

专题: 极端条件原子分子动力学

激光加速低能碳离子束在 CHO 泡沫中的
电荷转移过程^{*}程渝¹⁾ 任洁茹^{1)†} 马步博¹⁾ 刘云¹⁾ 赵子乾¹⁾ 魏文青¹⁾Dieter H. H. Hoffmann¹⁾ 邓志刚²⁾ 齐伟²⁾ 周维民²⁾程锐³⁾ 李忠良⁴⁾ 宋磊⁵⁾ 李源⁵⁾ 赵永涛^{1)‡}

1) (西安交通大学物理学院, 西安 710049)

2) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 等离子体物理实验室, 绵阳 621900)

3) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

4) (中陕核工业集团, 陕西秦洲核与辐射安全技术有限公司, 西安 710000)

5) (中陕核工业集团, 中陕核(西安)中子科技有限公司, 西安 710100)

(2025 年 5 月 15 日收到; 2025 年 6 月 18 日收到修改稿)

离子与物质相互作用中的电荷转移过程研究对于离子束驱动高密度物理、材料离子辐照损伤、离子束电荷剥离技术等领域至关重要. 本文利用激光驱动靶背鞘层加速机制产生了能量在数 MeV 量级的碳离子束, 测量了碳离子束穿过具有孔状结构的 $C_9H_{16}O_8$ 泡沫靶后的电荷态分布. 实验结果与理论对比发现, 只有同时考虑了电离、俘获、激发和退激等过程的速率方程结果与实验符合很好. 采用气体靶截面数据求解速率方程获得的平衡电荷态低估了实验值, 原因在于泡沫结构靶中固态纤维丝引起的靶密度效应导致离子电荷态升高. 当离子能量高于 3 MeV 以上时, 实验值与采用了固体靶截面数据的速率方程理论预期一致; 但在低能区出现明显偏差, 原因在于当入射能量小于 3 MeV 时, 离子激发态寿命小于碰撞时间尺度, 激发态电子在发生第二次碰撞之前退激回到基态, 靶密度效应减弱, 平均电荷态降低, 实验结果与详细考虑了激发和退激过程的 ETACHA 程序预期吻合. 该工作为理解离子束与物质相互作用微观机制以及电荷转移模型检验提供了数据和参考.

关键词: 激光加速, 碳离子束, 电荷交换, 靶密度效应**PACS:** 41.75.Jv, 29.27.-a, 34.70.+e**DOI:** 10.7498/aps.74.20250634**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250634

1 引言

离子与物质相互作用的电荷转移过程是原子物理学的重要基础课题, 影响离子的电荷态演化^[1-3]

和能量损失^[4-6], 相关研究在加速器技术、天体物理、材料科学和生物医学等领域具有重要的应用价值. 在重离子加速器装置中, 通常利用离子束穿过气体或固体靶产生高电荷态离子, 提高离子束的加速效率^[7]. 离子-原子碰撞中的电荷交换过程是许

^{*} 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFA1603300)、国家自然科学基金 (批准号: 12422512, 12120101005, 12175174, 12405238)、国家资助博士后研究人员计划 (批准号: GZC20241372)、中国博士后科学基金 (批准号: 2024M762569)、陕西省自然科学基金基础研究计划 (批准号: 2024JC-TBZC-10)、陕西省创新能力支撑计划 (批准号: 2024ZC-KJXX-049)、陕西省博士后科研项目 (批准号: 2024BSHYDZZ014)、中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: xzy012025080) 和陕西省秦创原“科学家+工程师”项目 (批准号: 2023KXJ-226) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: renjieru@xjtu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: zhaoyongtao@xjtu.edu.cn

多天体环境中 X 射线发射的重要机制, 对于解释天文观测谱^[8], 反推日球层边界的结构和太阳风动态^[9], 揭示恒星演化、行星大气逃逸及宇宙线传播机制至关重要. 同时, 离子在物质中的电荷态是决定离子能量弛豫过程的关键参数 ($-\frac{dE}{dx} \propto \frac{Z_{\text{eff}}^2}{v^2} \times L$), 与离子束驱动产生高能量密度物质、离子束精准放射治疗、材料辐照损伤及抗辐照加固研究息息相关^[10–14].

过去的几十年里国内外发展了诸多理论模型或程序来预测离子在物质中的电荷态演化. 当入射离子速度远高于靶电子运动速度时, 直接电离机制起主导作用, 玻尔剥离准则^[15]和大量半经验模型^[16–25]预测的离子有效电荷态呈现良好的一致性. 这些半经验模型可以快速估算离子的平均电荷态, 在预测离子与物质相互作用中的电荷态演化及能量沉积等方面发挥着重要作用. 然而, 当离子能量降至百 keV/u 量级 (对应入射离子速度接近电子速度), 电子俘获、辐射退激或俄歇退激以及靶原子直接电离等多通道竞争效应显著增强, 导致现有理论模型对有效电荷态的预测偏离实验观测值^[26,27], 亟需高精度实验数据, 为相关理论模型提供检验.

1950 年, Lassen^[28]首次观察到离子与固体碳箔作用后的出射电荷明显高于从气体靶中出射的离子电荷. Bohr 和 Lindhard^[29]对此现象进行了解释: 当离子穿过固体靶时, 高电子密度和频繁碰撞使得离子碰撞时间尺度超过离子激发态寿命, 电子激发态退激前即被剥离, 电子俘获速率降低、库仑电离速率升高, 最终导致离子电荷态升高; 而在低密度的气体物质中, 入射离子电子壳层的碰撞激发会因自发辐射跃迁迅速衰减至基态, 电离过程主要从基态发生, 产生的离子电荷态较低, 即靶密度效应^[30,31]. 这一解释后来在 GSI 加速器装置上得到了验证^[7]. 但是, 该实验主要针对高能离子, 而靶密度效应与离子速度、靶原子序数以及靶密度密切相关, 针对低能区离子在介质中的靶密度效应和电荷交换研究仍未得到充分的实验验证. 目前离子在物质中的电荷交换实验和理论研究主要集中于固体靶和气体靶, 针对泡沫材料的相关研究比较少, 确定低能离子在泡沫中的电荷演化实验数据更是缺乏. 自 1931 年 Kistler^[32]用硅酸钠 (sodium silicate) 制成气凝胶以来, 这种凝胶类或泡沫状物质已经有了很大的发展. 该泡沫材料可以在百摄氏度下保持

稳定, 被加热时也主要在孔隙内部发生膨胀, 对靶的整体结构影响较小, 已被广泛应用于激光等离子体实验^[33–36].

本文基于星光 III 强激光装置开展了激光加速中低能 (1.5—4.5 MeV) 碳离子在醋酸三纤维素 (tri-cellulose acetate, TCA) $\text{C}_9\text{H}_{16}\text{O}_8$ 泡沫中的平衡电荷态分布实验测量. 理论上基于半经验公式和求解速率方程, 考虑了电离、俘获、激发和退激等电荷交换过程, 获得了离子的平均平衡电荷态. 实验结果与理论对比发现, 只有同时考虑了电离、俘获、激发和退激等过程的速率方程结果与实验符合较好. 采用气体靶截面数据求解速率方程的理论值低估了实验值, 原因在于泡沫靶中固态纤维丝引起的靶密度效应导致离子电荷态升高. 当离子能量高于 3 MeV 时, 实验值与采用了固体靶截面数据的速率方程理论预期一致; 但在低能区出现明显偏差, 原因在于当入射能量小于 3 MeV 时, 离子激发态寿命小于碰撞时间尺度, 激发态电子在发生第 2 次碰撞之前退激发回到基态, 靶密度效应减弱, 平均电荷态降低.

2 实验方法

基于中国工程物理研究院激光聚变研究中心的星光 III 强激光装置, 开展电荷交换实验的实验装置布局如图 1 所示. 皮秒激光脉冲 (能量 130 J, 脉宽 843 fs) 作用在 10 μm 厚的平面铜箔上, 由于铜箔表面通常附有碳氢化合物和水蒸气组成的纳米厚污染层, 激光与铜箔作用时, 激光在靶前表面

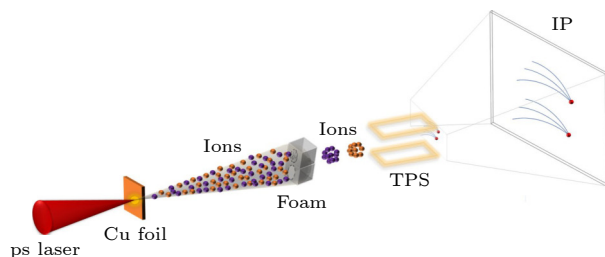


图 1 皮秒激光聚焦在铜箔上, 通过 TNSA 机制产生强流碳离子束. 使用与 IP 耦合的双通道 TPS 记录穿过泡沫靶和空靶的碳离子能谱

Fig. 1. Experimental setup. A picosecond laser is focused onto a copper foil, generating an intense carbon ion beam through the TNSA mechanism. The energy spectra of carbon ions passing through the foam target and the empty hole are measured with a dual-channel TPS coupled to the IP.

产生的大量高能电子穿过靶后时形成鞘层场, 将污染层中的碳氢原子电离并加速, 即靶法向鞘场加速 (target normal sheath acceleration, TNSA), 从而获得能量范围较宽的质子束和碳离子束 [37–41], 本文仅讨论碳离子. 碳离子束经过 1.15 cm 后与泡沫靶发生相互作用, 离子能谱由汤姆孙谱仪 (Thomson parabola spectrometer, TPS) 结合 Fuji 成像板 (image plate, IP) 测量.

实验中使用上下对称的双孔靶设计, 上孔为泡沫靶, 下孔为空通孔, 汤姆孙谱仪为双通道的汤姆孙谱仪, 激光加速碳离子同时穿过泡沫靶和空靶, 进入双通道汤姆孙谱仪. 这种方式可以单发同步测得激光加速离子束与泡沫靶作用前后的能谱分布. 实验中的泡沫靶由体密度为 2 mg/cm^3 , 厚度为 1 mm 的 $\text{C}_9\text{H}_{16}\text{O}_8$ 泡沫组成, 该泡沫具有多孔结构, 孔径直径大多数小于 $2 \mu\text{m}$, 纤维丝半径大多在 10–50 nm 之间. 这种泡沫材料和靶的设计已经在质子能量损失 [34]、实验室天体物理 [35] 和离子

在等离子体中的电荷交换 [42] 等实验中广泛使用. 该实验设计方案已经成功应用于 5–10 MeV 碳离子在泡沫中的靶密度效应研究 [43], 本文只讨论低能区的平均电荷态结果.

3 结果与讨论

碳离子束穿过空靶和泡沫靶后测得的能谱分布如图 2(a), (b) 所示, 穿过空靶后的碳离子, 即激光加速产生的初始碳离子包含 C^{6+} , C^{5+} , C^{4+} , C^{3+} , C^{2+} 多种类离子, 其中 C^{4+} 离子数目最多. 穿过泡沫靶后的碳离子数目整体降低, 能谱发生明显移动. 离子束穿过空靶和泡沫靶后的电荷分布如图 2(c), (d) 所示, 其中, 激光 TNSA 机制加速的碳离子初始电荷态分布主要集中在 C^{4+} 价态, 激光直接加速出的碳离子在 C^{5+} , C^{2+} 和 C^{3+} 离子的占比较小. 在穿过泡沫靶后, 由于靶中原子与碳离子发生复杂的库仑碰撞电离和电子俘获等相互作用, 碳离子的电荷态分布发生明显变化, 主要表现为初始比例最高

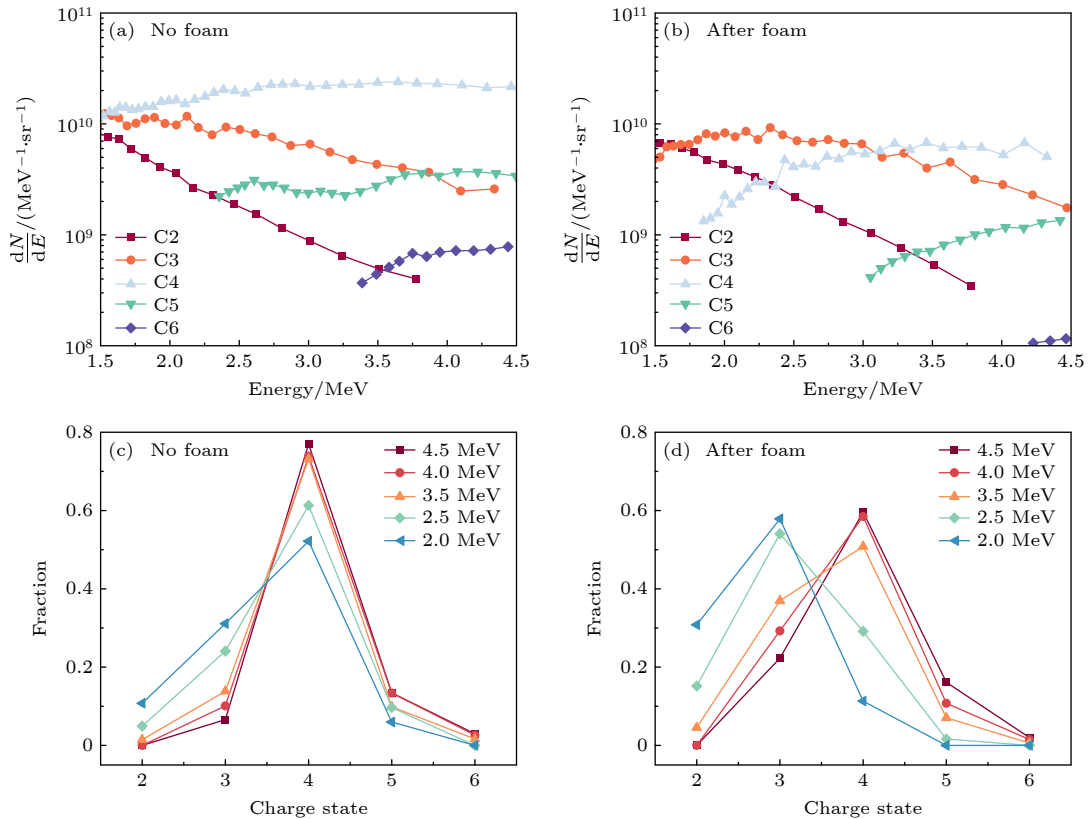


图 2 激光加速的碳离子分布 (a) 穿过空靶的能谱分布; (b) 穿过泡沫靶的能谱分布; (c) 穿过空靶的电荷分布; (d) 穿过泡沫靶的电荷分布

Fig. 2. Carbon ions distribution of laser-accelerated: (a) The energy spectra of passing through without target; (b) the energy spectra of passing through foam target; (c) charge state distribution of passing through without foam; (d) charge state distribution of passing through foam target.

的 C^{4+} 离子数目显著减少, 同时更低电荷态的离子 (C^{2+} 和 C^{3+}) 占比明显增大, 且离子能量越低, 这种趋势越明显, 原因在于随着离子能量降低, 电子俘获概率增大, 电离概率降低.

离子在穿过靶物质时的平衡长度一般与离子速度、靶物质密度、离子电荷态等参数有关. 在固体靶中, 离子达到平衡电荷状态所需的长度 (或时间) 主要是入射离子速度 (或能量) 的函数. Hattass 等^[44] 实验证明, 离子在固体中的平衡长度约 nm 量级, 平衡时间在 fs 量级. 因此, 本文实验测量到的平均电荷态可以合理地认为是出射碳离子的平衡电荷态. 根据碳离子的能谱分布, 图 3 给出了碳离子穿过空靶和泡沫靶后的平均电荷态 $\bar{Q} = \sum_q q F_q(E)$, 其中 $F_q(E)$ 表示电荷量为 q 、能量为 E 的碳离子数占比. 结果显示, 碳离子在与泡沫靶相互作用后, 平均电荷态有所降低. 例如, 对于动能为 2 MeV 的碳离子, 平均电荷态从 3.5 减小到 2.8, 降幅约 25%.

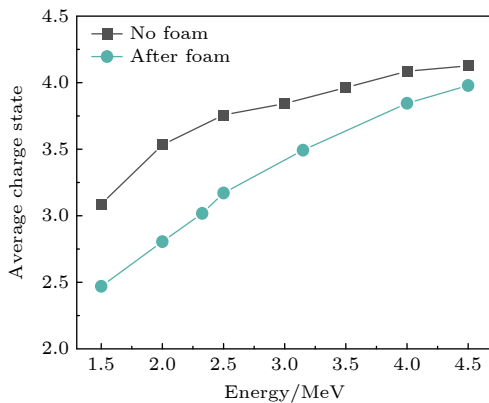


图 3 碳离子穿过泡沫靶前后的平均电荷态实验值

Fig. 3. Experimental data of average charge state of carbon ions before and after passing foam target.

碳离子束穿过泡沫靶后的平均平衡电荷态实验测量值与基于玻尔剥离准则^[15]和 Northcliffe 公式^[25]对比如图 4(a) 所示. 其中, Basko 公式^[24]预测值远低于实验值, 该公式更适用原子序数 Z 大于 20 的离子; Anthony 经验公式^[16]适用于入射离子原子序数 $6 \leq Z_p \leq 53$ 、靶物质 $6 \leq Z_t \leq 79$ 的数据拟合; Ziegler 公式^[17]在 Northcliffe 公式^[25]基础上考虑了靶内电子运动对入射离子有效电荷的影响; Kreussler 模型^[18]在不考虑热速度而考虑离子与靶电子间的相对速度时也可用于冷物质中的电荷计算; Nikolaev 和 Dmitriev 半经验公式^[19]

用于拟合部分原子序数大于 20 的实验数据. 上述模型预测值整体高估了实验值. Brown 公式^[20]基于重离子在薄靶中的数据; Shima 半经验公式^[21]拟合入射离子原子序数大于 8、能量小于 6 MeV/u 以及靶物质 $4 \leq Z_t \leq 79$ 的实验数据; Drouin 经验公式^[22]基于部分重离子在固体靶中的实验数据; Schiwietz 和 Grande 拟合公式^[23]适用于入射离子原子序数 $1 \leq Z_p \leq 92$ 、靶物质 $4 \leq Z_t \leq 83$ 的实验数据. 这些经验公式在能量大于 3 MeV 时能较好地预测电荷态, 在能量小于 3 MeV 时明显高于实验值.

为了对离子与泡沫相互作用中的具体电荷交换过程进行解析, 需要计算电离和俘获截面以及求解速率方程. 当离子与物质相互作用时, 其电荷分布通过求解速率方程得到:

$$\sum_k F_k(E) \sigma_{k,i}(Z_t, Z) - F_i(E) \sum_k \sigma_{i,k}(Z_t, Z) = 0, \quad (1)$$

$$\sum_k F_k(E) = 1,$$

其中, $\sigma_{i,k}(Z_t, E)$ 为电荷转移截面; i, k 分别表示离子碰撞前后的状态; F 表示各价态碳离子数占比. 碳离子在气体密度和固体密度介质中的单电子 (single electron, SE) 和双电子 (double electron, DE) 过程的电荷转移截面由电荷变化截面程序 (charge changing cross sections code, CCCS code)^[45,46] 计算得到. 该程序可以给出能量 0.001—50 MeV/u、原子序数 5—54 的入射离子在气体和固体介质中的电荷转移截面. 将该截面数据代入速率方程, 求解后获得各价态离子的占比, 进而得到碳离子在介质中的平均平衡电荷态 $\bar{q}_{eq} = \sum_k k F_k(E)$. 图 4(b) 对比了碳离子束穿过泡沫靶后的平均平衡电荷态实验测量值与速率方程理论预期. 结果表明, 双电子过程的加入对电荷态的影响可以忽略, 这是因为激光直接加速出的碳离子平均电荷态约为 4, 同时电离失去两个电子或俘获两个电子的概率很小, 单电子过程为主要过程. 采用气体靶截面数据求解速率方程获得的平衡电荷态远远低估了实验值, 原因在于泡沫靶是由纤维丝和孔隙结构组成, 碳离子穿过该结构靶中的固态纤维丝引起的靶密度效应导致离子电荷态升高.

在求解速率方程过程中采用固体截面数据时, 可以较好地预测离子能量高于 3 MeV 的实验值,

在低于 3 MeV 区间内出现明显偏差, 理论高估了实验值. 离子在介质中的电荷转移靶密度效应的内在物理原因在于离子激发态寿命与离子-原子碰撞时间尺度之间的竞争关系, 与靶密度、离子速度、离子原子序数息息相关. 只有当激发态寿命大于碰撞时间尺度时, 离子激发态在未退激发回到基态发生二次碰撞, 处于高激发态的电子极易被碰撞电离, 最终造成电离截面增大而俘获截面减小, 离子电荷态升高.

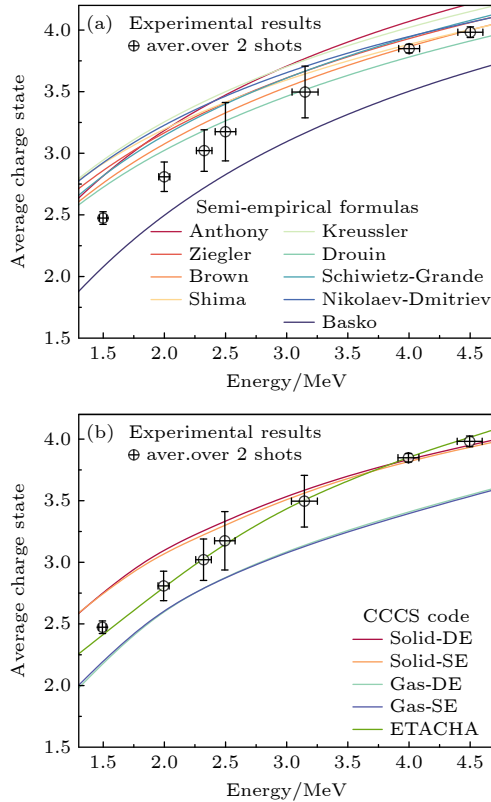


图 4 测量的平均电荷态与理论预测值的比较 (a) 与半经验模型比较; (b) 与通过求解速率方程得出的预测值的比较. 实验数据是两发次的平均值, 其中能量误差为 TPS 对各电荷态碳离子能量分辨的最小值, 电荷态误差源于实验统计误差和发次抖动误差

Fig. 4. Comparison of measured average charge states with theoretical predictions: (a) The comparison with semiempirical models; (b) the comparison with predictions through solving rate equations. The experimental data are averaged over two shots, the error bars of energy represent the energy resolution of the TPS for the ion species that has the lowest resolution, the error bars of the average charge state originate from the statistical errors and shot-to-shot fluctuations.

对于本实验当前的碰撞系统, 不同能量 C^{4+} 离子的激发态寿命和碰撞时间尺度的对比如图 5 所示, 当入射离子能量大于 3 MeV 时, 碳离子激发态

寿命大于相邻碰撞时间尺度, 靶密度效应起重要作用, 故实验测得的离子平均平衡电荷态与基于固体截面的速率方程解符合较好. 当入射离子能量小于 3 MeV 时, 碳离子激发态寿命小于相邻碰撞时间尺度, 靶密度效应减弱, 离子电荷降低. 碳离子束穿过泡沫靶后的平均平衡电荷态实验测量值与 ETACHA 代码 [47–49] 对比如图 4(b) 所示, 理论与实验结果整体符合很好, 原因在于该程序对能量大于 0.1 MeV/u 的入射离子, 充分考虑了离子-原子碰撞中的俘获、电离、激发以及辐射和俄歇退激过程, 进一步验证了激发态对离子电荷交换过程的重要贡献及其与离子能量的依赖关系.

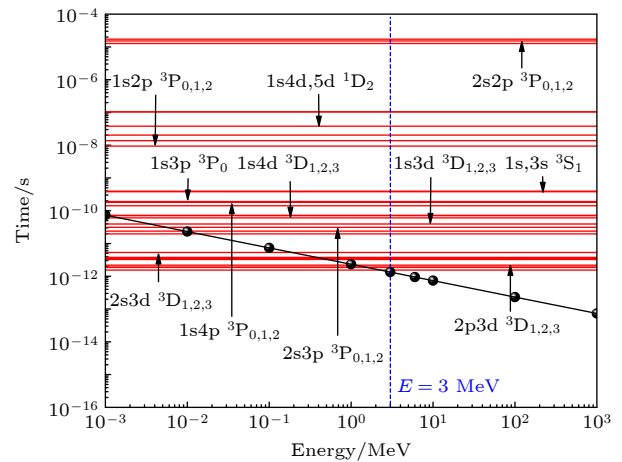


图 5 碳离子激发态寿命 (红线) 及碰撞时间尺度 (黑线) 与能量的关系, 其中激发态寿命的数据引自文献 [50]

Fig. 5. Carbon ion excited state lifetime (red line) and collision time scale (black line) versus energy. Results for excited state lifetime are taken from Ref.[50].

4 结 论

本文基于绵阳激光聚变中心星光 III 装置, 开展了 1.5—4.5 MeV 碳离子在 CHO 泡沫靶中的电荷转移过程实验研究及相应的理论分析. 结果表明, 泡沫结构靶中存在明显的靶密度效应, 即离子激发态在未退激发回到基态发生二次碰撞被电离, 造成电离截面增大而俘获截面减小, 离子电荷态升高现象. 这种靶密度效应与靶密度和离子能量密切相关, 在本文碰撞系统中, 离子能量高于 3 MeV 时, 靶密度效应作用显著, 低于 3 MeV 时, 靶密度效应减弱. 只有详细考虑了电离、俘获、激发和退激等过程的 ETACHA 程序可以较好地预测实验结果.

参考文献

- [1] Shima K, Kuno N, Yamanouchi M 1989 *Phys. Rev. A* **40** 3557
- [2] 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 H H 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 115001
- [3] Rothard H, Grandin J P, Jung M, Clouvas A, Rozet J P, Wünsch R 1997 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **132** 359
- [4] Betz H D 1972 *Rev. Mod. Phys.* **44** 465
- [5] Deutsch C, Maynard G 2016 *Matter Radiat. Extremes* **1** 277
- [6] Gao J, Hu Z, Wu Y, Wang J, Sisourat N, Dubois A 2021 *Matter Radiat. Extremes* **6** 014404
- [7] Erb W 1978 GSI Report GSI-P-78 (Darmstadt)
- [8] Ali R, Beiersdorfer P, Harris C L, Neill P A 2016 *Phys. Rev. A* **93** 012711
- [9] Ma X W, Zhang S F, Wen W Q, Huang Z K, Hu Z M, Guo D L, Gao J W, Najjari B, Xu S Y, Yan S C, Yao K, Zhang R T, Gao Y, Zhu X L 2022 *Chin. Phys. B* **31** 093401
- [10] Kawata S, Karino T, Ogoyski A I 2016 *Matter Radiat. Extremes* **1** 89
- [11] Hofmann I 2018 *Matter Radiat. Extremes* **3** 1
- [12] Zhao Q, Cao S C, Liu M, Sheng X K, Wang Y R, Zong Y, Zhang X M, Jing Y, Cheng R, Zhao Y T, Zhang Z M, Du Y C, Gai W 2016 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **832** 144
- [13] Zhao Y, Zhang Z, Gai W, Du Y, Cao S, Qiu J, Zhao Q, Cheng R, Zhou X, Ren J, Huang W, Tang C, Xu H, Zhan W 2016 *Laser Part. Beams* **34** 338
- [14] 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 Science and Engineering*. **2** e39
- [15] Bohr N 1941 *Phys. Rev.* **59** 270
- [16] Anthony J M, Lanford W A 1892 *Phys. Rev. A* **25** 1868
- [17] Ziegler J F, Biersack J P 1985 *Treatise on Heavy-Ion Science* **6** 93
- [18] Kreussler S, Varelas C, Brandt W 1981 *Phys. Rev. B* **23** 82
- [19] Nikolaev V S, Dmitriev I S 1968 *Phys. Lett. A* **28** 277
- [20] Brown M D, Moak C D 1972 *Phys. Rev. B* **6** 90
- [21] Shima K, Ishihara T, Mikumo T 1982 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **200** 605
- [22] To K X, Drouin R 1976 *Phys. Scr.* **14** 277
- [23] Schiwietz G, Grande P L 2001 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **175** 125
- [24] Basko M M 1984 *Sov. J. Plasma Phys.* **10** 689
- [25] Northcliffe L C 1960 *Phys. Rev.* **120** 1744
- [26] Gauthier M, Chen S N, Levy A, Audebert P, Blancard C, Ceccotti T, Cerchez M, Doria D, Floquet V, Lamour E, Peth C, Romagnani L, Rozet J P, Scheinder M, Shepherd R, Toncian T, Vernhet D, Willi O, Borghesi M, Faussurier G, Fuchs J 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 135003
- [27] Tolstikhina I Y, Shevelko V P 2018 *Phys.-Usp.* **61** 247
- [28] Lassen N O 1950 *Phys. Rev.* **79** 1016
- [29] Bohr N, Lindhard J 1954 *Dan. Mat. Fys. Medd.* **28** 1
- [30] Shevelko V P, Rosmej O, Tawara H, Tolstikhina I Y 2004 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **37** 201
- [31] Shevelko V P, Tawara H, Ivanov O V, Miyoshi T, Noda K, Sato Y, Subbotin A V, Tolstikhina I Y 2005 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **38** 2675
- [32] Kistler S S 1931 *Nature* **127** 741
- [33] Rosmej O N, Suslov N, Martsovenko D, Vergunova G, Borisenko N, Orlov N, Rienecker T, Klir D, Rezacck K, Orekhov A, Borisenko L, Krousky E, Pfeifer M, Dudzak R, Maeder R, Schaechinger M, Schoenlein A, Zaechter S, Jacoby J, Limpouch J, Ullschmied J, Zhidkov N 2015 *Plasma Phys. Control. Fusion* **57** 094001
- [34] Ren J R, Deng Z G, Qi W, Chen B Z, Ma B B, Wang X, Yin S, Feng J H, Liu W, Xu Z F, Hoffmann D H H, Wang S Y, Fan Q P, Cui B, He S K, Cao Z R, Zhao Z Q, Cao L F, Gu Y Q, Zhu S P, Cheng R, Zhou X M, Xiao G Q, H W, Zhang Y H, Zhang Z, Li Y T, Wu D, Zhou W M, Zhao Y T 2020 *Nat. Comm.* **11** 5157
- [35] Ma B B, Ren J R, Wang S Y, Hoffmann D H H, Deng Z G, Qi W, Wang X, Yin S, Feng J H, Fan Q P, Liu W, Xu Z F, Chen Y, Cui B, He S K, Cao Z R, Zhao Z Q, Gu Y Q, Zhu S P, Cheng R, Zhou X M, Xiao G Q, Zhao H W, Zhang Y H, Zhang Z, Li Y T, Xu X, Wei W Q, Chen B Z, Zhang S Z, Hu Z M, Liu L R, Li F F, Xu H, Zhou W M, Cao L F, Zhao Y T 2021 *Astrophys. J.* **920** 106
- [36] Renner O, Klimo O, Krus K, Nicolai P, Poletaeva A, Bukharskii N, Tikhonchuk V T 2025 *Matter Radiat. Extremes* **10** 037403
- [37] Braenzel J, Andreev A A, Platonov K, Klingsporn K, Ehrentraut L, Sandner W, Schnürer M 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 124801
- [38] Henig A, Steinke S, Schnürer M, Sokollik T, Hörlein R, Kiefer D, Jung D, Schreiber J, Hegelich B M, Yan X Q, Meyerter V J, Tajima T, Nickles P V, Sandner W, Habs D 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 245003
- [39] Braenzel J, Barriga-Carrasco M D, Morales R, Schnürer M 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 184801
- [40] Zhu J G, Lu H Y, Zhao Y, Lai M F, Gu Y L, Xu S X, Zhou C T 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 194102 (in Chinese) [朱军高, 卢海洋, 赵媛, 赖美福, 古永力, 徐世祥, 周海涛 2022 物理学报 **71** 194102]
- [41] Zhao S A, Lin C, Chen J E, Ma W J, Wang J J, Yan X Q 2016 *Chin. Phys. Lett.* **33** 035202
- [42] Ren J R, Ma B B, Liu L R, et al. 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 095101
- [43] Ma B B, Ren J R, Liu L R, Wei W Q, Chen B Z, Zhang S Z, Xu H, Hu Z M, Li F F, Wang X, Li W X, Li Q Y, Yin S, Feng J H, Zhou X M, Gao Y F, Li Y, Shi X H, Li J X, Ren X G, Xu Z F, Deng Z G, Qi W, Wang S Y, Fan Q P, Cui B, Wang W W, Yuan Z Q, Teng J, Wu Y C, Cao Z R, Zhao Z Q, Gu Y Q, Cao L F, Zhu S P, Cheng R, Lei Y, Wang Z, Zhou X X, Xiao G Q, Zhao H W, Hoffmann D H H, Zhou W M, Zhao Y T 2024 *Phys. Rev. A* **109** 042810
- [44] Hattass M, Schenkel T, Hamza A V, Barnes A V, Newman M W, McDonald J W, Niedermayr T R, Machicoane G A, Schneider D H 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 4795
- [45] Charge changing cross sections code, Novikov N V <http://cdf.sinp.msu.ru/services/cccc/htm/> [2024-7-28]
- [46] Novikov N V, Teplova Y A 2014 *Phys. Lett. A* **378** 1286
- [47] Rozet J P, Stephan C, Vernhet D 1996 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **107** 67
- [48] Tarasov O B, Bazin D 2008 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **266** 4657
- [49] Lamour E, Fainstein P D, Galassi M, Prigent C, Ramirez C A, Rivarola R D, Rozet J P, Trassinelli M, Vernhet D 2015 *Phys. Rev. A* **92** 042703
- [50] Manai S, Salhi D E, Nasr S B, Jelassi H 2022 *Res. Phys.* **37** 105487

SPECIAL TOPIC—Dynamics of atoms and molecules at extremes

Charge transfer process of laser-accelerated low-energy carbon ion beams in porous CHO foams^{*}

CHENG Yu¹⁾ REN Jieru^{1)†} MA Bubo¹⁾ LIU Yun¹⁾ ZHAO Ziqian¹⁾
 WEI Wenqing¹⁾ Dieter H. H. Hoffmann¹⁾ DENG Zhigang²⁾ QI Wei²⁾
 ZHOU Weimin²⁾ CHENG Rui³⁾ LI Zhongliang⁴⁾ SONG Lei⁵⁾
 LI Yuan⁵⁾ ZHAO Yongtao^{1)‡}

¹⁾ (*School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

²⁾ (*Plasma Physics Laboratory, Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

³⁾ (*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

⁴⁾ (*Shaanxi Qinzhou Nuclear and Radiation Safety Technology Company,
China-Shaanxi Nuclear Industry Corporation, Xi'an 710000, China*)

⁵⁾ (*China-Shaanxi Nuclear (Xi'an) Neutron Technology Company, China-Shaanxi Nuclear Industry Corporation, Xi'an 710100, China*)

(Received 15 May 2025; revised manuscript received 18 June 2025)

Abstract

Charge transfer processes in ion-matter interactions are crucial for ion beam-driven high-energy density physics, material irradiation damage, and charge state stripping in accelerator techniques. Here we generate carbon ion beams in the MeV energy range through target normal sheath acceleration (TNSA) mechanism, and measure the average charge state of 1.5–4.5 MeV carbon ion beams passing through porous C₉H₁₆O₈ foam with a volume density of 2 mg/cm³. The measured average charge states are compared with the average equilibrium charge-states predicted by semi-empirical formula and rate equation. The results show that the predictions from the rate equation that fully considers the ionization, capture, excitation, and de-excitation processes are in good agreement with experimental results. The prediction from the rate equation by using gas target cross-section data underestimates the experimental data, because the target density effect caused by the solid fiber filaments in the foam-structured target increases the ionization probability through frequent collisions, reduces the electron capture probability, and thus leads to an enhancement of ion charge states. In the projectile energy range above 3 MeV, the experimental data agree with the predictions from the rate equation using solid-target cross-section data. However, a significant deviation emerges in the energy region below 3 MeV due to the fact that in this energy range, the lifetime of ion excited states is shorter than the collisional time scale. In this case, excited electrons have time to de-excite the ground state before the second collision occurs. Consequently, the

^{*} Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFA1603300), the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 12422512, 12120101005, 12175174, 12405238), the Postdoctoral Fellowship Program of CPSF (Grant No. GZC20241372), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2024M762569), the Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province, China (Grant No. 2024JC-TBZC-10), the Innovation Capability Support Program of Shaanxi Province, China (Grant No. 2024ZC-KJXX-049), the Postdoctoral Research Funding Project of Shaanxi Province, China (Grant No. 2024BSHYDZZ014), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. xzy012025080), and the Qinchuangyuan “Scientists+Engineers” Program of Shaanxi Province, China (Grant No. 2023KXJ-226).

[†] Corresponding author. E-mail: renjieru@xjtu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: zhaoyongtao@xjtu.edu.cn

target density effects are weakened, and the charge states are reduced. The experimental results agree well with predictions from the ETACHA code that considers excitation and de-excitation processes in detail. This work provides the data and references for better understanding ion-matter interactions and distinguishing various charge exchange models.

Keywords: laser acceleration, carbon ion beam, charge transfer, target density effects

PACS: 41.75.Jv, 29.27.-a, 34.70.+e

DOI: [10.7498/aps.74.20250634](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250634)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250634](https://cstr.cn/32037.14/aps.74.20250634)

激光加速低能碳离子束在CHO泡沫中的电荷转移过程

程渝 任洁茹 马步博 刘云 赵子乾 魏文青 Dieter H. H. Hoffmann 邓志刚 齐伟 周维民 程锐 李忠良 宋磊
李源 赵永涛

Charge transfer process of laser-accelerated low-energy carbon ion beams in porous CHO foams

CHENG Yu REN Jieru MA Bubo LIU Yun ZHAO Ziqian WEI Wenqing Dieter H. H. Hoffmann
DENG Zhigang QI Wei ZHOU Weimin CHENG Rui LI Zhongliang SONG Lei LI Yuan ZHAO
Yongtao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 154102 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250634

CSTR: 32037.14.aps.74.20250634

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250634>

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

面向激光驱动质子束应用的弱聚焦磁场束线设计研究

Beamline design with weak-focusing magnetic field for applications of laser-driven proton beams

物理学报. 2022, 71(19): 194102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220599>

Au/CeO₂(111)表面吸附的电荷转移特性

Charge transfer characteristics of Au adsorption on CeO₂(111) surface

物理学报. 2025, 74(5): 053101 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241522>

态选择电荷交换实验测量以及对天体物理软X射线发射模型的检验

Experimental measurement of state-selective charge exchange and test of astrophysics soft X-ray emission model

物理学报. 2021, 70(8): 080702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201685>

考虑共振电荷转移的离子引出过程理论研究

Numerical research on ion extraction with resonant charge exchange process

物理学报. 2021, 70(14): 145201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210105>

质子碰撞硼原子非辐射的电荷转移过程

Non-radiative charge transfer process of proton impinging B atom

物理学报. 2023, 72(16): 163401 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230470>

基于ACE观测数据的太阳风电荷交换X射线辐射因子

Solar wind charge-exchange X-ray emission factor based on ACE observation data

物理学报. 2025, 74(10): 103201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241603>