超精细分裂的研究中获得更高精度与分辨率的实验数据, 这将极大的拓展了类硼离子超精细分裂的光谱研究范围.

参考文献

- [1] Beyer H F, Shevelko V P 2003 *Introduction to the Physics of Highly Charged Ions* (Institute of Physics Publishing, wholly owned by The Institute of Physics, London: IOP Publishing Ltd)
- [2] Indelicato P 2019 *J. Phys. B: At., Mol. Opt. Phys.* **52** 232001
- [3] Nörtershäuser W 2011 *Hyperfine Interact.* **199** 131
- [4] Fawcett B C, Gabriel A H, Paget T M 1971 *J. Phys. B: At., Mol. Opt. Phys.* **4** 986
- [5] Audard M, Behar E, Güdel M, Raassen A J J, Porquet D, Mewe R, Foley C R, Bromage G E 2001 *Astron. Astrophys.* **365** L329
- [6] Edlén B 1983 *Phys. Scr.* **28** 483
- [7] Flower D, Nussbaumer H 1975 *Astron. Astrophys.* **45** 349
- [8] Sugar J, Kaufman V, Cooper D 1982 *Phys. Scr.* **26** 293
- [9] Wang W, Liu X W, Zhang Y, Barlow M 2004 *Astron. Astrophys.* **427** 873
- [10] Stencel R E, Linsky J L, Brown A, Jordan C, Carpenter K G, Wing R F, Czyzak S 1981 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **196** 47P
- [11] Brekke P, Kjeldseth-Moe O, Bartoe J D F, Brueckner G E 1991 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **75** 1337
- [12] King S A, Spieß L J, Micke P, Wilzewski A, Leopold T, Benkler E, Lange R, Huntemann N, Surzhykov A, Yerokhin V A, López-Urrutia J R C, Schmidt P O 2022 *Nature* **611** 43
- [13] Kozlov M G, Safronova M S, López-Urrutia J R C, Schmidt P O 2018 *Rev. Mod. Phys.* **90** 045005
- [14] Safronova M S, Budker D, DeMille D, Kimball D F J, Derevianko A, Clark C W 2018 *Rev. Mod. Phys.* **90** 025008
- [15] Edlén B 1943 *Z. Astrophys.* **22** 30
- [16] Bieber D J, Margolis H S, Oxley P K, Silver J D 1997 *Phys. Scr.* **T73** 64
- [17] Draganić I, López-Urrutia J R C, DuBois R, Fritzsche S, Shabaev V M, Orts R S, Tupitsyn I I, Zou Y, Ullrich J 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 183001
- [18] Orts R S, Harman Z, Crespo López-Urrutia J R, Artemyev A

- N, Bruhns H, Martínez A J G, Jentschura U D, Keitel C H, Lapierre A, Mironov V, Shabaev V M, Tawara H, Tupitsyn I I, Ullrich J, Volotka A V 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 103002
- [19] Mackel V, Klawitter R, Brenner G, López-Urrutia J R C, Ullrich J 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 143002
- [20] Micke P, Leopold T, King S A, Benkler E, Spieß L J, Schmöger L, Schwarz M, Crespo López-Urrutia J R, Schmidt P O 2020 *Nature* **578** 60
- [21] Klaft I, Borneis S, Engel T, Fricke B, Grieser R, Huber G, Kühl T, Marx D, Neumann R, Schröder S, Seelig P, Völker L 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 2425
- [22] Lochmann M, Jöhren R, Geppert C, Andelkovic Z, Anielski D, Botermann B, Bussmann M, Dax A, Frömmigen N, Hammen M, Hannen V, Kühl T, Litvinov Y A, López-Coto R, Stöhlker T, Thompson R C, Vollbrecht J, Volotka A, Weinheimer C, Wen W, Will E, Danyal Winters, Sánchez R, Nörtershäuser W 2014 *Phys. Rev. A* **90** 030501(R)
- [23] Ullmann J, Andelkovic Z, Dax A, Geithner W, Geppert C, Gorges C, Hammen M, Hannen V, Kaufmann S, König K, Litvinov Y, Lochmann M, Maass B, Meisner J, Murböck T, Sánchez R, Schmidt M, Schmidt S, Steck M, Stöhlker T, Thompson R C, Vollbrecht J, Weinheimer C, Nörtershäuser W 2015 *J. Phys. B: At., Mol. Opt. Phys.* **48** 144022
- [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] Crespo López-Urrutia J R, Beiersdorfer P, Savin D W, Widmann K 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 826
- [26] Crespo López-Urrutia J R, Beiersdorfer P, Widmann K, Birkett B B, Mårtensson-Pendrill A M, Gustavsson M G H 1998 *Phys. Rev. A* **57** 879
- [27] 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
- [28] Beiersdorfer P, Utter S B, Wong K L, López-Urrutia J R C, Britten J A, Chen H, Harris C L, Thoe R S, Thorn D B, Träbert E, Gustavsson M G H, Forssén C, Mårtensson-Pendrill A M 2001 *Phys. Rev. A* **64** 032506
- [29] Beiersdorfer P, Osterheld A L, Scofield J H, J. R. Crespo López-Urrutia, Widmann K 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 3022
- [30] Lestinsky M, Lindroth E, Orlov D A, Schmidt E W, Schippers S, Böhm S, Brandau C, Sprenger F, Terekhov A S, Müller A, Wolf A 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 033001
- [31] Beiersdorfer P, Träbert E, Brown G V, Clementson J, Thorn D B, Chen M H, Cheng K T, Sapirstein J 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 233003
- [32] Shabaev V M, Shabaeva M B, Tupitsyn I I 1995 *Phys. Rev. A* **52** 3686
- [33] Shabaev V M, Artemyev A N, Yerokhin V A, Zhrebtsov O M, Soff G 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3959
- [34] Volotka A V, Glazov D A, Andreev O V, Shabaev V M, Tupitsyn I I, Plunien G 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 073001
- [35] Karr J P 2017 *Nat. Phys.* **13** 533
- [36] Nörtershäuser W, Ullmann J, Skripnikov L V, Andelkovic Z, Brandau C, Dax A, Geithner W, Geppert C, Gorges C, Hammen M, Hannen V, Kaufmann S, König K, Kraus F, Kresse B, Litvinov Y A, Lochmann M, Maaß B, Meisner J, Murböck T, Privalov A F, Sánchez R, Scheibe B, Schmidt M, Schmidt S, Shabaev V M, Steck M, Stöhlker T, Thompson R C, Trageser C, Vogel M, Vollbrecht J, Volotka A V, Weinheimer C 2019 *Hyperfine Interact.* **240** 51
- [37] Skripnikov L V, Schmidt S, Ullmann J, Geppert C, Kraus F, Kresse B, Nörtershäuser W, Privalov A F, Scheibe B, Shabaev V M, Vogel M, Volotka A V 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 093001
- [38] Volotka A V, Glazov D A, Tupitsyn I I, Oreshkina N S, Plunien G, Shabaev V M 2008 *Phys. Rev. A* **78** 062507
- [39] Glazov D A, Volotka A V, Andreev O V, Kosheleva V P, Fritzsche S, Shabaev V M, Plunien G, Stöhlker T 2019 *Phys. Rev. A* **99** 062503
- [40] Verdebout S, Nazé C, Jönsson P, Rynkun P, Godefroid M, Gaigalas G 2014 *At. Data Nucl. Data Tables* **100** 1111
- [41] Cheng K T, Kim Y K, Desclaux J P 1979 *At. Data Nucl. Data Tables* **24** 111
- [42] Verhey T R, Das B P, Perger W F 1987 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **20** 3639
- [43] Safronova M S, Johnson W R, Safronova U I 1996 *Phys. Rev. A* **54** 2850
- [44] Charro E, López-Ferrero S, Martín I 2001 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **34** 4243
- [45] Tupitsyn I I, Volotka A V, Glazov D A, Shabaev V M, Plunien G, Crespo López-Urrutia J R, Lapierre A, Ullrich J 2005 *Phys. Rev. A* **72** 062503
- [46] Koc K 2005 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **235** 46
- [47] Volotka A, Glazov D, Plunien G, Shabaev V, Tupitsyn I 2006 *Eur. Phys. J. D* **38** 293
- [48] Koc K 2009 *Eur. Phys. J. D* **53** 9
- [49] Rynkun P, Jönsson P, Gaigalas G, Fischer C F 2012 *At. Data Nucl. Data Tables* **98** 481
- [50] Artemyev A N, Shabaev V M, Tupitsyn I I, Plunien G 2013 *Phys. Rev. A* **88** 032518
- [51] Fischer C F, Grant I P, Gaigalas G, Rynkun P 2016 *Phys. Rev. A* **93** 022505
- [52] Malyshev A V, Glazov D A, Volotka A V, Tupitsyn I I, Shabaev V M, Plunien G, Stöhlker T 2017 *Phys. Rev. A* **96** 022512
- [53] Bilal M, Volotka A V, Beerwerth R, Fritzsche S 2018 *Phys. Rev. A* **97** 052506
- [54] Natarajan L 2021 *Phys. Scr.* **96** 105402
- [55] Liu X, Zhou X P, Wen W Q, Lu Q F, Yan C L, Xu G Q, Xiao J, Volotka A V, Kozhedub Y S, Kaygorodov M Y, Huang Z K, Ma W L, Wang S X, Ma X 2021 *Phys. Rev. A* **104** 062804
- [56] Hinnov E, Suckewer S, Cohen S, Sato K 1982 *Phys. Rev. A* **25** 2293
- [57] Shabaev V M 1994 *J. Phys. B: At., Mol. Opt. Phys.* **27** 5825
- [58] Brandau C, Kozhuharov C, Müller A, Shi W, Schippers S, Bartsch T, Böhm S, Bohme C, Hoffknecht A, Knopp H, Grun N, Scheid W, Steih T, Bosch F, Franzke B, Mokler P H, Nolden F, Steck M, Stöhlker T, Stachura Z 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 073202
- [59] Lindroth E, Danared H, Glans P, Pešić Z, Tokman M, Viktor G, Schuch R 2000 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5027
- [60] Wang S X, Huang Z K, Wen W Q, Ma W L, Wang H B, Schippers S, Wu Z W, Kozhedub Y S, Kaygorodov M Y, Volotka A V, Wang K, Zhang C Y, Chen C Y, Liu C, Huang H K, Shao L, Mao L J, Ma X M, Li J, Tang M T, Yan K M, Zhou Y B, Yuan Y J, Yang J C, Zhang S F, Ma X, Zhu L F 2022 *Phys. Rev. A* **106** 042808
- [61] Brandau C, Kozhuharov C (Shevelko V, Tawara H Ed.) 2012

- Atomic Processes in Basic and Applied Physics* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg) pp283–306
- [62] Huang Z K, Wen W Q, X. Xu c H B W, Dou L J, Chuai X Y, Zhu X L, Zhao D M, Li J, Ma X M, Mao L J, Yang J C, Yuan Y J, Xu W Q, Xie L Y, Xu T H, Yao K, Dong C Z, Zhu L F, Ma X 2017 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **408** 135
- [63] Ma X, Wen W Q, Zhang S F, Yu D Y, Cheng R, Yang J, Huang Z K, Wang H B, Zhu X L, Cai X, Zhao Y T, Mao L J, Yang J C, Zhou X H, Xu H S, Yuan Y J, Xia J W, Zhao H W, Xiao G Q, Zhan W L 2017 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **408** 169
- [64] Krantz C, Orlov D A, Bernhardt D, Brandau C, Hoffmann J, Müller A, Ricsoka T, Ricz S, Schippers S, Wolf A 2009 *J. Phys. Conf. Ser.* **163** 012059
- [65] Trabert E, Beiersdorfer P, Gwinner G, Pinnington E H, Wolf A 2002 *Phys. Rev. A* **66** 052507
- [66] Träbert E, Beiersdorfer P, Gwinner G, Pinnington E H, Wolf A 2003 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **205** 83
- [67] Träbert E, Gwinner G, Wolf A, Tordoir X, Calamai A G 1999 *Phys. Lett. A* **264** 311
- [68] 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, 许帆芹, 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]
- [69] Beiersdorfer P, Cauble R, Chantrenne S, Chen M, Knapp D, Marrs R, Phillips T, Reed K, Schneider M, Scofield J, Wong K, Vogel D, Zasadzinski R, Wargelin B, Bitter M, Goeler S V 1991 *Electron-Ion Interaction Cross Sections Determined by X-ray Spectroscopy on EBIT*
- [70] Silver E, Schnopper H, Bandler S, Brickhouse N, Murray S, Barbera M, Takacs E, Gillaspay J D, Porto J V, Kink I 2000 *Astrophys. J.* **541** 495
- [71] Kimura N, Kodama R, Suzuki K, Oishi S, Wada M, Okada K, Ohmae N, Katori H, Nakamura N 2019 *Phys. Rev. A* **100** 052508
- [72] Lu D, Yang Y, Xiao J, Shen Y, Fu Y, Wei B, Yao K, Hutton R, Zou Y 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 093301
- [73] Xiao J, Fei Z, Yang Y, Jin X, Lu D, Shen Y, Liljebly L, Hutton R, Zou Y 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 013303
- [74] Xiao J, Zhao R, Jin X, Tu B, Yang Y, Lu D, Hutton R, Zou Y 2013 *Proceedings of the 4th International Particle Accelerator Conference (IPAC2013)* Shanghai, China, May 12–17, 2013 pp 434–436
- [75] 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
- [76] Shaolong Chen, Zhiqiang Zhou, Jiguang Li, Tingxian Zhang, Chengbin Li, Tingyun Shi, Yao Huang, Kelin Gao, Guan H 2024 *Phys. Rev. Res.* **6** 013030
- [77] Liang S, Lu Q, Wang X, Yang Y, Yao K, Shen Y, Wei B, Xiao J, Chen S, Zhou P, Sun W, Zhang Y, Huang Y, Guan H, Tong X, Li C, Zou Y, Shi T, Gao K 2019 *Rev. Sci. Instrum.* **90** 093301
- [78] Zhu X L, Ma X, Li J Y, Schmidt M, Feng W T, Peng H, Xu J W, Zschorneck G, Liu H P, Zhang T M, Zhao D M, Guo D L, Huang Z K, Zhou X M, Gao Y, Cheng R, Wang H B, Yang J, Kang L 2019 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **460** 224
- [79] Morton A L, Marrs R E, Henderson J R, Knapp D A, Marilyn B S 1988 *Phys. Scr.* **1988** 157
- [80] Beiersdorfer P, Britten J A, Brown G V, Chen H, Clothiaux E J, Cottam J, Förster E, Gu M F, Harris C L, Kahn S M, Lepson J K, Neill P A, Savin D W, Schulte-Schrepping H, Schweikhard L, Smith A J, Träbert E, Tschischgale J, Utter S B, Wong K L 2001 *Phys. Scr.* **2001** 268
- [81] Morgan C A, Serpa F G, Takács E, Meyer E S, Gillaspay J D, Sugar J, Roberts J R, Brown C M, Feldman U 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 1716
- [82] Silver J D, Varney A J, Margolis H S, Baird P E G, Grant I P, Groves P D, Hallett W A, Handford A T, Hirst P J, Holmes A R, Howie D J H, Hunt R A, Nobbs K A, Roberts M, Studholme W, Wark J S, Williams M T, Levine M A, Dietrich D D, Graham W G, Williams I D, O’Neil R, Rose S J 1994 *Rev. Sci. Instrum.* **65** 1072
- [83] Christoph B, Andreas F, Gerd F, Rainer R 1997 *Phys. Scr.* **1997** 360
- [84] Currell F J, Asada J, Ishii K, Minoh A, Motohashi K, Nakamura N, Nishizawa K, Ohtani S, Okazaki K, Sakurai M, Shiraishi H, Tsurubuchi S, Watanabe H 1996 *J. Phys. Soc. Jpn.* **65** 3186
- [85] López-Urrutia J R C, Dorn A, Moshhammer R, Ullrich J 1999 *Phys. Scr.* **1999** 502
- [86] Mianhong H, Yong L, Yang Y, Shimin W, Weidong C, Wei H, Panlin G, Di L, Yunqing F, Min H, Xuemei Z, Roger H, Leif L, Yaming Z 2007 *J. Phys. Conf. Ser.* **58** 419
- [87] Schuch R, Tashenov S, Orban I, Hobein M, Mahmood S, Kamalou O, Akram N, Safdar A, Skog P, Solders A, Zhang H 2010 *J. Instrum.* **5** C12018
- [88] Dilling J, Baartman R, Bricault P, Brodeur M, Blomeley L, Buchinger F, Crawford J, Crespo López-Urrutia J R, Delheij P, Froese M, Gwinner G P, Ke Z, Lee J K P, Moore R B, Ryjkov V, Sikler G, Smith M, Ullrich J, Vaz J 2006 *Int. J. Mass Spectrom.* **251** 198
- [89] Nakamura N, Kikuchi H, Sakaue H A, Watanabe T 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 063104
- [90] Micke P, Kühn S, Buchauer L, Harries J R, Bücking T M, Blaum K, Cieluch A, Egl A, D. Hollain, Kraemer S, Pfeifer T, Schmidt P O, Schtissler R X, Schweiger C, Stöhlker T, Sturm S, Wolf R N, Bernitt S, López-Urrutia J R C 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 063109
- [91] Träbert E, Beiersdorfer P, Utter S, Brown G, Chen H, Harris C, Neill P, Savin D, Smith A 2000 *Astrophys. J.* **541** 506
- [92] Lapierre A, López-Urrutia J R C, Braun J, Brenner G, Bruhns H, Fischer D, Martínez A J G, V. Mironov C O, Sikler G, Orts R S, Tawara H, Ullrich J, V. M. Shabaev, Tupitsyn I I, Volotka A 2006 *Phys. Rev. A* **73** 052507
- [93] Mäkel V 2010 (der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg)
- [94] Schmöger L, Versolato O O, Schwarz M, Kohnen M, Windberger A, Piest B, Feuchtenbeiner S, Pedregosa-Gutierrez J, Leopold T, Micke P, Hansen A K, Baumann T M, Drewsen M, Ullrich J, Schmidt P O, López-Urrutia J R C 2015 *Science* **347** 1233
- [95] Schmidt P O, Rosenband T, Langer C, Itano W M, Bergquist J C, Wineland D J 2005 *Science* **309** 749
- [96] Zubova N A, Malyshev A V, Tupitsyn I I, Shabaev V M, Kozhedub Y S, Plunien G, Brandau C, Stöhlker T 2016 *Phys. Rev. A* **93** 052502
- [97] Li W, Gruner J, Brage T, Jönsson P 2020 *Comput. Phys. Commun.* **253** 107211

SPECIAL TOPIC—Precision spectroscopy of few-electron atoms and molecules

Experimental and theoretical research progress of $^2P_{1/2} - ^2P_{3/2}$ transitions of highly charged boron-like ions^{*}Liu Xin¹⁾ Wen Wei-Qiang²⁾ Li Ji-Guang³⁾ Wei Bao-Ren¹⁾ Xiao Jun^{1)†}¹⁾ (*Key Laboratory of Nuclear Physics and Ion-Beam Application (MOE), Institute of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China*)²⁾ (*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)³⁾ (*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*)

(Received 27 August 2024; revised manuscript received 9 September 2024)

Abstract

The precise measurement of the fine structure and radiative transition properties of highly charged ions (HCI) is essential for testing fundamental physical models, including strong-field quantum electrodynamics (QED) effects, electron correlation effects, relativistic effects, and nuclear effects. These measurements also provide critical atomic physics parameters for astrophysics and fusion plasma physics. Compared with the extensively studied hydrogen-like and lithium-like ion systems, boron-like ions exhibit significant contributions in terms of relativistic and QED effects in their fine structure forbidden transitions. High-precision experimental measurements and theoretical calculations of these systems provide important avenues for further testing fundamental physical models in multi-electron systems. Additionally, boron-like ions are considered promising candidates for HCI optical clocks. This paper presents the latest advancements in experimental and theoretical research on the ground state $^2P_{3/2} - ^2P_{1/2}$ transition in boron-like ions, and summarizes the current understanding of their fine and hyperfine structures. It also discusses a proposed experimental setup for measuring the hyperfine splitting of boron-like ions by using an electron beam ion trap combined with high-resolution spectroscopy. This proposal aims to provide a reference for future experimental research on the hyperfine splitting of boron-like ions, to test the QED effects with higher precision, extract the radius of nuclear magnetization distribution, and validate relevant nuclear structure models.

Keywords: highly charged ion, hyperfine structure, quantum electrodynamics, highly charged ion optical clock

PACS: 31.15.aj, 32.10.Fn, 33.15.Pw, 31.30.J-**DOI:** 10.7498/aps.73.20241190**CSTR:** 32037.14.aps.73.20241190

^{*} Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFA1602504) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12374228, 12393824, 12474250).

[†] Corresponding author. E-mail: xiao_jun@fudan.edu.cn



高电荷态类硼离子 $2P_{3/2} - 2P_{1/2}$ 跃迁的实验和理论研究进展

刘鑫 汶伟强 李冀光 魏宝仁 肖君

Experimental and theoretical research progress of $2P_{1/2} - 2P_{3/2}$ transitions of highly charged boron-like ions

Liu Xin Wen Wei-Qiang Li Ji-Guang Wei Bao-Ren Xiao Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 203102 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20241190

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241190>

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

高电荷态离子阿秒激光光谱研究展望

Prospect for attosecond laser spectra of highly charged ions

物理学报. 2023, 72(19): 193201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230986>

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>

磁场中HD分子振转跃迁的超精细结构

Hyperfine structure of ro-vibrational transition of HD in magnetic field

物理学报. 2021, 70(17): 170301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210512>

近玻尔速度能区高电荷态离子与激光等离子体相互作用实验研究装置

Experimental setup for interaction between highly charged ions and laser-produced plasma near Bohr velocity energy region

物理学报. 2023, 72(13): 133401 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230214>

电子束离子阱光谱标定和Ar¹³⁺离子M1跃迁波长精密测量

Spectral calibration for electron beam ion trap and precision measurement of M1 transition wavelength in Ar¹³⁺

物理学报. 2022, 71(3): 033201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211663>

稳定的高亮度低速亚稳态氦原子束流

A bright and stable beam of slow metastable helium atoms

物理学报. 2021, 70(13): 133201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201833>