

# 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\*

史路林<sup>1)2)</sup> 程锐<sup>2)3)4)†</sup> 王昭<sup>2)3)</sup> 曹世权<sup>1)</sup> 杨杰<sup>2)3)4)</sup>  
周泽贤<sup>1)2)</sup> 陈燕红<sup>2)</sup> 王国东<sup>2)3)</sup> 惠得轩<sup>2)5)</sup> 金雪剑<sup>2)3)</sup>  
吴晓霞<sup>2)</sup> 雷瑜<sup>2)</sup> 王瑜玉<sup>2)3)4)</sup> 苏茂根<sup>1)‡</sup>

1) (西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃省原子分子物理与功能材料重点实验室, 兰州 730070)

2) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

4) (先进能源科学与技术广东省实验室, 惠州 516000)

5) (大连理工大学物理学院, 大连 116024)

(2023年2月15日收到; 2023年5月4日收到修改稿)

近玻尔速度能区高电荷态离子在稠密等离子体中的能量损失是强流重离子束驱动的高能量密度物理等前沿研究中的核心物理问题之一. 基于中国科学院近代物理研究所的 320 kV 实验平台, 新建立了一套近玻尔速度能区离子束与激光等离子体相互作用的实验研究装置, 用于开展高精度的离子能量损失和电荷态研究. 本文将详细介绍该装置的特点, 包括脉冲离子束 ( $\geq 200$  ns) 的产生与调控、高密度 ( $10^{17}$ — $10^{21}$  cm<sup>-3</sup>) 激光等离子体靶的制备、等离子体参数诊断与离子的高精度测量 ( $< 1\%$ ) 等. 基于该装置已开展了百 keV 的质子束和 4 MeV 的 Xe<sup>15+</sup> 离子束与激光 Al 等离子体靶相互作用的实验, 并取得了相应的结果. 本实验装置能够为中国在近玻尔速度能区高电荷离子与稠密激光等离子体相互作用研究提供高精度的实验数据, 以促进理论工作的发展.

**关键词:** 近玻尔速度能区, 高电荷态离子, 激光等离子体, 能量损失, 能损模型

**PACS:** 34.50.Bw, 52.40.Mj, 52.58.Hm

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230214

## 1 引言

高能量密度物理是当今物理学最前沿的交叉学科之一, 与天体物理、惯性约束聚变、武器物理和高压新材料等热点领域密切相关<sup>[1-3]</sup>. 基于加速器装置的强流重离子束驱动产生的高能量密度物

质具备大体积、空间均匀、材料种类多样, 且状态精确可控的突出优势, 为系统性实验研究提供了新的机遇<sup>[4-7]</sup>. 相关研究获得了越来越多的关注, 如德国的反质子与离子研究装置 (FAIR) 与中国的强流重离子加速器装置 (HIAF) 均将离子束驱动的高能量密度物理研究列为未来核心的研究内容之一<sup>[8-12]</sup>. 载能高电荷态离子与稠密等离子体相互

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2022YFA1602500)、国家自然科学基金 (批准号: 12064040, 12204382)、国家自然科学基金国际 (地区) 合作与交流项目 (批准号: 12120101005) 和甘肃省自然科学基金 (批准号: 21JR7RA129) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [chengrui@impcas.ac.cn](mailto:chengrui@impcas.ac.cn)

‡ 通信作者. E-mail: [sumg@nwnu.edu.cn](mailto:sumg@nwnu.edu.cn)

作用的物理过程是最为核心的物理基础, 直接决定了离子沉积能量密度的空间分布与产生的高能量密度物质状态等<sup>[13,14]</sup>.

近些年来, 各国科学家利用离子加速器装置和高功率激光等已开展了高能离子束与稠密等离子体相互作用的研究工作, 如 Roth 等<sup>[15]</sup>报道了百 MeV/u 重离子束 (Zn, Kr, Ag) 与激光碳等离子体的相互作用, 观测到了明显的能损增强现象, 分析了等离子体中炮弹离子有效电荷的变化; Frank 与 Cayzac 等<sup>[16–19]</sup>分别报道了 4 MeV/u 的 Ar<sup>16+</sup> 离子束与 600 keV/u 的氮离子束在激光碳等离子体中的能量损失, 实验结果验证了改进的 T-matrix 能损理论. Cheng 与 Zhao 等<sup>[20–28]</sup>基于中国科学院近代物理研究所的低能区离子束与低密度等离子体作用实验装置也开展了相关的研究, 观测到了质子在氢等离子体中的能损增强现象, 提供了高精度的离子能损实验数据; 研究了在等离子体中 He 离子的激发态对有效电荷与离子能损的影响; 观察到了低能区离子在等离子体中存在集体效应并影响离子的能损等.

随着离子能量的降低以及等离子体密度的升高, 离子与等离子体相互作用过程将愈加复杂. 例如, 在近玻尔速度能区 (炮弹离子能量约为 25 keV/u), 由于炮弹离子速度与外壳层束缚电子运动速度相近, 电离、激发、俘获等物理过程和对应的逆过程将同时发挥作用; 同时由于自由电子的存在, 离子复合自由电子<sup>[29]</sup>、等离子体集体效应<sup>[30,31]</sup>等都可能明显改变相互作用过程. 在理论计算上, 现有的不同理论模型存在明显的差异, 同时具有一定的局限性<sup>[18,32,33]</sup>; 在实验方面, 由于缺少低能区离子与激光等离子体靶 (laser-produced plasma

target, LPPT) 的高精度实验装置, 高精度实验数据极度缺乏, 难以准确校验现有的理论模型.

本文基于中国科学院近代物理研究所已有的低能区离子束与等离子体相互作用实验平台, 新搭建脉冲 LPPT 装置, 升级离子束调控与测量系统, 建成了近玻尔速度能区 (near Bohr velocity energy region, NBVER) 离子束与激光等离子体 (laser-produced plasma, LPP) 作用的实验装置. 将详细介绍该实验装置的特点, 包括 LPPT 制备、在线等离子体诊断、低能离子束脉冲化产生与调控、高能量分辨的离子探测器, 以及实验测量过程各单元的高精度时序控制等; 并且利用百 keV 质子与 Xe<sup>15+</sup> 离子束开展了测试性实验, 得到了离子穿过激光 Al 等离子体靶后的离子能损与电荷态分布实验数据. 这个新的实验装置有望为低能区离子束与稠密等离子体相互作用研究提供重要的测量平台以及实验数据.

## 2 实验装置

中国科学院近代物理研究所 320 kV 高电荷态离子综合实验平台, 为开展 NBVER 高电荷态离子与等离子体相互作用研究提供了理想的加速器条件. 基于该平台, 新搭建了高功率脉冲 LPPT 装置, 优化了脉冲离子束产生与调控单元, 新研发了高能谱分辨的离子测量系统等, 建成了 NBVER 高电荷态离子束与 LPP 相互作用的实验装置, 装置示意如图 1 所示. 实验所需的高电荷态离子由一台全永磁的电子回旋共振离子源 (ECR) 产生, 经过静电加速后到达所需的离子能量, 并经过离子脉冲化单元、系列二极偏转磁铁与四极聚焦磁铁等束流光学调控后,

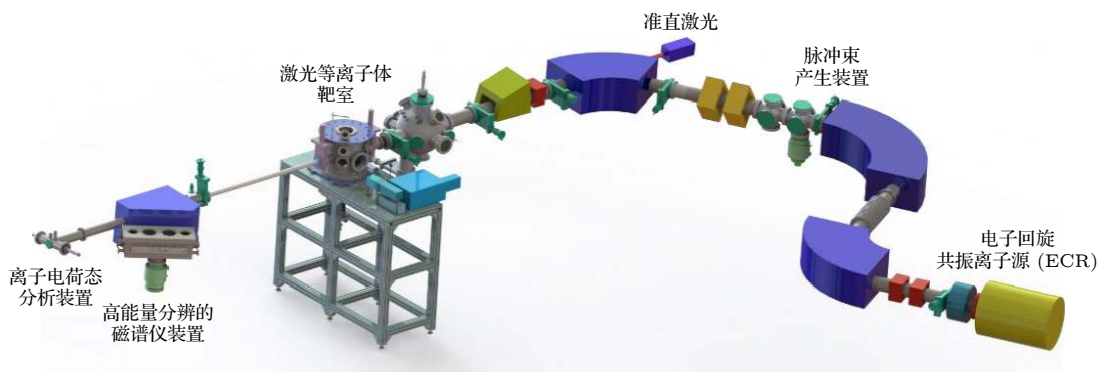


图 1 NBVER 离子束与 LPP 相互作用实验装置

Fig. 1. Experimental set-ups of ions beam LPP interaction in the NBVER.

到达实验靶区与 LPPT 发生作用; 作用后的出射离子分别被直通端的离子电荷态探测器与偏转端的磁能谱探测器测量, 分别得到出射离子的电荷态分布与出射离子的能谱等信息. 该实验装置可提供的离子种类有: H, He, C, Ne, Xe 等; 离子能量范围为  $(20-320) \times q$  keV ( $q$  为离子电荷态); 并具备多种电荷态连续可调的能力. 通过离子脉冲产生装置, 可提供最短脉宽为 200 ns 的脉冲束流, 为开展离子与瞬态 LPPT 作用提供了所需的短脉冲束流; 该装置上还配备在线的准直激光、束流位置监测与调控系统, 实现了离子束与等离子体靶的高精准空间耦合.

## 2.1 LPPT 的制备与诊断

该装置上, 新搭建的高功率脉冲 LPPT 制备装置与在线等离子体诊断系统, 其工作示意图如图 2. 其中 LPPT 的产生主要由高功率脉冲激光器、高真空靶室、槽型固体铝靶、三维移动靶架装置, 以及所需的光学透镜组等构成. 其中烧蚀 Al 靶表面产生等离子体所用的激光由一台波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 激光器提供, 最大输出的能量为 1 J, 脉宽为 10 ns, 激光经聚焦透镜 ( $f = 400$  mm) 后入射到位于高真空靶室中的槽型靶凹槽内侧底表面, 产生 LPPT, 焦斑尺寸直径约为 0.3 mm, 对应的功率密度为  $1.77 \times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup>. 实验中的真空靶室真空度维持在  $10^{-4}$ — $10^{-5}$  Pa. 实验中使用了具有一定宽度和长度的槽型结构固体 Al 靶, Al 靶纯度为 99.99%, 凹槽宽为 2 mm, 槽深为 3 mm; 激光沿竖

直方向聚焦作用于凹槽底面, 产生的激光 Al 等离子体初始分布于该凹槽内部, 并沿竖直方向向外喷射. 实验中, 精确调制离子束的飞行方向与入射位置, 从而使其准确地沿凹槽方向穿过, 并与产生的 LPPT 作用. 在实验中使用该槽型靶的目的在于: 便于离子束与 LPP 在空间上高精度的耦合, 使两者充分作用; 同时凹槽内壁对产生的 LPP 具有一定的空间约束作用, 提升沿离子路径方向的等离子体密度. 实验过程中, 通过三维移动靶架系统精准调控靶的位置, 从而保证每次束靶作用过程中产生的 LPPT 参数的稳定性.

为了提供准确的 LPPT 参数信息, 在该装置上专门配备了等离子体在线诊断系统, 主要包括高时间分辨与高谱学分辨的光谱测量装置、激光光纤干涉测量装置与等离子体羽瞬态成像测量装置等, 从而实现等离子体密度、温度与空间分布等重要参数信息的高精度诊断需求.

### 2.1.1 高时间分辨与谱学分辨的光谱测量装置

高时间分辨与谱学分辨的光谱测量装置包括高谱分辨光谱仪 (波长分辨  $< 0.08$  nm) 与短时间曝光 (曝光时间  $> 1$  ns) 的 ICCD 单元等. 实验中, LPP 的发射光被焦距  $f = 300$  mm 透镜高效收集, 并穿过石英法兰窗 (在波长 200—1500 nm 内透光率为 93%), 到达位于大气环境下的光谱仪狭缝入口处, 其狭缝宽度为 20  $\mu$ m; 狭缝方向与 LPP 羽流成正交 (图 2), 通过移动两者相对位置可以实现空间分辨的等离子体参数演化信息诊断. 实验中选取

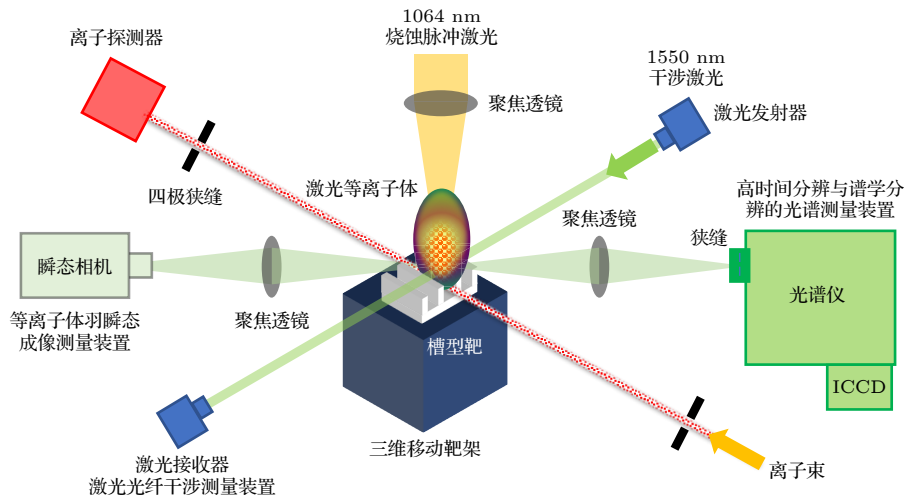


图 2 LPPT 产生与匹配的等离子体诊断系统示意图 (ICCD, 光谱仪的一个单元)

Fig. 2. Schematic diagram of producing the LPPT and matching the plasma diagnostics system (ICCD, a unit of the spectrometer).

的光谱仪光栅刻划数为 600 1/mm, 光谱分辨为 0.08 nm, 中心波长设置为 377 nm, 光谱测量范围为 355—398 nm; ICCD 的曝光时间设置为 20 ns. 通过外部触发系统的调控, 可实现激光 Q 触发信号与 ICCD 开门信号的相对延迟时间调制, 从而对 LPP 整个时间演化过程参数进行系统性的诊断.

### 2.1.2 等离子体羽瞬态成像测量装置

利用高分辨的光学镜头和科学互补金属氧化物半导体 (scientific complementary metal-oxide-semiconductor, sCMOS) 相机 (曝光时间 > 1 ns), 构成了针对 LPP 羽空间分布动态演化信息的瞬态成像测量装置. sCMOS 的光谱响应区间是 180—850 nm, 曝光时间为 3 ns, 分辨率是 2048 × 2048; 使用的聚焦镜头为  $f = 25$  mm; 该装置的空间分辨为 0.03 mm/pixel. 通过序列时序调控, 对不同时刻产生的等离子体羽进行了逐一成像, 并最终获得了 LPP 空间演化过程的图像. 实验过程中还使用了铟镓砷自由空间光电探测器 (5 GHz, 800—1700 nm) 以对激光入射到靶面的激光时间零点进行校准. 该光电探测器的上升时间短至 150 ps, 可提供精确的时间零点信息. 实验过程中脉冲之间的抖动小于 3 ns.

### 2.1.3 激光光纤干涉测量装置

除了上述被动测量方式外, 实验中还配备了由中国科学技术大学兰涛教授提供的主动测量激光光纤干涉诊断装置<sup>[34]</sup>, 如图 3 所示. 利用一台掺铒单频光纤激光器提供所需的诊断激光光源, 其激光波长为 1550 nm, 线宽为 1 kHz, 输出功率为 52.5 mW, 并由单模光纤进行传输, 以实现 Mach-Zehnder 光学干涉. 可测量的等离子体截止密度上限为  $n_c = 4.6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ <sup>[34]</sup>. 利用功率比为 50:50 的 1 × 2 分

束器将激光束分成两束相同功率的参考光和探测光. 使用两个光纤准直器分别作为发射器和接收器, 分别位于等离子体靶区的两侧, 使光纤发出的探测光能够贯穿等离子体靶区; 最后, 参考光束和探测光束均被送至 3 × 3 耦合器的两个输入端, 该 3 × 3 耦合器是零差光纤干涉仪中独特的光学干涉元件, 通过 3 个输出端接到光电探测器并由示波器输出, 从而获取得到相关的干涉测量数据<sup>[35]</sup>.

## 2.2 脉冲离子束的产生及束靶相互作用的时空耦合调控

中国科学院近代物理研究所的 320 kV 平台提供的初始离子束为直流模式, 为了在实验中实现离子束与瞬态 LPPT 作用, 并使后端离子探测系统具备更高的信噪比, 利用束流斩波技术, 建成了低能离子束脉冲束产生装置. 其主要由平行板电容器、束流准直光阑、脉冲高压输入与高压信号调控系统等构成, 其工作原理为: 在连续束条件下, 将束流输运到激光靶区; 通过在平行板电容器单元上加载一定伏值 (约 2 kV) 的高压, 利用电场作用使离子束发生横向偏移, 离子束离开束线中心位置并被束线中的准直光阑组件所阻挡, 从而无法达到靶区; 在外部高压信号的调控下, 使平行板电容器的高压在 60 ns 的时间尺度内迅速降到 0 (或从 0 升高到 2 kV), 在特定时间段内离子束恢复到束线中心的输运轨道上并到达靶区, 从而实现了脉冲离子束的制备.

在离子束与瞬态等离子体时间耦合上, 上述脉冲离子束产生装置可实现离子束流脉冲长度从 200 ns 到连续束连续可调. 结合外部总体系统时序控制源, 精确调整脉冲离子束到达靶区的时刻与 LPPT 产生时刻间的相对延迟, 实现脉冲离子束团与 LPPT 的高精度时间耦合.

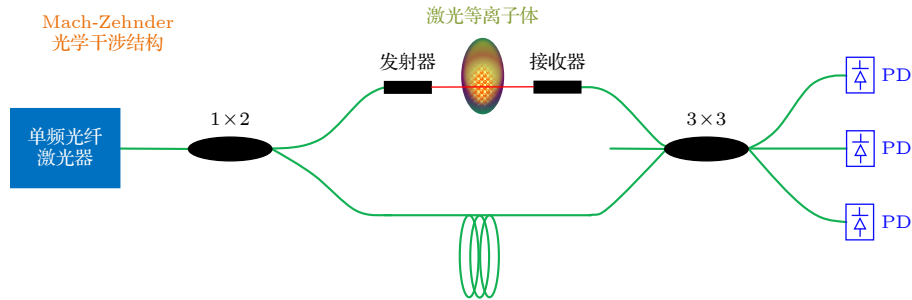


图 3 激光光纤干涉仪示意图<sup>[34]</sup>

Fig. 3. Diagram of the optical fiber interferometer<sup>[34]</sup>.

在离子束与 LPP 的空间耦合上, 如图 4 所示, 通过利用束线上安装的一束准直激光, 来表征离子束的运行轨迹. 调整靶架位置使 A1 靶的凹槽与该准直激光重合, 使准直激光能顺利通过凹槽; 实时观测槽型靶后端的荧光屏与真空 CCD 构成的束流定位系统, 微调离子束飞行方向与入射空间位置, 使得离子束也顺利通过准直激光所在的凹槽区域. 调整烧蚀激光靶点位置, 使其位于该凹槽内部并聚焦于凹槽底面, 从而最终达到准直激光、LPP 与离子束位于同一个目标凹槽区域, 实现离子束与 LPPT 的高精度空间耦合.

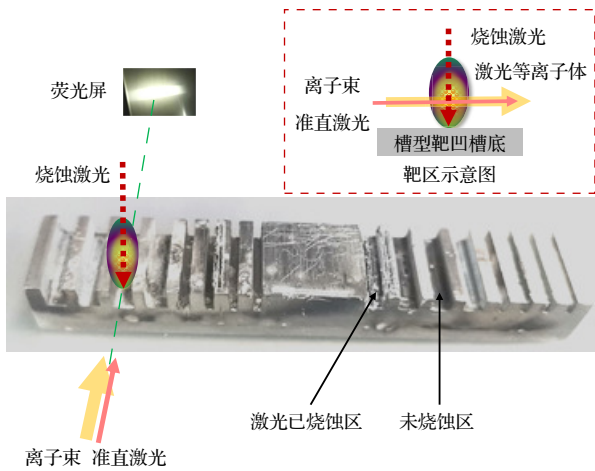


图 4 离子束与 LPPT 相互作用的高精度空间耦合调控  
Fig. 4. High precision spatial coupling control of ion beam interaction with LPPT.

## 2.3 离子探测器系统

NBVER 高电荷离子与 LPPT 相互作用中, 将发生一系列的能量传递与电荷交换等过程, 明显改变炮弹离子能量与电荷态分布, 通过精确测量出射离子的能谱与电荷态分布等信息, 可以对作用过程进行细致的研究. 因此在该装置的束线末端, 研发配备了离子探测器系统, 包括直通端的离子电荷态分析装置与偏转端的磁能谱装置.

### 2.3.1 离子电荷态分析装置

在该实验装置的束线末端位置, 离子束飞行的前进方向上, 安装由大面积 (长度  $L = 150 \text{ mm}$ , 宽度  $W = 30 \text{ mm}$ ) 微通道板 (microchannel plate, MCP) 与电偏转单元构成的离子位置灵敏探测器系统, 如图 5 所示. 其中离子探测器是由双层 V 形构架的 MCP 板、导电型的荧光屏阳极、高空间分辨的 CCD 等单元构成. 出射的离子轰击到 MCP 板上倍增产生大量的电子, 将离子信号进行放大; 发射的电子最终到达阳极荧光屏处, 激发荧光屏产生相应的束斑分布图像, 由 CCD 捕获, 从而得到出射离子的空间分布图像. 在离子探测器前端, 安装一套横向的平行板电容器, 在静电偏转的作用下 ( $y \propto qU/v^2$ , 其中  $y$  为相对偏移距离,  $q$  为带电粒子的电荷量,  $U$  为平行板电容器电压,  $v$  为带电粒子速度), 出射的不同电荷态离子将落于 MCP 板的不同位置, 因而

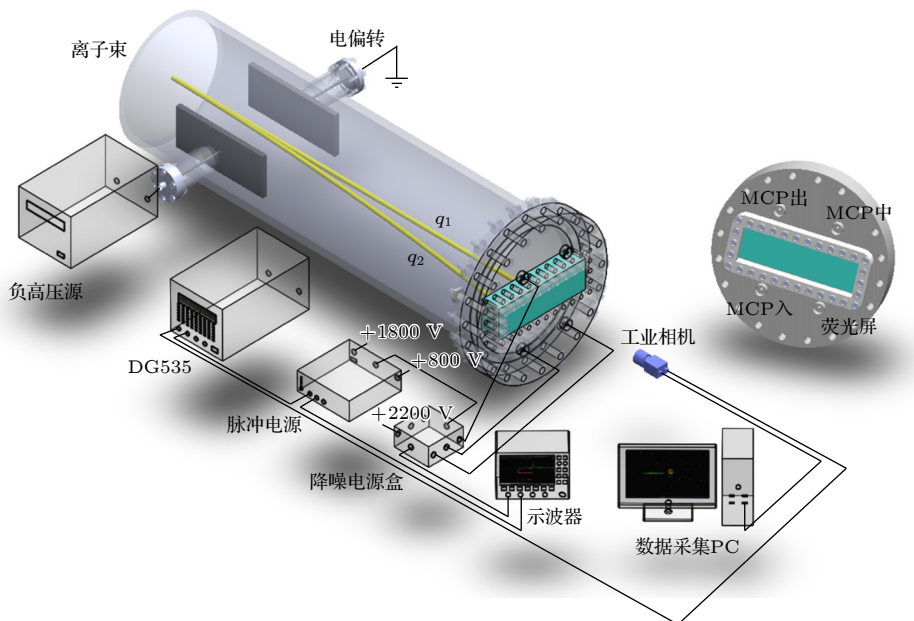


图 5 离子电荷态分析装置  
Fig. 5. Instrument of ions charge state analyzer.

产生具有空间分布结构的离子分布图像; 电荷态离子横向偏移的相对距离与离子电荷态、飞行速度、偏转电场强度及漂移距离等具有清晰的函数关系, 因此可以精确标定不同位置处的电荷态数值, 实现离子电荷态分布的测量. 该电荷态分析装置可测量从高电荷态离子到中性粒子成分的全电荷态谱分布.

### 2.3.2 高能量分辨的磁谱仪装置

在该装置的束线下游, 45°偏转端方向, 新研发了一台高能谱分辨的磁能谱装置, 如图 6 所示, 主要由高稳定性二极偏转磁场、超大面积位置灵敏探测器装置、特殊空间结构的真空腔室等构成. 其中偏转磁场磁刚度最大为 1.2 Tm, 位置灵敏探测器尺寸达到 20 mm × 400 mm、探测器的空间分辨可达 100 μm/pixel, 最佳能量分辨高于 1%, 有关该新型磁能谱仪装置细节介绍可参考文献 [36].

在偏转磁场的作用下, 具有不同电荷态与能量的出射离子运动轨迹均不相同, 因此将会落在后端离子探测器的不同位置. 经过必要的系统标定后, 探测器上不同位置处离子的能量与电荷态等信息能够被准确地获取. 通过比较有/无 LPPT 两种情况下的测量结果, 获得离子在 LPPT 中的能量沉积信息与电荷态变化等信息. 需要说明的是, 该磁谱仪装置不受 LPP 发射光的干扰, 可提供准确清晰的离子能谱信息.

### 2.4 实验装置各单元的时序控制系统

为实现实验中高精度的测量需要, 利用 Stanford 公司的 DG535 与 DG645 等高精度延迟触发器构成了实验装置的总时序控制中心, 通过与脉冲束产生装置、脉冲激光器、离子探测器开关控制单元等分别相连, 构成了一套时序控制系统实现对整个实验过程的高精度操控, 其控制流程见图 7.

## 3 实验结果及讨论

基于高电荷态离子与 LPP 相互作用的新实验装置, 利用 320 kV 平台引出的质子束 (150 和 200 keV) 与 Xe<sup>15+</sup> (4 MeV) 离子束开展了测试性的实验工作, 对整个装置的工作性能进行了评测. 实验中使用由脉冲激光烧蚀凹槽型靶子产生的激光 Al 等离子体靶, 利用在线等离子体诊断装置, 准确诊断了该 LPPT 的参数信息, 结果如图 8 所示.

图 8(a) 为 LPPT 在 5—135 ns 内的瞬态成像结果, 本实验中瞬态相机的门宽统一设置为 3 ns. 图中已给出尺寸标度与激光入射方向 (橙色箭头方向). 沿激光入射方向, 等离子体羽长度从 5 ns 时的 0.15 mm, 逐渐演化到 65 ns 时达到最大值 1.8 mm, 后逐渐变小, 至 135 ns 时等离子体羽变化为 0.3 mm. 图 8(b) 为利用诊断所得的 LPPT 自

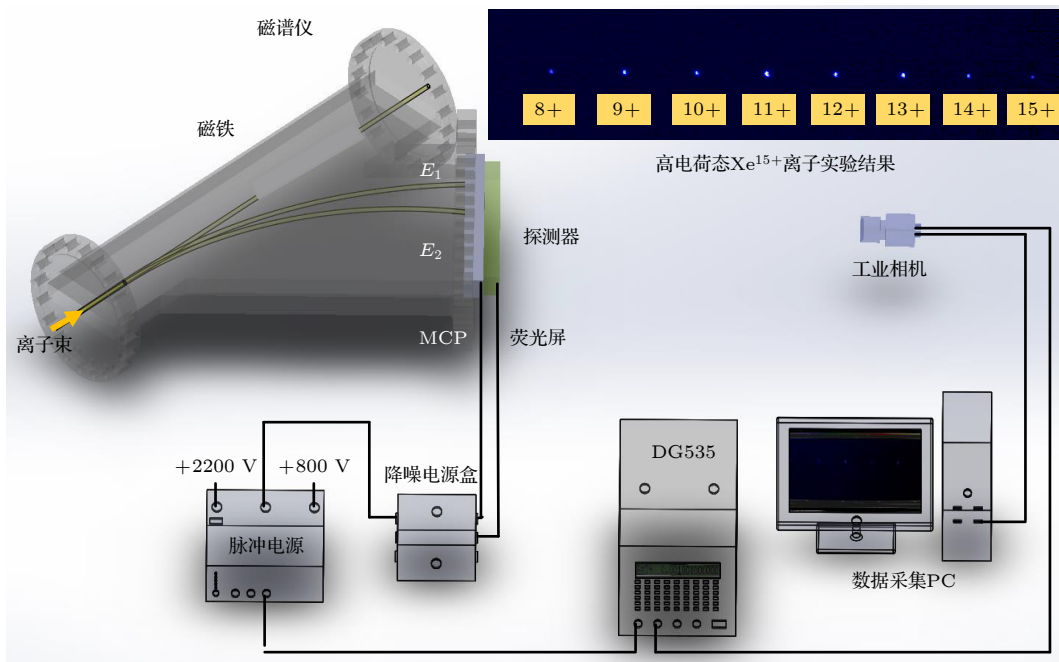


图 6 磁谱仪装置

Fig. 6. Instrument of magnetic spectrometer.

由电子密度的演化图像, 其中瞬态光谱法与激光光纤干涉法两者给出的电子密度变化趋势相同, 诊断的等离子体最大平均自由电子密度分别为  $1.13 \times 10^{18}$  和  $1.03 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 均对应等离子体产生初期, 随着等离子体的演化迅速降低到  $1 \times 10^{17}$ — $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 光谱诊断测量的是该等离子体靶的中心位置垂直固体靶表面平面的平均值, 而激光光纤干涉诊断测量的是整个等离子体靶的轴向区域自由电子密度的平均值. 考虑到 LPP 的特点, 其中心区域自由电子密度高于外侧区域, 因此造成两种诊断

结果的差异; 光谱法诊断结果略高于激光光纤干涉诊断结果, 但是两者数值在误差范围之内. 结合等离子体羽的诊断信息, 可以看到该 LPP 的面密度约为  $2 \times 10^{16}$ — $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ .

图 8(c) 为诊断的激光 Al 等离子体靶区范围的平均温度结果, 从 5 ns 时的 7000 K (最高) 下降至 6500 K 左右. 根据所选用的 ns 型脉冲激光器, 2022 年 Cao 等 [37] 研究表明, 激光功率密度可达  $8.2 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$  (是本实验过程中的 4.6 倍), LPP 的自由电子密度大于  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , 温度大于 40 eV,

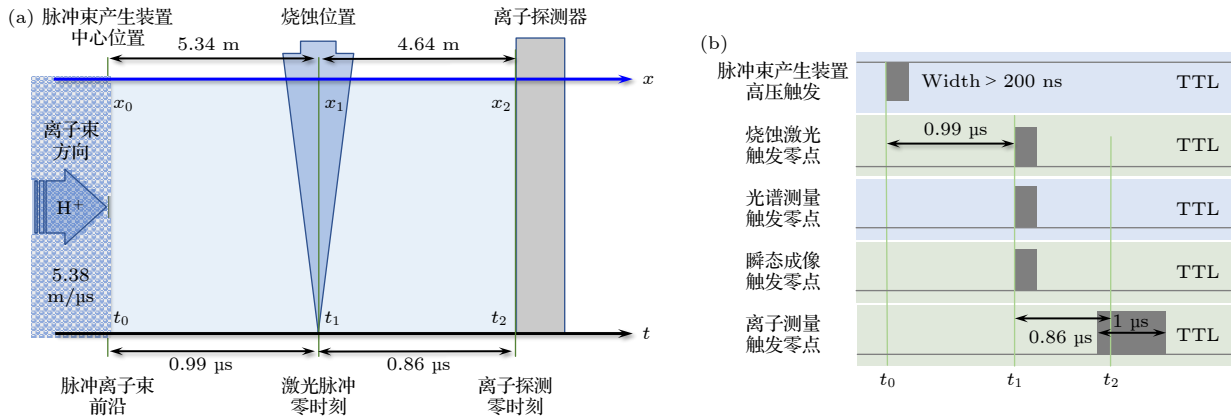


图 7 实验装置各单元的时序控制关系图 (a) 实验系统时空耦合关系; (b) 时序控制逻辑顺序

Fig. 7. Trigger sequences control diagram of each unit of experimental apparatus: (a) Spatio-temporal coupling of the experimental system; (b) sequence control logic sequence.

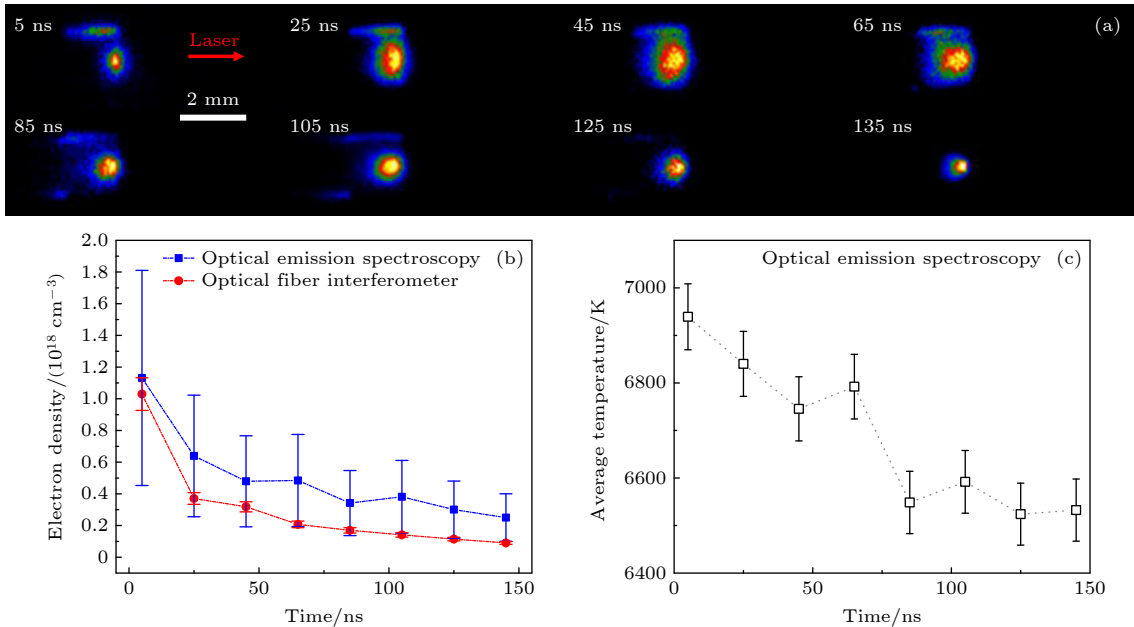


图 8 利用在线等离子体诊断装置获取的激光 Al 等离子体靶相关参数演化信息 (a) 等离子体羽的空间分布; (b) 光谱法与激光光纤干涉法分别诊断得到的等离子体的平均自由电子密度; (c) 光谱法诊断得到的等离子体靶区的平均温度

Fig. 8. Evolution of the laser-produced Al plasma target related parameters obtained by online plasma diagnostic device: (a) Spatial distribution of plasma-plume; (b) plasma diagnosed by optical emission spectroscopy and laser fiber interferometer, respectively; (c) average temperature of plasma target diagnosed by optical emission spectroscopy.

且在 90 ns 时 LPP 的电子密度为  $2.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , 温度为 24 eV. 同时该文献还报道了 Al 的离化度, 其中在该激光条件下的 Al 离子主要为  $\text{Al}^{4+}$ — $\text{Al}^{6+}$  之间, 类比到本实验可以得知激光 Al 等离子体中 Al 的离化度较低.

图 9 展示了 4 MeV  $\text{Xe}^{15+}$  离子束在有/无穿过激光 Al 等离子体靶前与靶后的电荷态分布差异. 在无等离子体条件下, 出射离子电荷态分布于  $7+$ — $15+$ , 主要成分为  $\text{Xe}^{13+}$  离子; 当 Xe 离子穿过 LPPT 后, 电荷态分布变为  $3+$ — $10+$ , 主要成分为  $\text{Xe}^{8+}$  离子. 从上述结果可知, 在该 LPPT 中, 炮弹离子电子俘获过程占主导, 导致电荷态降低; 未发现由于自由电子俘获截面减小和碰撞电离截面增大而引起的离子电荷态升高现象, 这与实验中炮弹离子与 LPPT 核心区域实际距离较远, 等离子体密度和温度等参数迅速降低, 等离子体离化度也极速下降, 离子与中性靶原子作用过程占据主导有关 [38]. 图 10 为实验测量到的 150 keV 质子束穿过 Al 等离子体靶后能谱结果, 明显可以看到在激

光 Al 等离子体靶中, 离子信号右移约 30 pixel, 即在该等离子体中的离子能损约为  $(2.0 \pm 0.6) \text{ keV}$ .

分别利用 Bethe [39] 和 SSM [40] 等理论模型, 参考该 LPPT 诊断的电子密度和温度等参数信息, 计算了初始能量从 50—300 keV 的质子在等离子体中的理论能损值, 如图 11 所示, 图中理论能损值的带宽来源于误差. 通过对比, 可以发现实验测量值明显高于理论模型的计算结果, 差异达到了 30%, 初步分析出现该差异的原因可能为: NBVER 离子, 一阶玻恩近似条件不再成立, 导致原有的理论模型不能完全描述作用过程, 造成离子能损测量数据与理论计算存在差异. 尽管 SSM 理论考虑了近距离碰撞和极化效应修正, 但是仍然难以精确描述部分电离的等离子体情况. 同时由于 NBVER 离子与等离子体作用过程异常复杂, 基于新研发的实验装置, 可以开展系统性的离子能损与电荷态分布的高精度测量工作, 从而校验现有理论模型的准确性, 为进一步发展新的能损理论模型提供高精度的实验依据.

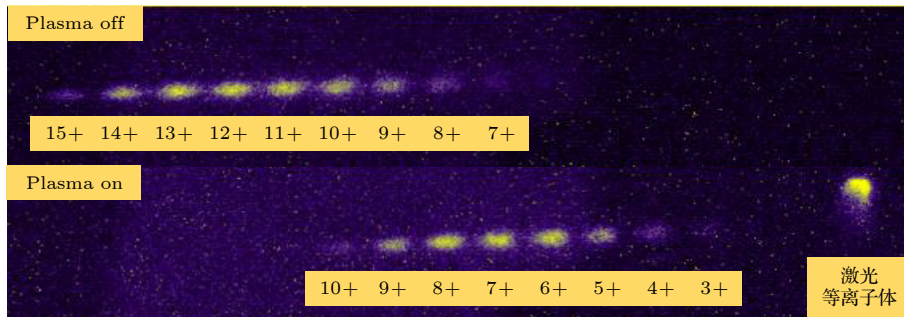


图 9 电荷态分析装置测量的  $\text{Xe}^{15+}$  离子在有/无激光 Al 等离子体靶条件下的电荷态分布结果

Fig. 9. Charge state distributions of  $\text{Xe}^{15+}$  ions with/without the laser-produced Al plasma target conditions measured by the charge state analysis device.

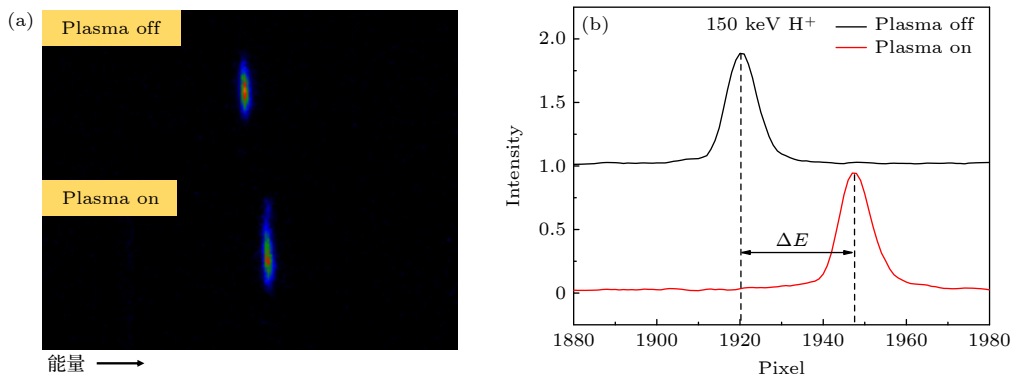


图 10 磁能谱仪测量的质子在有无激光 Al 等离子体靶条件下能谱结果 (a) 图像结果; (b) 数据结果

Fig. 10. Energy spectrum of proton with/without laser-produced Al plasma target conditions measured by the magnetic energy spectrometer: (a) Image results; (b) data results.

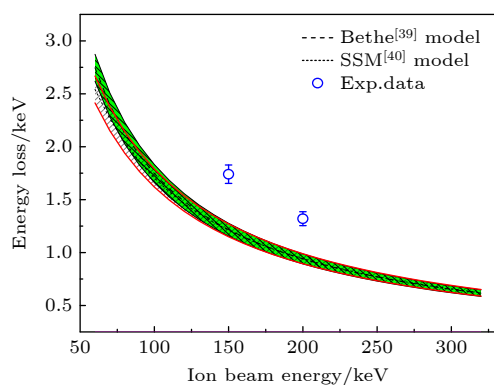


图 11 实验测量到的 150 和 200 keV 质子在 LPPT 中能损与 Bethe<sup>[39]</sup> 和 SSM<sup>[40]</sup> 理论计算结果的对比

Fig. 11. Comparison of experimental energy loss of 150 and 200 keV proton in the laser-produced plasma with theoretical calculations from the Bethe<sup>[39]</sup> and SSM<sup>[40]</sup> models.

## 4 总结

本文介绍了基于中国科学院近代物理研究所 320 kV 实验平台, 新发展的 NBVER 离子束与 LPP 相互作用的实验装置, 其中新研发了多个硬件设备以达到不同目的, 包括 LPPT 产生、在线等离子体诊断、脉冲离子束产生与调控、出射离子电荷态分析与离子能谱测量、高效束靶时空耦合, 以及实验装置的高精度时序控制等. 利用加速器平台提供的质子与 Xe<sup>15+</sup> 离子束开展了测试性实验工作, 在线诊断了激光 Al 等离子体靶演化图像, 其中 LPPT 区的平均温度约为 6500 K, 密度为  $2.0 \times 10^{17}$ — $1.2 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup>, 等离子体羽空间尺度约为 2 mm × 1 mm. 实验中电荷态分析装置观测到了有/无 LPPT 条件下, 出射的 Xe 离子电荷态分布变化, 从最高 15+ 迅速下降到了 10+, 电子俘获过程占据主导; 磁能谱仪装置给出了质子能损结果, 在该 LPP 中的质子能损约为 2.0 keV, 能谱分辨优于 1%. 其实验能损结果明显高于 Bethe 等<sup>[39]</sup> 理论计算的结果, 表明 NBVER 离子与 LPP 相互作用过程仍然存在未解决的物理问题, 亟待深入研究. 本文介绍的 NBVER 离子与 LPP 实验装置, 有望为相关的物理研究提供重要的测量平台与高精度的实验数据.

感谢中国科学院近代物理研究所 320 kV 实验平台提供的高质量离子束条件, 感谢中国科学院近代物理研究所高能密度物理室和西北师范大学物理与电子工程学院等离子体光谱技术与应用研究团队全体参与实验人员的辛勤付出.

## 参考文献

- [1] Hofmann I 2018 *MRE* **3** 1
- [2] Tahir N A, Shutov A, Neumayer P, Bagnoud V, Piriz A R, Lomonosov I V, Piriz S A 2021 *Phys. Plasmas* **28** 032712
- [3] McMahon J M, Morales M A, Pierleoni C, Ceperley D M 2012 *Rev. Modern Phys.* **84** 1607
- [4] Zhao Y T, Cheng R, Wang Y Y, Zhou X M, Lei Y, Sun Y B, Xu G, Ren J R, Sheng L N, Zhang Z M, Xiao G Q 2014 *High Power Laser Sci. Engine.* **2** 1
- [5] Ren J R, Wang J L, Chen B Z, et al. 2021 *High Power Laser Part. Beams* **33** 012005 (in Chinese) [任洁茹, 王佳乐, 陈本正等 2021 强激光与粒子束 **33** 012005]
- [6] Schoenberg K, Bagnoud V, Blazevic A, et al. 2020 *Phys. Plasmas* **27** 043103
- [7] Zhao Y T, Xiao G Q, Li F L 2016 *Physics* **45** 98 (in Chinese) [赵永涛, 肖国青, 李福利 2016 物理 **45** 98]
- [8] Cheng R, Zhang S, Shen G D, et al. 2020 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **11** 112011 (in Chinese) [程锐, 张晟, 申国栋等 2020 中国科学: 物理学 力学 天文学 **11** 112011]
- [9] Zhao Y T, Zhang Z M, Cheng R, et al. 2020 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **11** 112004 (in Chinese) [赵永涛, 张子民, 程锐等 2020 中国科学: 物理学 力学 天文学 **11** 112004]
- [10] Ni P, Hoffmann D, Kulish M, Nikolaev D, Tahir N A, Udrea S, Varentsov D, Wahl H 2006 *J. Phys. IV France.* **133** 977
- [11] Mintsev V, Kim V, Lomonosov I, Nikolaev D, Ostriak A, Shilkin N, Shutov A, Ternovoi V, Yuriev D, Fortov V, Golubev A, Kantsyrev A, Varentsov D, Hoffmann D 2016 *Contrib. Plasma Phys.* **56** 281
- [12] Cheng R, Lei Y, Zhou X M, Wang Y Y, Chen Y H, Zhao Y T, Ren J R, Sheng L N, Yang J C, Zhang Z M, Du Y C, Gai W, Ma X W, Xiao G Q 2018 *MRE* **3** 85
- [13] Frenje J A, Grabowski P E, Li C K, Seguin F H, Zylstra A B, Gatu Johnson M, Petrasso R D, Yu Glebov V, Sangster T C 2015 *Phys. Rev. Lett.* **115** 205001
- [14] Ren J R, Deng Z G, Qi W, et al. 2020 *Nat. Commun.* **11** 5157
- [15] Roth M, Stöckl C, Stüss W, Iwase O, Gericke D O, Bock R, Hoffmann D, Geissel M, Seelig W 2000 *Europhys. Lett.* **50** 28
- [16] Frank A, Blazevic A, Grande P L, et al. 2010 *Phys. Rev. E* **81** 026401
- [17] Frank A, Blazevic A, Bagnoud V, Basko M M, Börner M, Cayzac W, Kraus D, Heßling T, Hoffmann D, Ortner A, Otten A, Pelka A, Pepler D, Schumacher D, Tauschwitz An, Roth M 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 115001
- [18] Cayzac W, Bagnoud V, Basko M M, Blazevic A, Frank A, Gericke D O, Hallo L, Malka G, Ortner A, Tauschwitz An, orberger J V, Roth M 2015 *Phys. Rev. E* **92** 053109
- [19] Cayzac W, Frank A, Ortner A, et al. 2017 *Nat. Commun.* **8** 15693
- [20] Cheng R, Hu Z H, Hui D X, Zhao Y T, Chen Y H, Gao F, Lei Y, Wang Y Y, Zhu B L, Yang Y, Wang Z, Zhou Z X, Wang Y N, Yang J 2021 *Phys. Rev. E* **103** 063216
- [21] Cheng R, Zhou X M, Wang Y Y, Lei Y, Chen Y H, Ma X W, Xiao G Q, Zhao Y T, Ren J R, Huo D, Peng H, Savin S, Gavrilin R, Roudskoy I, Golubev A 2018 *Laser Part. Beams* **36** 98
- [22] Zhao Y T, Zhang Y N, Cheng R, He B, Liu C L, Zhou X M, Lei Y, Wang Y Y, Ren J R, Wang X, Chen Y H, Xiao G Q, Savin S M, Gavrilin R, Golubev A A, Hoffmann D 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 115001
- [23] Lei Y, Cheng R, Zhao Y T, Zhou X M, Wang Y Y, Chen Y H, Wang Z, Zhou Z X, Yang J, Ma X W 2021 *Laser Part. Beams* **2021** 1

- [24] Lei Y, Cheng R, Zhou X M, Wang X, Wang Y Y, Ren J R, Zhao Y T, Ma X W, Xiao G Q 2018 *Eur. Phys. J. D* **72** 1
- [25] Wang Z, Cheng R, Xue F B, et al. 2020 *Phys. Scr.* **95** 105404
- [26] Wang Z, Guo B, Cheng R, Xue F B, Chen Y H, Lei Y, Wang Y Y, Zhou Z X, Yang J, Su M G, Dong C Z 2021 *Phys. Rev. A* **104** 022802
- [27] Wang G D, Cheng R, Wang Z, Zhou Z X, Luo X H, Shi L L, Chen Y H, Lei Y, Wang Y Y, Yang J 2023 *Acta phys. Sin.* **72** 043401 (in Chinese) [王国东, 程锐, 王昭, 周泽贤, 骆夏辉, 史路林, 陈燕红, 雷瑜, 王瑜玉, 杨杰 2023 物理学报 **72** 043401]
- [28] Zhou Z X, Guo B, Cheng R, et al. 2022 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **1026** 166191
- [29] Vernhet D, Adoui L, Rozet J P, Wohrer K, Chetoui A, Cassimi A, Grandin J P, Ramillon J M, Cornille M, Stephan C 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 3625
- [30] Peter T, Meyer-ter-Vehn J 1991 *Phys. Rev. A* **43** 1998
- [31] Li C K, Petrasso R D 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 3059
- [32] Schlanges M, Gericke D O 1999 *Phys. Rev. E* **60** 904
- [33] Gericke D O, Schlanges M 2003 *Phys. Rev. E* **67** 037401
- [34] Zhang S, Chen C, Lan T, et al. 2020 *Rev. Sci. Instrum.* **91** 063501
- [35] Lan T, Zhang S, Ding W X, et al. 2021 *Rev. Sci. Instrum.* **92** 093506
- [36] Luo X H, Cheng R, Wang G D, Zhou Z X, Wang Z, Yang J 2022 *Nucl. Phys. Rev.* **39** 490 (in Chinese) [骆夏晖, 程锐, 王国东, 周泽贤, 王昭, 杨杰 2022 原子核物理评论 **39** 490]
- [37] Cao S Q, Su M G, Zhao H Y, Zhang J J, Min Q, Sun D X, He S Q, Zhao H W, Dong C Z 2022 *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica* **50** 065202 (in Chinese) [曹世权, 苏茂根, 赵环昱, 张俊杰, 敏琦, 孙对兄, 何思奇, 赵红卫, 董晨钟 2022 中国科学: 物理学 力学 天文学 **50** 065202]
- [38] Tolstikhina I Y, Shevelko V P 2018 *Physics-Uspeski* **61** 247
- [39] Bethe H 1930 *Annalen der Physik (Leipzig)* **397** 325
- [40] Gardes D, Servajean A, Kubica B, Fleurier C, Hong D, Deutsch C, Maynard G 1992 *Phys. Rev. A* **46** 5101

# Experimental setup for interaction between highly charged ions and laser-produced plasma near Bohr velocity energy region<sup>\*</sup>

Shi Lu-Lin<sup>1)2)</sup> Cheng Rui<sup>2)3)4)†</sup> Wang Zhao<sup>2)3)</sup> Cao Shi-Quan<sup>1)</sup>  
 Yang Jie<sup>2)3)4)</sup> Zhou Ze-Xian<sup>1)2)</sup> Chen Yan-Hong<sup>2)</sup> Wang Guo-Dong<sup>2)3)</sup>  
 Hui De-Xuan<sup>2)5)</sup> Jin Xue-Jian<sup>2)3)</sup> Wu Xiao-Xia<sup>2)</sup> Lei Yu<sup>2)</sup>  
 Wang Yu-Yu<sup>2)3)4)</sup> Su Mao-Gen<sup>1)‡</sup>

1) (*Gansu Provincial Key Laboratory of Atomic and Molecular Physics and Functional Materials, Faculty of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China*)

2) (*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

4) (*Advanced Energy Science and Technology Guangdong Laboratory, Huizhou 516000, China*)

5) (*School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

( Received 15 February 2023; revised manuscript received 4 May 2023 )

## Abstract

Ion energy loss in the interaction between highly charged ions and dense plasma near Bohr velocity energy region is one of the important physical problems in the field of high-energy density physics driven by intense heavy ion beams. Based on the 320 kV experimental platform at the Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, a new experimental setup was built for the research of interaction between ions and laser-produced plasma near the Bohr velocity, where the ion energy loss and charge state distribution can be experimentally investigated. In this paper we introduce the new setup in detail, including the generation and controlling of pulsed ion beam ( $\geq 200$  ns); the preparation of high-density laser plasma target ( $10^{17}$ – $10^{21}$  cm<sup>-3</sup>); the diagnostics of plasma and the developed high energy resolution ion measurement system ( $< 1\%$ ). In the experiment, the charge distribution of Xe<sup>15+</sup> ions with 4 MeV penetrating through the laser-produced Al plasma target is measured. The charge-state analysis device observes different results without and with the plasma, in which the outgoing Xe ion charge-state changes correspondingly from the 15+ to 10+, thus the electron capture process is believed to be dominant. In addition, the proton energy loss is also measured by using the magnetic spectrometer, showing that the experimental energy loss is about 2.0 keV, 30% higher than those theoretical predictions, which can be attributed to the fact that in the near Bohr velocity energy regime, the first-order Born approximation condition is not valid, thus the Bethe model and SSM model are inapplicable to the experimental results. In future, a systematic study will be performed based on our ions-plasma interaction setup, and the energy loss and charge state data will be introduced.

**Keywords:** near Bohr velocity energy region, highly charged ions, laser-produced plasma, energy loss, energy loss model

**PACS:** 34.50.Bw, 52.40.Mj, 52.58.Hm

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230214

<sup>\*</sup> Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2022YFA1602500), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12064040, 12204382), the Funds for International Cooperation and Exchange of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12120101005), and the Natural Science Foundation of Gansu Province, China (Grant No. 21JR7RA129).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [chengrui@impcas.ac.cn](mailto:chengrui@impcas.ac.cn)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [sung@nwnu.edu.cn](mailto:sung@nwnu.edu.cn)

## 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

史路林 程锐 王昭 曹世权 杨杰 周泽贤 陈燕红 王国东 惠得轩 金雪剑 吴晓霞 雷瑜 王瑜玉 苏茂根

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

Shi Lu-Lin Cheng Rui Wang Zhao Cao Shi-Quan Yang Jie Zhou Ze-Xian Chen Yan-Hong Wang Guo-Dong Hui De-Xuan Jin Xue-Jian Wu Xiao-Xia Lei Yu Wang Yu-Yu Su Mao-Gen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 133401 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230214

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230214>

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

重离子在碳化硅中的输运过程及能量损失

Transport process and energy loss of heavy ions in silicon carbide

物理学报. 2021, 70(16): 162401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210503>

利用质子能损检测气体靶区有效靶原子密度的实验研究

Experimental investigation on diagnosing effective atomic density in gas-type target by using proton energy loss

物理学报. 2018, 67(4): 044101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172028>

Bragg峰能区Xe<sup>20+</sup>与不同靶作用产生的X射线

X-rays produced by interaction of Xe<sup>20+</sup> with different targets in Bragg peak energy region

物理学报. 2021, 70(18): 183201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210215>

相对论强激光与近临界密度等离子体相互作用的质子成像

Proton imaging of relativistic laser-produced near-critical-density plasma

物理学报. 2019, 68(15): 155201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190610>

质子照相中基于能量损失的密度重建

Density reconstruction based on energy loss in proton radiography

物理学报. 2018, 67(20): 206101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181039>

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>