基于HIAF的极端条件原子物理: 从强库仑场到超越临界电磁场的量子电动力学效应研究

马新文^{1,2*}, 张少锋^{1,2}, 汶伟强^{1,2}, 杨杰^{1,2}, 朱小龙^{1,2}, 钱东斌^{1,2}, 闫顺成^{1,2}, 张鹏鸣¹, 郭大龙^{1,2}, 汪寒冰¹, 黄忠魁¹

1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

*联系人, E-mail: x.ma@impcas.ac.cn

收稿日期: 2020-07-16; 接受日期: 2020-08-20; 网络出版日期: 2020-10-13

国家重点基础研究发展计划(编号: 2017YFA0402300)、国家自然科学基金(编号: 11611530684, U1732141, 11934004)、中国科学院先导B专项(编号: XDB21030300, XDB34020000)和中国科学院前沿科学重点研究项目(编号: QYZDY-SSW-SLH006)资助

摘要 建设中的强流重离子加速器HIAF (High Intensity heavy-ion Accelerator Facility)大科学装置将为探索从强库仑场到超越临界电磁场的量子电动力学效应研究提供全新的实验研究条件. 本文从基于现代原子精密谱学技术出发, 结合HIAF装置的结构及其能够提供离子束的特点, 总结了在HIAF及其未来升级版装置上能够开展的原子物理方向的前沿研究工作, 内容涉及超强场量子电动力学QED (Quantum Electrodynamics)效应检验、高电荷态离子中的宇称破缺、相对论能量离子原子碰撞量子少体问题、利用有质量粒子物质波进行量子力学基本假设检验等基本物理过程研究. 讨论了利用原子精密谱学与放射性核素物理结合, 开展与现代核物理的交叉研究和激光谱学技术在放射性核素物理和核能领域的应用. 探讨了利用最新激光技术——XUV (Extreme Ultraviolet)激光与储存环高电荷态离子结合开展实验研究的可能性.

关键词 HIAF, 施温格极限强场, QED真空衰变, 原子物理精密谱学, 相对论碰撞超快动力学

PACS: 31.30.Jv, 32.10.-f, 32.30.Rj, 41.75.-i, 29.27.Bd, 34.80.Lx, 52.20.Fs

1 引言

量子电动力学(Quantum Electrodynamics, QED)是描述光与物质相互作用的基本理论, 同时满足狭义相对论和量子力学, 是迄今物理学中最精确描述实验结

果的理论, Feynman称其为物理学的一颗明珠. 在氢原子等弱电磁场条件下, QED的检验精度已经到达了 10^{-10} 水平^[1], 但是在强电磁场条件下, QED的检验精度才接近1%^[2]. 因此, 极端强电磁场条件下QED的高精度实验检验面临很大挑战.

引用格式: 马新文, 张少锋, 汶伟强, 等. 基于HIAF的极端条件原子物理: 从强库仑场到超越临界电磁场的量子电动力学效应研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 112008
Ma X W, Zhang S F, Wen W Q, et al. Atomic physics at the HIAF under extreme conditions: QED effects from strong Coulomb fields to beyond Schwinger limits (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 112008, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0271](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0271)

高电荷态重离子(Highly Charged Ion, HCI)提供了极端强电磁场条件. 例如, 类氢的U离子中的1s轨道电子感受到的平均电场强度是氢原子中的 10^6 倍, 达到了 10^{16} V/cm. 因此, 通过精密测量高电荷态重离子的能级结构, 就可以在更高精度上检验强场条件下的QED效应, 深入认识真空极化和电子自能的高阶效应. 现代重离子加速器装置为产生高电荷态重离子并开展实验研究提供了重要条件^[3].

然而, QED理论进一步预言, 在超强电磁场条件下, 即场强超过施温格极限值(Schwinger Limit) 1.3×10^{16} V/cm时, 中性的真空会被超强场撕裂而变得不稳定, 可直接产生正负电子对^[4]. 但是, 在实验室中迄今还无法产生如此强的宏观电场. 国际上的超强激光装置目前只产生了接近 5×10^{12} V/cm的电磁场, 由于存在技术瓶颈, 在可见的未来也很难产生接近 10^{16} V/cm的电磁场. 而高性能的重离子加速器系统具备创造超越施温格极限超强电磁场的能力. 如果两束全裸的重离子发生碰撞, 同时保持其在质心系中的能量在库仑位垒之下, 当两个原子核接近时, 会形成瞬时的准超级原子. 例如, 对于U+U ($Z=92$)碰撞体系, 可形成 $Z=184$ 的超级原子态, 从而提供了研究超临界场QED效应的条件^[5]. 另一方面, 通过重离子储存环与先进的XUV激光技术相结合, 可将研究工作拓展到超临界强场条件下光与物质的相互作用, 探索离子电子态与激光场QED效应的动力学演化, 从而在国际上探索这个未知领域^[6].

激光技术和储存环的结合有可能将高电荷态离子谱学的精度提升到激光谱线的精度. 发展基于储存环的高电荷离子精密谱学, 可以在新的量子层次测量一些重要的物理参数. 这些研究对于检验和发展标准模型、大统一理论以及宇宙的起源和演化具有重要意义. 例如, 精密测量精细结构常数 α 是否变化是检验广义相对论等基本物理规律的重要依据^[7,8].

加速器装置提供的高电荷态离子的速度可达到接近光速. 由于相对论效应, 高电荷态离子在垂直运动方向上能够提供非常强的电磁场, 与原子分子电磁相互作用的时间尺度可以缩短至 10^{-21} – 10^{-18} s, 远小于原子分子内部电子运动的特征时间, 类似于超短和超强的电磁脉冲. 因此, 相对论高电荷态离子是研究原子分子内部电子关联动力学、分子团簇库仑爆炸动力学的超快时间探针. 另一方面, 我国正在建设中的强流重离

子加速器装置HIAF (High Intensity heavy-ion Accelerator Facility)^[9,10]和中国加速器驱动次临界装置CiADS (China Initiative Accelerator Driven System)^[11]都能够有效产生放射性核素离子, 发展和利用激光光谱技术测量放射性核素原子的超精细结构以及原子的电子能级同位素移位(或者同核异能态移位)来提取原子核的基本性质, 研究原子核的内禀结构, 是检验和发展不稳定核区原子核理论的重要依据, 为原子物理精密谱学与现代核物理的交叉研究提供了广阔的舞台^[12,13].

通过实验室认识这些极端相对论速度, 极端强电磁场条件下相互作用, 不但为基础科学问题的研究, 而且为极端环境天体物理等高能量密度物理研究和恒星内部、超新星爆炸等极端天体物理研究提供可靠的基本参数, 为探索宇宙中极端条件下的物理效应打开了一扇新的窗户.

本文从以下三个方面展开: 第二部分论述了通过原子精密谱学技术研究强场和超强场量子电动力学QED效应和宇称破缺等基本物理现象; 第三部分讨论了粒子与原子分子碰撞动力学的量子少体问题, 涉及量子力学基本假设检验、强场相对论碰撞动力学和离子超快电离过程及其在分子团簇空间结构演化研究方面的应用. 第四部分讨论利用原子物理精密谱学开展与现代核物理的交叉研究方向.

2 (超)强场量子电动力学QED效应检验

2.1 超临界场量子电动力学效应探索

QED理论预言, 在电磁场强超过施温格极限值 1.3×10^{16} V/cm时, 中性的真空会被超强场撕裂而变得不稳定, 直接产生正负电子对^[14]. 如图1所示, 理论研究表明, 对于非点电荷, 当核电荷数 Z 超过173时, 其1s轨道束缚能将跨越正负电子对产生能隙 $2m_e = 1.022$ MeV, 从而能够诱发真空衰变而产生正负电子对^[15]. 由于自然界中最重的铀元素的核电荷数 $Z=92$, 无法达到超临界强场条件, 目前人工合成的超重元素也无法达到超临界强场条件. 但是, 最新的理论研究表明^[3], 可以使两个重离子发生碰撞, 它们的核电荷数之和超过173 (例如 $U^{92+}+U^{92+}$), 在两个原子核接近的瞬间形成超强场而激发正负电子对. 如果两束全裸的重离子发生碰撞, 同时保持其在质心系中的能量在原子

图1 (a) 在离子碰撞中单粒子Dirac方程的能量图谱^[16]; (b) 超级原子序数(Z_1+Z_2)与内壳层束缚能级的关系, 在 Z_{UA} 大于173时, 1s能级空穴已经能够潜入Dirac海中^[17]

Figure 1 (a) Electron-positron pair creation mechanisms for ion collisions in the frame of single ion Dirac equation [16]. (b) United atom formation of (Z_1+Z_2) versus inner-shell electronic vacancies, the 1s vacancy will dive into Dirac sea when the atomic number of united atoms Z_{UA} is greater than 173 [17].

核反应的库仑位垒之下, 当两个原子核接近时, 会形成瞬时的准超级原子(United Atom). 例如, 对于U+U ($Z=92$)碰撞体系, 可形成 $Z_{UA}=184$ 的超级原子态. 这个超级原子的1s电子态空穴会潜入狄拉克海负能量连续态, 造成电子通过遂穿狄拉克正负电子能隙而填充1s态, 同时在狄拉克海产生一个空穴, 即正电子的产生. 此过程就是“自发电子对产生”(Spontaneous Electron-Positron Pair Creation)^[14], 也称之为QED真空衰变. 由于裸离子中的1s电子轨道是空的, 理论预言束缚-自由电子对产生的概率相对于非裸离子碰撞固体靶要大两个量级, 这为深入探索超强场QED效应提供了全新的机遇.

实验研究需要从亚临界场到超临界场的场强区域探索相关的动力学过程, 从而能够提供清晰的证据来证实或者否定1s能级潜入狄拉克海的过程以及由此导致的自发电子对产生机制, 从而深入理解超强场QED效应. 目前的理论研究给出超临界场条件下三种正负电子对产生机制: 自由-自由正负电子对、束缚-自由正负电子对和自发正负电子对, 如图1所示. 前两者在通常的离子碰撞中都会产生, 属于动力学产生机制. 而自发正负电子对产生机制是超强场条件下的特殊机制, 迄今还没有实验证据. 但是有关超级原子和“超临界态”的形成和诱发正负电子对产生的理论研究同样面临巨大的挑战, 国际上正在从简化的单极理论(Monopole Approximation)^[18]向双中心理论发展^[3,5], 有望在未来几年取得突破性进展. 如果实验不能证实这些预

言, 则需改写目前这类描述强场的QED理论, 建立新的超强场QED理论模型.

另外一方面, 全裸的重离子与类氢等非全裸的重离子在碰过程中有可能形成瞬时的准分子体系, 甚至是超级原子. 超级原子是可观测的吗? Schwinger临界场强达到了吗? 碰撞过程可能伴随的电离、激发、辐射-激发和共振激发等过程, 这些都是超强库仑场条件下未知的课题, 需要理论研究, 也需要实验设计特殊的装置进行探寻.

我国正在建造的强流重离子加速器装置HIAF, 未来计划升级建成双储存环合并束的新结构, 为开展全裸或者类氢重离子碰撞实验提供条件, 并利用电子、正电子、X射线和散射离子的符合测量, 鉴别电子对的产生, 测量与碰撞参数相关的电子对产生截面、电子对的能量分布和出射角分布等特性, 探索电子-正电子相互作用对电子对产生和电子对组态的影响, 检验超临界库仑场中QED效应.

2.2 高电荷态离子精密谱学检验超强场QED效应

检验强电磁场中QED效应是物理学的前沿研究领域之一, 高电荷态离子提供了研究强场中的量子电动力学效应的理想手段和环境^[19,20]. 如图2所示, 类氢 U^{91+} 离子中1s电子感受到的平均电场强度达到了 10^{16} V/cm, 是氢原子中的 10^6 倍, 也远远大于目前实验室能够产生的任何强场的电场强度. 通过精密谱学实验测量高电荷态离子的电子能级结构, 提取1s轨道电

图2 类氢铀离子中1s电子感受到的库仑电场强度
Figure 2 Coulombic field strength experienced by the 1s electron in the hydrogen like uranium ions.

子的兰姆移位(Lamb Shift)、2s-2p轨道能级分裂值,就能够在更高精度上检验强场QED中的真空极化和电子自能等阶效应。利用加速器和储存环能够产生和操控元素的同位素高电荷态离子,因此可以沿着等电子序列的高电荷态离子开展精密谱学测量,这能够独特探索电子-电子关联效应和相对论效应。

目前, HIAF装置中的高精度谱仪SRing上的高电荷态离子精密谱学实验研究规划主要包括以下4类^[6]: 双电子复合(Dielectronic Recombination, DR)精密谱学实验、离子束精密激光光谱学、内靶X-ray精密谱学实验以及内转换电子精密谱学实验。其中,基于HIAF装置SRing上配备的电子冷却设备和独立的超冷电子靶,能够在连续冷却离子束的同时精确调节电子靶的能量,为开展高电荷态离子的高精度DR精密谱学研究提供了更高精度的实验平台。HIAF-SRing上的DR实验装置原理如图3所示,拟开展类氢、类锂高Z高电荷态离子的DR实验,精确测量1s-2p, 2s-2p/3p等跃迁过程对应的从低激发态到里德堡态系列DR共振峰,从而获得高精度跃迁能量,通过与国际上最先进的理论计算结果进行比较,提取兰姆位移,研究QED效

图3 在SRing电子冷却器和电子冷靶上开展DR实验的装置示意图,产生的复合离子会在电子装置下游的第一块二极铁从主束分离,并被位置灵敏探测器记录

Figure 3 Schematic view of DR experimental setup at the electron target of SRing. The recombined ions will be separated from the stored primary ion beam after the first dipole magnet in the downstream of the electron target and recorded by a particle detector.

应、相对论效应以及电子关联效应。

HIAF-SRing上的内靶X-ray精密谱学实验装置配备了气体内靶和高纯锗探测器阵列以及晶体谱仪,能够对截面很小的双电子过程进行细致的X-ray精密谱学实验研究。例如,辐射双电子俘获(Radiative Double Electron Capture, RDEC)和双电子单光子跃迁(Two-Electron-One-Photon, TEOP)等奇异过程,测量高电荷态离子与原子碰撞中的X射线能谱及其角分布,得到电子-电子交换反对称性关联和电子-辐射场相互作用的信息,进而检验QED高阶效应和电子关联。

此外,利用未来先进的重离子加速器及冷却储存环装置,可以采取多种方式制备裸核或少电子(类氢或类氦等)体系的原子核激发态,这为超高精度内转换电子谱学提供了机遇。这类原子核衰变触发的内转换过程产生的内转换电子在实验室坐标系的能量高达1 MeV,通过建设零度角高精度电子能谱仪,能够实现高能内转换电子的高精度测量。

储存环装置上计划发展的先进高灵敏度零度角高精度电子磁谱仪如图4所示。利用HIAF装置提供的动量和能量精确已知的超高亮度和冷却的高品质高电荷态离子束流,通过控制离子种类以及特定的原子核激发态,充分利用内转换这一准共振过程中出射电子能量远小于1s电子束缚能的独特优势,显著降低内转换电子能量测量的不确定度,在 10^{-6} 水平上高精度测定类氢离子1s电子束缚能,实现对1s能级QED贡献的测量达到0.01%精度,将强库仑场QED检验精度推向新高度。

2.3 重离子储存环上高电荷态离子精密激光光谱学实验

通过冷却技术在重离子储存环中获得高品质的离

图4 用于储存环内靶实验的零度角电子磁谱仪和内转换电子谱学原理示意图. 其由两级谱仪构成: 第一级引出电子, 第二级是高性能谱仪

Figure 4 Schematic view of the zero-degree electron spectrometer at the internal target of storage ring. It is a double stage spectrometer, the 1st stage is to extract the electrons and the 2nd stage is high performance spectrometer.

子束是开展高精度原子核物理实验和原子物理实验研究的独特基础^[21,22]. 相对于已经比较成熟的随机冷却^[23]和电子冷却^[24]技术, 离子束激光冷却技术具有冷却速度快、冷却作用力强等特点. 此外, 储存环上重离子束的激光冷却研究还在不断发展, 理论预言激光可以将离子束冷却到极低温度(mK)^[25]. 重离子储存环上的高电荷态离子精密激光光谱学实验精度主要取决于离子束品质, 包括离子束纵向动量展宽和离子束横向发射度, 以及离子束能量的精确测量, 因此在激光冷却实验的基础上开展高电荷态离子的精密激光光谱学实验, 有望获得激光线宽量级的实验精度(2×10^{-6}), 远优于现有检验精度($\sim 2 \times 10^{-5}$), 使得检验强库仑场条件下的QED理论达到更高精度^[26]. 此外, 重离子储存环上高电荷态离子的精密激光光谱学测量还可以高精度地检验狭义相对论^[27], 开展原子核性质精密测量^[28].

在高电荷态离子精密激光光谱学实验中, 随着离子电荷态的增加, 对核外电子的束缚能会逐渐增大. 如类锂、类钠离子的 $2s \rightarrow 2p$, $3s \rightarrow 3p$ 能级跃迁的波长随核电荷数增加而逐渐减小, 并且绝大部分处于XUV波段(10–100 nm)甚至波长更短的X射线波段(< 10 nm)^[29]. 这要求使用波长极短的激光, 即XUV激光甚至X射线激光, 另外一种选择是在储存环上利用相对论高能量重离子束的巨大Doppler效应开展相关实验测量. 图5展示了使用一束波长为220 nm的紫外激光开展类锂、类钠离子的 $2s \rightarrow 2p$, $3s \rightarrow 3p$ 精细结构能级跃迁能量测量实验对储存环磁刚度的要求. 目前HIRFL-CSR上的重离子储存环CSRe的磁刚度只有9.0 Tm, 使用波长为220 nm的激光只能开展 O^{5+} 及核电荷数更低的类锂离子精密激光光谱学实验(图5). 要测量更高电荷态的离子的精细结构能级跃迁能量, 则需要磁刚度更大的储存环. HIAF上储存环的最大磁刚度为34 Tm, 极大地增加了可以开展精密激光光谱学实验的离子种类, 为开展更高电荷态与更高能量离子的精密激光光谱学实验提供了良好的实验平台^[30].

另一方面, 基于高次谐波方法产生XUV激光技术的快速发展, 先进的XUV激光将能够提供几十eV甚至keV能量的光子束, 从而为直接开展高电荷态离子的精密激光光谱学实验测量提供新的机遇^[31]. 使用XUV激光与重离子冷却储存环结合的方法, 有望实现类锂 $^{238}\text{U}^{89+}$ 离子束的“白光冷却”, 获得动量展宽极小的

图5 利用波长220 nm的激光开展类锂离子和类钠离子的激光冷却实验对储存环磁刚度的要求

Figure 5 Required magnetic rigidity of a storage ring versus atomic number Z of Li- and Na-like ions for a wavelength fixed at 220 nm.

超高品质离子束并开展精密激光光谱学实验. 图6(a)展示了在重离子储存环上使用一束XUV激光开展类锂 $^{238}\text{U}^{89+}$ 离子的 $2s_{1/2}(1s^2 2s) \rightarrow 2p_{1/2}(1s^2 2p)$ 能级跃迁精密测量实验的原理简图^[32]. 通过探测与离子束共振相互作用时XUV激光的波长及在离子运动方向退激发射的X射线波长, 从而精确测量离子共振跃迁能量, 精度可以达到激光的线宽, 有望在超高精度检验强库仑场QED效应方面获得突破.

此外, 基于HIAF还可以利用精密激光光谱学方法开展高电荷态离子同位素移动和超精细分裂结构测量从而获取与原子核相关的参数. 对于不同的同位素, 由于原子核的质量和电荷分布的差异会造成同位素移动现象. 通过精密激光光谱学方法开展同位素移动测量, 精度有望达到激光的线宽. 对于核自旋 I 不为零的类锂离子

子, 其基态和激发态能级会发生超精细分裂. 如图6(b)所示, 使用两束激光将处于不同下能级的电子激发至同一上能级, 通过同时测量与离子共振相互作用的激光波长及在离子运动方向退激发射的X射线的波长, 可以精确地测量离子的超精细能级跃迁能量^[32]. 利用精密激光光谱学方法可以测量高电荷态离子的同位素移动和超精细结构, 进而提取原子核的核磁矩、电荷均方根半径等重要物理量^[26].

2.4 高电荷态离子中的宇称破缺

李政道和杨振宁^[33]为解释 θ - τ 之谜提出了弱相互作用中宇称不守恒概念, 因为这一划时代的工作他们获得了1957年的诺贝尔物理学奖. 宇称不守恒现象已经成为研究超出标准模型新物理的一个重要方向, 宇称不守恒也称为宇称破缺. 在原子系统中, 宇称破缺也是一种检验低能电弱理论的非常独特和有效的方法, 并通过精密测量来寻找超出标准模型新物理的重要方向^[8]. 目前, 原子物理高精度理论计算和精密实验测量获得巨大进展, 原子宇称破缺研究已经在物质基本结构的研究中成为高能物理实验的重要互补.

原子宇称不守恒(Parity Nonconservation, PNC)或者原子宇称破缺(Atomic Parity Violation, APV)的设想首次由苏联著名理论物理学家Zeldovich^[34]在1959年提出, 弱相互作用中电子与原子核通过中性玻色子 Z^0 相互作用可导致原子能级的宇称破缺, 当时他认为这个效应太小, 实验上几乎不可能探测到. 但是后来的研究发现这个效应依赖于原子序数 Z 的三次方^[35,36], 因此选择重原子开展相关实验成为可能. 随着激光技术的发展, 第一个成功的原子物理PNC实验是1978年在苏联的新西伯利亚完成的^[37]. 1997年, Masterson研究组^[38]完成的铯原子 $6s$ - $7s$ 跃迁的精密测量是目前精度最高的PNC检验实验.

与Wu等人^[39]进行的钴60原子核实验直接测量弱作用导致的 β 衰变方法不同, APV实验是寻找非零的电偶极禁戒跃迁过程, 或者说原子宇称不守恒实验是要在非常强的电磁相互作用过程中寻找弱相互作用的信号. Laporte规则告诉我们, 如果原子物理中宇称守恒, 一个自然的结论就是具有相同宇称的初末态对应的电偶极(E1)跃迁振幅 $T_{fi}^{E1}=0$, 即电偶极跃迁是严格禁戒的. 反之, 宇称不守恒就会导致电偶禁戒跃迁振幅不为零. APV实验的主要目的就是寻找Laporte规则被

图6 (a) 重离子储存环上使用一束XUV激光开展类锂 $^{238}\text{U}^{89+}$ 离子的 $2s_{1/2}(1s^2 2s) \rightarrow 2p_{1/2}(1s^2 2p)$ 能级跃迁精密测量的实验原理简图. (b) 重离子储存环上使用两束激光开展类锂离子超精细结构能级跃迁能量测量实验原理简图

Figure 6 (a) Schematic view of working principle using a XUV laser to cool Li-like uranium ions $^{238}\text{U}^{89+}$ via the transition $2s_{1/2}(1s^2 2s) \rightarrow 2p_{1/2}(1s^2 2p)$ at the storage ring. (b) Schematic view of measurements of hyperfine transitions in Li-like heavy ions using two laser beams at the storage ring.

破坏的程度. 具体来说, 原子宇称不守恒过程是通过电子与夸克交换 Z^0 玻色子($M_Z \sim 91 \text{ GeV}/c^2$)实现的, 相互作用的哈密顿量可以写为

$$H_{PV} = \frac{-G_F}{\sqrt{2}} \sum_q (C_q^{(1)} \bar{e} \gamma_\mu \gamma_5 e \bar{q} \gamma^\mu q + C_q^{(2)} \bar{e} \gamma_\mu e \bar{q} \gamma^\mu \gamma_5 q),$$

其中 $G_F \approx 1.166 \times 10^{-5} (\hbar c)^3 \text{ GeV}^{-2}$ 是费米弱作用常数, e 和 q 代表电子和夸克的场算符; γ_μ 代表Dirac矩阵, γ_5 是与赝标量相关的Dirac矩阵, $C_q^{(1)}$ 是电子轴矢量流和夸克矢量流的耦合常数, $C_q^{(2)}$ 是电子矢量流和夸克轴矢量流的耦合常数. 假设核子是非相对论运动, 并且不考虑质子和中子的分布差别, 简化后的相互作用哈密顿量为

$$H_{\text{PNC}} = \frac{G_F}{2\sqrt{2}} Q_W \gamma_5 \rho(r),$$

其中 $\rho(r)$ 是原子核密度, Q_W 是原子核弱电荷. 原子物理APV实验中由于PNC效应引起的贡献为 $E_{\text{PNC}}^{\text{experiment}} = E_{\text{PNC}}^{\text{theory}} \cdot Q_W^{\text{inferred}}$, 结合原子理论计算可以提取弱电荷 Q_W , 与弱电理论计算值进行比较来检验标准模型. 铯原子6s态到7s态的跃迁实验结果与标准模型理论结果偏离 1.5σ ^[38], 这表明需要通过更精确的实验来确认原子宇称破坏与标准模型理论是否一致.

原子的宇称不守恒实验除了上述铯原子的能级跃迁测量, 还包括: (1) Yb原子同位素的宇称不守恒实验^[40], 这类实验的优点是它们的原子结构类似, 理论上通过比值相消可以降低对于原子性质理论计算的要求. (2) 核矩结矩(Nuclear Anapole Moments, NAM)测量^[38]. 核矩结矩由Zel'dovich和Vaks首次提出, 是一个宇称反演对称破坏, 而时间反演对称守恒的量(图7). Wieman研究组^[41]开展了相关实验. NAM的测量也将为强子宇称破坏的研究提供重要信息.

目前基于中性原子的APV实验仍在继续提高精度, 但中性重原子实验面临的一个很大的问题是多电子体系的理论计算精度难以大幅度提高. 原子宇称破坏原理是因为能级跃迁的电磁相互作用中存在弱相互作用成分, 而由于弱作用的中间玻色子重达几十GeV, 这类相互作用的力程非常短, 具体计算中往往近似成接触相互作用. 当原子序数 Z 比较大时, 所有核外电子的效应以及关联作用都需要仔细考虑, 才能提取出非常弱的中间玻色子导致的弱相互作用贡献, 这是此类

图7 核矩结矩示意图

Figure 7 Schematic view of nuclear anapole moments.

研究面临的困难. 目前实验精度已经高于理论计算的精度, 但近期还没有很好的方案提高理论精度.

利用高电荷态离子(HCI)的宇称破缺研究有可能突破这个限制^[42]. 因为类氢或者类氢高电荷态离子核外只有一个或者两个电子, 对于少于5个电子的体系目前最新的理论计算已经可以达到非常高的精度^[8]. 结合重离子加速器和储存环技术有望超越中性原子物理APV实验精度, 从而为检验弱电理论以及发现超越标准模型的新物理提供新的窗口. 目前已提出多个利用重离子加速器开展高电荷态离子PNC实验的理论方案, Labzowsky等人^[43]提出的一个基本思路与早期Wu等人的 β 衰变实验类似. 在加速器中加速并极化类氢 Gd^{62+} 或者 Eu^{61+} 离子, 然后通过测量其衰变光子来检验宇称破坏^[43]. 目前这个实验方案面临的主要困难是如何保持高电荷态离子的极化率. 按照估算, 为了达到需要的精度, 上述实验方案需要磁场的精度保持在 10^{-10} , 这远远超出了目前的实验能力^[44-46]. Shabaev等人^[47]提出在重离子储存环上利用不同极化方向的深紫外激光与类氢离子的 $2^3S_1-2^1S_0$ 相互作用, 探测退激光子研究PNC效应, 并且深入讨论了类氢 Gd^{62+} 和 Th^{88+} 离子对应的共振跃迁截面等, 目前该实验方案主要受制于激光强度以及离子束制备的限制. 最近, Zaytsev等人^[48]提出在重离子储存环上利用双电子复合精密谱学实验方法研究PNC效应, 但实验需要超冷极化电子靶, 测量类氢离子与极化电子的双电子复合截面信息. Bondarevskaya等人^[46]进而提出在重离子储存环中利用类氢的高电荷态离子 Eu^{62+} 俘获极化电子探测其

退激光研究PNC效应的实验方案. 目前, 国际上还没有利用高电荷态离子研究PNC效应的实验结果, 我国正在运行的兰州重离子加速器冷却储存环已经成功开展了高电荷态重离子的激光冷却和双电子复合精密谱学实验^[26,49], 为开展高电荷态离子PNC效应前期探索研究提供了实验条件. 目前我们正在与相关理论讨论更细致的实验方案, 包括极化电子靶以及极化离子束等, 计划未来在HIAF上开展高电荷态离子的PNC实验, 在更高精度上验证标准模型, 寻找新物理的信号^[50].

3 量子少体问题

3.1 量子力学基本假设检验: 利用物质波开展局域实在性检验

2005年, *Science*期刊为纪念建刊125周年推出专刊, 遴选出125个未解的科学难题. 其中量子力学的不确定原理和非局域实在性的内在本质位列第21个科学难题^[51]. 量子理论中的非局域实在性因违反相对论“任何速度不能大于光速”的设定而受到科学界极大的关注, 目前国际上开展的相关研究基本上都是利用光子为研究对象, 而且相关研究结果都支持了非局域实在性的预言. 但是, 光子具有的零静止质量以及在任何参考系下速度恒定为 c 的特殊属性, 决定了用光子开展局域实在性研究欠缺普适性. 利用大型加速器产生的不同能量的离子开展局域实在性研究具有独特的优势: (1) 重离子、电子具有静止质量, 因此具有非常强的空间局域性, 同时又有明显的波动性(波粒二象性), 相对于光子来说更具普适性; (2) 可以通过调整重离子能量, 利用相对论时间膨胀效应不同程度地“放缓”量子世界的“时钟”, 为检验局域实在性提供了时间参量(例如, 1 GeV/u动能的氢分子离子上的电子运动周期约是实验室坐标系下的2倍, 随着能量的进一步提高, 电子在分子中的运动频率将进一步放缓, 接近光速情况下时间将被几乎“冻结”). 未来大科学中心的高能加速器HIAF能够提供具有相对论能量的氢分子离子, 并与原子发生碰撞, 利用氢分子离子的电子构成的“量子双缝”研究原子物质波的干涉效应^[52], 通过干涉条纹的消失以及变化, 可深入研究氢分子离子中起“杨氏双缝”作用的电子究竟是局域实在的实体粒子还是量子力学“暗示”的非局域实在的概率幅本质. 利用具

有质量的粒子开展局域性研究, 从“时间”属性上探索量子力学基本原理是一个全新的切入点, 相关研究对深入理解量子力学基本假设具有重要意义.

3.2 强场相对论碰撞动力学

重离子能够产生高达 10^{15} V/cm强度的电场, 是目前实验室能够获得的场强极限, 高于当前最强激光产生场强约3个数量级. 如果利用高能重离子的相对论尺缩效应, 未来大科学中心加速器HIAF将能够产生 10^{15} – 10^{17} V/cm的电场强度, 其与原子碰撞的时间尺度将由阿秒(10^{-18} s)缩短至仄秒(10^{-21} s). 由于光学衍射极限的限制, 在很长的一段时间内还无法制造出能够产生相同时间尺度的超短激光器. 在这种极端条件下, 相对论效应变得非常明显, 为开展相对论碰撞量子少体动力学实验研究提供了必要的条件. 相对论碰撞量子过程涉及量子与相对论两大理论体系的交叉, 是一个全新的研究领域. 通过对量子体系中的时间膨胀、长度收缩、横向多普勒效应、质速关系、质能关系等相对论效应的研究, 有助于进一步理解这两大理论的建立基础: 在两种理论都必须适用的体系中寻找新的物理. 相对论碰撞动力学这一科学前沿问题有可能发展成一个新的研究领域.

相关研究的重要应用价值在于: 宇宙中存在大量的相对论速度离子, 这些重离子对太空器件、生物组织的作用严重影响人类的太空活动, 相关的防护措施的实施有赖于这些相对论量子少体动力学模型的正确建立. 通过大科学中心高能加速器产生的相对论能量离子与原子分子碰撞, 研究电离、俘获以及激发等过程, 测量相应动力学过程的全微分截面, 通过与理论结果的对比探索检验量子与相对论两种理论在动力学过程上的统一.

3.3 动力学相位测量与调控: 离子与原子、分子碰撞过程的全息成像

干涉和衍射本质上是若干通道概率幅相位周期匹配的直接结果, 相位的相干与相消决定了微观过程的反应截面的增大和降低, 因此可以通过相位调控实现对量子过程的控制. 近10年来, 超快脉冲激光器的出现实现了光与原子分子作用过程中相位测量与控制. 但是, 在离子与原子分子碰撞中, 炮弹离子库仑势的长程属性使得实验难以界定碰撞反应的起点与终点, 相

位测量非常困难. 近期, 科研人员利用重离子与分子散射中的物质波干涉效应成功提取出碰撞动力学相位^[53]. 在离子与原子碰撞的100多年的实验研究历史中, 该工作实现了对散射相位的测量, 为进一步开展相位控制的离子与原子散射过程研究奠定了坚实的基础.

通过相位的调控实现对碰撞过程的精准控制是一种新的研究手段, 将会促进对量子少体问题有更深层次的理解与认识, 对离子束(物质波)相干等领域研究产生深远影响. 利用未来大科学中心加速器产生的不同波长(能量)的离子物质波散射至非对称双原子分子形成的量子狭缝上, 通过测量物质波杨氏双缝干涉条纹的移动提取碰撞动力学过程的相位, 使得我们能够从相位的角度研究离子与原子分子碰撞过程, 并探索通过相位调控碰撞过程的方法.

3.4 离子超快电离动力学: 分子团簇空间结构演化及库仑爆炸动力学

基于加速器的库仑爆炸成像技术, 最初由加速器加速分子阳离子(如 CH_4^+)到百分之几的光速, 使其通过纳米厚度的金属箔而剥离其中的大部分电子, 形成高电荷态离子. 随后, 在库仑排斥作用下, 分子阳离子中的各碎片会相互排斥逐渐远离, 最终可以将反应碎片投射到探测器平面上, 重构出库仑爆炸时刻分子阳离子的结构^[54]. 由于剥离电子的时间尺度小于100阿秒, 可以认为在此时间尺度分子内的原子核没有运动, 那么重构出的末态分子阳离子的结构将与初始阳离子的结构相同. 通过使用这种称为金属箔诱导的库仑爆炸成像(CEI)的技术, Herwig等人^[55]在2013年实现了同位素标记的手性环氧乙烷的阳离子结构成像.

然而, 这种方法无法实现对科学界感兴趣的中性多原子分子和弱束缚团簇的成像. 而利用HIAF装置产生的高能高电荷态重离子则可实现上述分子/团簇的结构成像. 由于高能高电荷态重离子具有极快的速度和极强的库仑势能, 它与团簇或分子碰撞时, 可以在“瞬时”(亚阿秒时间尺度)剥离分子/团簇的多个外层电子, 形成多电荷态的分子/团簇离子. 由于分子离子内部库仑排斥作用, 这些分子/团簇离子不稳定, 会发生多体库仑爆炸. 利用动量显微成像谱仪, 可以实现库仑爆炸产生的碎片离子成像, 从而能够重构分子/团簇的几何结构.

团簇中的原子(分子)通过范德瓦尔斯键、氢键等作用相互关联, 即每个原子(分子)都处于其他原子(分子)构成的环境中, 由此会造成与孤立原子(分子)的动力学不同的环境效应. 例如, 激发态离子与环境原子之间的能量交换——原子间库仑退激^[56]、高电荷态离子与环境原子之间的电荷交换——辐射电荷转移^[57]、分子二聚体之间的质子转移^[58]和重离子转移^[59]等, 能够解释弱束缚体系下的新现象, 并在等离子体物理、星际大气、辐射损伤等领域具有重要的应用价值^[60,61].

利用HIAF装置上产生的超高电荷态离子与团簇碰撞, 可以在超高库仑势能的作用下, 瞬间诱导团簇的三体碎裂, 从实验获得的动能释放、电子能谱分布与环境离子存在的关联, 探讨环境离子的存在对分子电离和解离机制的影响. 这些机制的研究, 将为解释弱束缚体系中的相关实验现象提供新思路, 加深对重离子辐照物质和生物组织诱发的辐射损伤、基因突变的理解.

4 原子物理精密光谱学与现代核物理的交叉

4.1 原子精密光谱与放射性核素的核结构和核性质

现代原子激光光谱技术可以精密地确定原子最外层电子的能级结构, 甚至可以精确测量同位素原子因其原子核的质量、尺寸、核矩和质子分布改变引起的电子能级的轻微变化. 由此, 原子精密光谱技术可以同时确定原子核的自旋、磁矩、电四极矩和电荷半径4个原子核性质基本参数^[62]. 这些原子核基本参数是表征核内核子有效相互作用的基本物理量, 而远离稳定线的放射性核素, 尤其是近核子滴线的放射性核素和超重核素的核内有效相互作用性质理论预计会发生显著变化, 对其的研究将拓展我们对原子核结构的认知和理解.

原子精密光谱技术测量原子核性质参数, 具有灵敏度高、分辨率好、适合在线测量等优势, 甚至可以在线测量那些产额低至20 ions/s、寿命短至10 ms的放射性核素^[63]. 更重要的是, 通过原子光谱法得到的原子核基态性质参数与原子核结构模型无关, 是独立检验和发展核结构理论的关键依据. 因此, 原子精密光谱方法现已成为研究短寿命放射性核素核结构和核性质的首选方案. 直到目前, 在所有已合成的3000多种核

素中, 原子精密光谱方法已经成功研究了所有稳定核素和近70个同位素链的近900个放射性核素^[12,62,64], 推动了以晕核、幻数变化和核形状共存等问题为代表的新一轮核物理研究的热潮。

如图8中所展示的, 在远离稳定线的近核子滴线区域和超重核素区域, 还存在着大量产额低、寿命短的放射性核素未被研究. 这些原子核是弱束缚体系, 会呈现出更加奇特的、甚至全新的结构形态, 有助于进一步理解和研究核内的有效相互作用. 依托HIAF装置, 通过融合蒸发反应和多核子转移反应可以获得中重质量的丰中子核素、近中子/质子滴线核素、超重核素等远离稳定线的放射性核素, 利用原子精密光谱方法开展核结构和核性质研究, 将揭示可能的新现象和新物理。

4.2 基于激光共振电离技术纯化ADS-ISOL放射性核素离子束

加速器驱动次临界装置ADS (Accelerator Driven Sub-critical System)提供的强流质子束, 结合在线同位素分离方法(Isotope Separation On Line, ISOL)建造新一代ADS-ISOL装置, 将产生种类更多、产额更高的放射性核素离子. 此时, 一条“干净”的放射性核素离子束, 即没有来自同位素(Isotope)、同质异位素(Iso-bar)、甚至同核异能素(Isomer)等“杂质”影响的离子束, 将为核衰变谱学、核结构与核性质研究提供机遇。

图8 激光光谱测量核素分布图. 其中, 黑色方块表示稳定核素, 灰色方块表示已知的放射性核素, 红色方块表示利用激光光谱方法测量的放射性核素^[12]

Figure 8 Laser spectroscopy in the nuclear chart. The black, gray and red squares indicate the stable and very long-lived nuclei, the known radioactive isotopes, and radioactive isotopes for which laser spectroscopy was performed, respectively [12].

ISOL装置的优点是结构相对简单、运行可靠, 能够提供的放射性核素种类多、能量低、能散小等; 但是, 存在的问题是有大量的同位素、同质异位素和同核异能素离子的混合. 传统的加速器质谱方法质量分辨 $m/\Delta m \sim 1000$, 仅可以在离子束中区分同位素离子, 很难区分同质异位素, 更不可能分开混杂的同核异能素离子。

原子的多光子共振电离, 是指原子多步共振吸收多个不同频率的光子进而实现电离的过程, 其中的共振吸收过程涉及原子最外层电子的基态和激发态的超精细能级结构. 利用不同元素原子的电子结构的唯一性, 借助多光子共振电离技术就可以区分质子数、核质量和核能级不同的原子, 进而实现放射性核素离子束的提纯^[65], 为核衰变谱学实验提供种类更多、束流更强、成分单一的放射性核素离子束, 探索丰中子放射性核素的衰变特性。

4.3 原位检验ADANES核燃料组分的激光光谱分析技术

ADANES (Accelerator Driven Advanced Nuclear Energy System)是ADS技术的创新性发展, 是集乏燃料嬗变、增殖、核能发电三大功能于一体的一种先进的核燃料闭式循环技术^[66]. 在ADANES的闭环运行中, 原位检验各环节关联到的核燃料的质量指标(主要包括关键放射性元素的含量和部分同位素的丰度比)对ADANES机组的实时控制和优化运行尤其重要. 但传统的核燃料质量检验方法需要对原料采样后进行离线分析, 从采样、制样到检验结果的报出至少需要几个小时, 严重滞后于ADANES运行参数的实时调整需求。

20世纪后期发展起来的激光诱导击穿光谱技术(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)是激光光谱领域新兴的物质分析技术^[67], 为解决上述难题提供了极具潜力的可能性. LIBS的工作原理是以激光作为激发源与物质相互作用形成等离子体, 然后以等离子体作为辐射光源, 通过高分辨光谱仪记录发射光谱, 运用光谱学知识实现物质组分含量的分析. 由于LIBS技术相对于传统的方法具有便捷、快速、远距离、无需样品预处理、同时多元素分析等优势, 已经广泛应用于许多领域. 然而将LIBS技术推广应用到ADANES系统中, 面对的分析物质(乏燃料)具有以下特点: (1) 以复杂颗粒的形态(结构松散、粒径不单一、组分混

合不均匀等)存在于工业现场; (2) 工业现场是一个强辐射环境; (3) 拟分析的组分属于微量级的裂变产物和超铀核素(大都属于放射性元素). 这些放射性元素的核外电子众多, 原子光谱非常复杂且公开数据稀少; 电离能较低, 在等离子体中非常容易电离产生离子, 原子与离子谱线混合使得光谱鉴别困难; 具有较多的同位素, 加大了谱线的鉴别难度. 现有的LIBS技术用来分析具有复杂颗粒状乏燃料中关键放射性元素的含量和部分同位素的丰度比无法得到期望结果.

通过系统研究LIBS分析性能在类ADANES复杂工程环境的影响, 攻克在类ADANES工程环境下获得LIBS高分析性能的技术难关, 有望研发能够在线服务于ADANES工程的LIBS分析设备.

4.4 离子电子结构对原子核衰变的影响

最新的研究表明, 原子的电子壳层结构对原子核的衰变具有重要的影响, 甚至可以打开或者关闭/禁戒某一种原子核的衰变通道. 例如, 太阳中微子流量就涉及不同电荷态的铍-7离子的 β 衰变速率和相关的中微子产额问题; 高电荷态离子的束缚态 β 衰变打开了中性原子中能量禁戒的 β 衰变通道. 由于核外电子的跃迁与原子核的内部结构变化耦合在一起, 利用电子共振过程可以直接探测核能级信息.

理论预言存在自由电子与原子核的共振相互作用

过程—电子共振俘获诱发的原子核激发(Nuclear Excitation by Electron Capture, NEEC)^[68–70], 即离子俘获电子时通过与核相互作用激发核能级而消耗剩余能量, 它是一个共振过程, 是内转换的时间反演过程. NEEC是探索核子运动与核外电子耦合的重要手段, 但是, 至今无实验观测结果. NEEC过程与双电子复合DR过程有相似之处, 双电子共振复合DR过程如图9(a)所示, 当一个具有动能 E_k 的自由电子与非裸的离子 A^{q+} 相互作用而被俘获时, 如果 E_k 与电子被俘获到离子能级的电离势 ε 之和($E_k + \varepsilon$)与离子 A^{q+} 的某一个电子激发态能级 ΔE 相匹配, 则在自由电子被俘获的同时, 体系的剩余能量会共振激发束缚态电子而形成双电子激发态(图9(a)), 离子的电荷态会减少一个电荷单位, 双激发态通过辐射退激后处于离子稳定态. 实验通过连续扫描电子相对于离子的能量并同时探测复合离子, 就可获得DR共振谱, 从而得到离子的核外电子壳层共振能级信息.

电子俘获共振激发原子核过程如图9(b)所示. 当一个具有动能 E_k 的自由电子与离子 A^{q+} 相互作用而被俘获时, 如果 E_k 与电子被俘获到离子能级的电离势 ε 之和($E_k + \varepsilon$)与原子核的跃迁能级 ΔE_N 匹配时, 会共振激发原子核的能级(图9(b)右侧), 前者DR导致束缚电子的激发, 后者NEEC导致核的激发. HIAF上建造的电子冷却装置和配置的独立电子靶装置, 将可以提供满足

图9 (a) 自由电子与非裸离子的双电子复合共振过程DR示意图; (b) 原子核参与的自由电子俘获共振激发核能级过程NEEC示意图

Figure 9 (a) Dielectronic Recombination (DR) process illustrated for electron-few electron ion collisions; (b) Nuclear Excitation by Electron Capture (NEEC) illustrated for free electron-ion collisions.

与核能级跃迁相对应的电子俘获的离子电子相对能量, 进行分支比准确测量和精细研究与原子不同量子态共振的核激发过程, 从而能够精密测量原子核同质异能态, 拓展原子核物理精密测量的范畴, 实现原子物理和原子核物理的交叉融合.

5 总结与展望

兰州重离子研究装置HIRFL是我国唯一的中高能重离子加速器, 近年来通过自主创新和国内外合作, 在高电荷态离子双电子复合精密谱学、相对论能量重离子束激光冷却、离子原子碰撞碎裂动力学、离子束与等离子体相互作用等研究方向取得了一系列研究成果. 强流重离子加速器HIAF装置的建造和原子物理相关的实验站的建设, 将为开展高电荷态离子相关的精密谱学、相对论离子原子碰撞动力学提供优越的实验条件, 并在原子精密谱学水平上探索宇称不守恒等超

越标准模型的物理现象; 同时, 基于原子谱学技术, 实现原子物理谱学技术和原子核物理交叉融合, 拓展原子核物理精密测量的范畴. 特别是, 在未来, 有可能将CiADS的高能强流质子束用于产生放射性核素, 拓展实验室可获得的放射性核素种类, 将极大地丰富ISOL类型的放射性离子激光谱学研究; 最先进的窄线宽激光技术、XUV激光技术和HIAF的结合, 将极大地拓展激光冷却离子束的范围, 并获得激光线宽量级精度的能级结构信息, 将强场QED检验推进到更高水平. 激光击穿谱学技术LIBS将应用在新的核乏料燃烧和再利用系统ADANES的闭环运行中, 原位检验各环节提取的核燃料质量指标发挥重要的作用. HIAF的未来升级计划将为探索超越施温格极限场强的物理研究创造独特条件, 不但使得观测真空衰变成为可能, 而且可以观测在极端强场环境下的重离子碰撞诱发的各种原子过程, 如超级准分子(原子)的形成、X射线以及各种辐射衰变激发的奇异过程等.

致谢 感谢以下同行进行的沟通与交流: 詹文龙, 高永, 于艳梅, 胡华雨, 杨晓菲, 魏宝仁, 陈京, 吴勇, 朱林繁, 胡智民, 叶沿林, 葛愉成, 谢柏松, 李英骏, 于得洋, 李骥光, 张大成, 何峰, 王群, 袁建民, 王建国, 陈向军, 董晨钟, 陈重阳, 姚科, 肖君, 杨洋, 曾蛟龙, 张登红, 顾录有, 丁晓斌, 蒋军, 武中文, 万建杰, 詹明生, 严宗朝, 王黎明, 史庭云, 高克林, 管桦, 童欣, 唐丽艳, 单旭, 卢征天, 叶地发, 屈一至, 魏志义, 腾浩, 赵昆, 丁大军, 柳晓军, 吴健, 刘运全, 高翔, 李家明, 刘作业, 赵冬梅, 张维岩, A. Voitkiv, V. Shabaev, Y. Litvinov, Th. Stoeckler, S. Schippers, M. Schulz.

参考文献

- 1 Niering M, Holzwarth R, Reichert J, et al. Measurement of the hydrogen 1S-2S transition frequency by phase coherent comparison with a microwave cesium fountain clock. *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 5496–5499
- 2 Gumberidze A, Stöhlker T, Banaś D, et al. Quantum electrodynamics in strong electric fields: The ground-state lamb shift in hydrogenlike uranium. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 223001
- 3 Maltsev I A, Shabaev V M, Popov R V, et al. Electron-positron pair production in slow collisions of heavy nuclei beyond the monopole approximation. *Phys Rev A*, 2018, 98: 7
- 4 Rafelski J, Kirsch J, Müller B, et al. Probing QED vacuum with heavy ions. In: Schramm S, Schäfer M, eds. *New Horizons in Fundamental Physics*. Cham: Springer International Publishing, 2017. 211–251
- 5 Maltsev I, Shabaev V, Popov R, et al. How to observe the vacuum decay in low-energy heavy-ion collisions. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 113401
- 6 Ma X, Wen W Q, Zhang S F, et al. HIAF: New opportunities for atomic physics with highly charged heavy ions. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B*, 2017, 408: 169–173
- 7 Kozlov M, Safronova M, Crespo López-Urrutia J, et al. Highly charged ions: Optical clocks and applications in fundamental physics. *Rev Mod Phys*, 2018, 90: 49
- 8 Safronova M S, Budker D, DeMille D, et al. Search for new physics with atoms and molecules. *Rev Mod Phys*, 2018, 90: 106
- 9 Yang J C, Xia J W, Xiao G Q, et al. High intensity heavy ion accelerator facility (HIAF) in China. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B*, 2013, 317: 263–265

- 10 Zhou X. Construction of the High Intensity heavy-ion Accelerator Facility (HIAF). *AAPPS Bull*, 2019, 29: 6–12
- 11 Peng T J, Gu L, Wang D W, et al. Conceptual design of subcritical reactor for china initiative accelerator driven system. *Atom Energy Sci Tech*, 2017, 51: 2235–2241
- 12 Blaum K, Dilling J, Nörtershäuser W. Precision atomic physics techniques for nuclear physics with radioactive beams. *Phys Scr*, 2013, T152: 014017
- 13 Kluge H J. Atomic physics techniques for studying nuclear ground state properties, fundamental interactions and symmetries: Status and perspectives. *Hyperfine Interact*, 2010, 196: 295–337
- 14 Ionescu D C, Eichler J. Production of free electron-positron pairs in relativistic heavy-ion collisions. *Phys Rev A*, 1993, 48: 1176–1184
- 15 Reinhardt J, Müller B, Greiner W. Theory of positron production in heavy-ion collisions. *Phys Rev A*, 1981, 24: 103–128
- 16 Eichler J. Relativistic ion-atom collisions and very strong fields. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B*, 2007, 261: 215–217
- 17 Greiner W, Reinhardt J. Aspects of supercritical heavy ion collisions. *AIP Conf Proc*, 2001, 564: 1–12
- 18 Müller-Nehler U, Soff G. Electron excitations in superheavy quasimolecules. *Phys Rep*, 1994, 246: 101–250
- 19 Shabaev V M, Andreev O V, Artemyev A N, et al. QED effects in heavy few-electron ions. *Int J Mass Spectrom*, 2006, 251: 109–118
- 20 Schippers S. Relativistic, QED and nuclear effects in highly charged ions revealed by resonant electron-ion recombination in storage rings. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B*, 2009, 267: 192–195
- 21 Bosch F, Litvinov Y A, Stöhlker T. Nuclear physics with unstable ions at storage rings. *Prog Particle Nucl Phys*, 2013, 73: 84–140
- 22 Stöhlker T, Beyer H F, Bräuning H, et al. Atomic physics with highly-charged ions at the future FAIR facility: A status report. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B*, 2007, 261: 234–238
- 23 Nolden F, Beckert K, Beller P, et al. Experience and prospects of stochastic cooling of radioactive beams at GSI. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2004, 532: 329–334
- 24 Steck M, Beller P, Beckert K, et al. Electron cooling experiments at the ESR. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2004, 532: 357–365
- 25 Schramm U, Habs D. Crystalline ion beams. *Prog Particle Nucl Phys*, 2004, 53: 583–677
- 26 Wen W, Wang H, Huang Z, et al. Laser cooling and precision laser spectroscopy of highly charged ions at the storage ring CSRe and the future HIAF. *Hyperfine Interact*, 2019, 240: 45–10
- 27 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
- 28 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
- 29 Johnson W R, Liu Z W, Sapirstein J. Transition rates for lithium-like ions, sodium-like ions, and neutral alkali-metal atoms. *Atomic Data Nucl Data Tables*, 1996, 64: 279–300
- 30 Wen W Q, Wang H B, Huang Z K, et al. Recent progress on laser cooling of relativistic Lithium-like $^{12}\text{C}^{3+}$ ion beams at heavy ion storage ring CSRe (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 053001 [汶伟强, 汪寒冰, 黄忠魁, 等. 重离子储存环CSRe上激光冷却相对论能量类锂 $^{12}\text{C}^{3+}$ 离子束的实验研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 053001]
- 31 Rothhardt J, Hädrich S, Demmler S, et al. Prospects for laser spectroscopy of highly charged ions with high-harmonic XUV and soft X-ray sources. *Phys Scr*, 2015, T166: 014030
- 32 Backe H. Precision spectroscopy at heavy ion ring accelerator SIS300. *Hyperfine Interact*, 2006, 171: 93–107
- 33 Lee T D, Yang C N. Question of parity conservation in weak interactions. *Phys Rev*, 1956, 104: 254–258
- 34 Zeldovich I B. The relation between decay asymmetry and dipole moment of elementary particles. *Sov Phys JETP*, 1958, 6: 1148–1155
- 35 Bouchiat M A, Bouchiat C I. Parity violation induced by weak neutral currents in atomic physics. *J Phys France*, 1974, 35: 899–927
- 36 Khriplovich I B. Feasibility of observing parity nonconservation in atomic transitions. *JETP Lett*, 1974, 20: 315–317
- 37 Barkov L M, Zolotarev M S. Observation of parity nonconservation in atomic transitions. *JETP Lett*, 1978, 27: 357
- 38 Wood C S, Bennett S C, Cho D, et al. Measurement of parity nonconservation and an anapole moment in cesium. *Science*, 1997, 275: 1759–1763
- 39 Wu C S, Ambler E, Hayward R W, et al. Experimental test of parity conservation in beta decay. *Phys Rev*, 1957, 105: 1413–1415
- 40 Dzuba V A, Flambaum V V, Khriplovich I B. Enhancement of P- and T-nonconserving effects in rare-earth atoms. *Z Phys D*, 1986, 1: 243–245
- 41 Haxton W C, Wieman C E. Atomic parity nonconservation and nuclear anapole moments. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2001, 51: 261–293
- 42 Gorshkov V G, Labzovsk.Li. Effects of parity nonconservation in heavy ions. *JETP Lett*, 1974, 19: 394–395

- 43 Labzowsky L N, Nefiodov A V, Plunien G, et al. Parity-violation effect in heliumlike gadolinium and europium. *Phys Rev A*, 2001, 63: 4
- 44 Prozorov A, Labzowsky L, Liesen D, et al. Schemes for radiative polarization of ion beams in storage rings. *Phys Lett B*, 2003, 574: 180–185
- 45 Bondarevskaya A, Prozorov A, Labzowsky L, et al. Theory of the polarization of highly charged ions in storage rings: Production, preservation, observation and application to the search for a violation of the fundamental symmetries. *Phys Rep*, 2011, 507: 1–42
- 46 Bondarevskaya A A, Chubukov D V, Mistonova E A, et al. Considerations towards the possibility of the observation of parity nonconservation in highly charged ions in storage rings. *Phys Scr*, 2018, 93: 025401
- 47 Shabaev V M, Volotka A V, Kozhuharov C, et al. Parity-nonconservation effect with the laser-induced $2^3S_1-2^1S_0$ transition in heavy heliumlike ions. *Phys Rev A*, 2010, 81: 052102
- 48 Zaytsev V A, Maiorova A V, Shabaev V M, et al. Parity-nonconservation effect in the dielectronic recombination of polarized electrons with heavy He-like ions. *Phys Rev A*, 2014, 89: 032703
- 49 Huang Z K, Wen W Q, Xu X, et al. Dielectronic and trielectronic recombination rate coefficients of Be-like Ar^{14+} . *Astrophys J Suppl Ser*, 2018, 235: 2
- 50 Bondarevskaya A, Mistonova E A, Lyashchenko K N, et al. Method for the production of highly charged ions with polarized nuclei and zero total electron angular momentum. *Phys Rev A*, 2014, 90: 064701
- 51 Seife C. Do deeper principles underlie quantum uncertainty and nonlocality? *Science*, 2005, 309: 98
- 52 Zhang S F, Fischer D, Schulz M, et al. Two-center interferences in dielectronic transitions in $H_2^+ + He$ collisions. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 023201
- 53 Gao Y, Zhang S F, Zhu X L, et al. Probing scattering phases via two-center interferences in collisions of He^{2+} on CO. *Phys Rev A*, 2018, 97: 020701
- 54 Vager Z, Naaman R, Kanter E P. Coulomb explosion imaging of small molecules. *Science*, 1989, 244: 426–431
- 55 Herwig P, Zawatzky K, Grieser M, et al. Imaging the absolute configuration of a chiral epoxide in the gas phase. *Science*, 2013, 342: 1084–1086
- 56 Cederbaum L S, Zobeley J, Tarantelli F. Giant intermolecular decay and fragmentation of clusters. *Phys Rev Lett*, 1997, 79: 4778–4781
- 57 Matsumoto J, Leredde A, Flechard X, et al. Asymmetry in multiple-electron capture revealed by radiative charge transfer in Ar dimers. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 4
- 58 Xu S, Guo D, Ma X, et al. Damaging intermolecular energy and proton transfer processes in alpha-particle-irradiated hydrogen-bonded systems. *Angew Chem Int Ed*, 2018, 57: 17023–17027
- 59 Zhu X L, Hu X Q, Yan S C, et al. Heavy N^+ ion transfer in doubly charged N_2Ar van der Waals cluster. *Nat Commun*, 2020, 11: 2987
- 60 Schulz-Ertner D, Jäkel O, Schlegel W. Radiation therapy with charged particles. *Semin Radiat Oncol*, 2006, 16: 249–259
- 61 Boudaiffa B, Cloutier P, Hunting D, et al. Resonant formation of DNA strand breaks by low-energy (3 to 20 eV) electrons. *Science*, 2000, 287: 1658–1660
- 62 Campbell P, Moore I D, Pearson M R. Laser spectroscopy for nuclear structure physics. *Prog Part Nucl Phys*, 2016, 86: 127–180
- 63 de Groote R P, Billowes J, Binnersley C L, et al. Dipole and quadrupole moments of $^{73-78}Cu$ as a test of the robustness of the $Z=28$ shell closure near ^{78}Ni . *Phys Rev C*, 2017, 96: 6
- 64 Liu Y C, Bai S W, Yang X F. Development and prospect of precision laser spectroscopy techniques for nuclear physics study (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2019, 36: 161–169 [刘永超, 白世伟, 杨晓菲. 用于核物理研究的精密激光谱技术的发展和展望. 原子核物理评论, 2019, 36: 161–169]
- 65 Fedosseev V, Chrysalidis K, Day Goodacre T, et al. Ion beam production and study of radioactive isotopes with the laser ion source at ISOLDE. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2017, 44: 084006
- 66 Yan X, Yang L, Zhang X, et al. Concept of an accelerator-driven advanced nuclear energy system. *Energies*, 2017, 10: 944
- 67 Musazzi S, Perini U. Laser-induced Breakdown Spectroscopy: Theory and Applications. New York: Springer, 2014
- 68 Chiara C J, Carroll J J, Carpenter M P, et al. Isomer depletion as experimental evidence of nuclear excitation by electron capture. *Nature*, 2018, 554: 216–218
- 69 Pálffy A, Harman Z, Kozhuharov C, et al. Nuclear excitation by electron capture followed by fast X-ray emission. *Phys Lett B*, 2008, 661: 330–334
- 70 Ma X, Wen W Q, Huang Z K, et al. Proposal for precision determination of 7.8 eV isomeric state in ^{229}Th at heavy ion storage ring. *Phys Scr*, 2015, T166: 014012

Atomic physics at the HIAF under extreme conditions: QED effects from strong Coulomb fields to beyond Schwinger limits

MA XinWen^{1,2*}, ZHANG ShaoFeng^{1,2}, WEN WeiQiang^{1,2}, YANG Jie^{1,2}, ZHU XiaoLong^{1,2},
QIAN DongBin^{1,2}, YAN ShunCheng^{1,2}, ZHANG PengMing¹, GUO DaLong^{1,2},
WANG HanBing¹ & HUANG ZhongKui¹

¹ *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

² *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

The high-intensity heavy ion accelerator facility (HIAF) is one of the major large-scale research facilities at the nuclear science center planned for Huizhou City in Guangdong Province. HIAF and its experimental terminals can be used to realize unprecedented research progresses in nuclear physics, atomic physics, materials, high-energy-density physics, and applications related to heavy ion beams such as cancer therapy, material modification, and radiobiology. In addition, they will provide excellent possibilities for atomic physics to investigate the quantum electrodynamics (QED) effects from strong electromagnetic fields to super-critical electromagnetic fields beyond the Schwinger limit. Starting from modern atomic spectroscopy based on the accelerator technology and in combination with the beam characteristics of the HIAF, this paper discusses the cutting-edge research topics that could be performed at HIAF and the upgrades to HIAF that could be implemented in the near future. The research fields include the QED effects in super-strong fields, parity nonconservation in highly charged ions, few-body processes in relativistic collisions, and testing the locality of matter waves of massive particles. This paper also discusses the possibility to perform laser spectroscopy with respect to radioactive ions. Furthermore, we believe that the latest high harmonic extreme ultraviolet (XUV) laser technology can be combined with HIAF for realizing high-precision measurements.

HIAF, Schwinger limit, QED vacuum decay, precision atomic spectroscopy, relativistic collision dynamics

PACS: 31.30.Jv, 32.10.-f, 32.30.Rj, 41.75.-i, 29.27.Bd, 34.80.Lx, 52.20.Fs

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0271](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0271)