



高电荷态原子物理: 电荷交换及其在X射线天文建模中的应用

魏宝仁^{1*}, 张瑞田^{2,3*}

1. 复旦大学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. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049

*联系人, 魏宝仁, E-mail: brwei@fudan.edu.cn; 张瑞田, E-mail: zhangrt@impcas.ac.cn

收稿日期: 2024-10-13; 接受日期: 2024-11-18; 网络出版日期: 2025-01-09

国家重点研发计划(编号: 2022YFA1602504)、国家自然科学基金(编号: 12204110, 12374227, U1832201)、上海市重点学科建设项目(编号: B107)和中国科学院战略性先导科技专项(B类) (编号: XDB34020000)资助

摘要 高电荷态离子与中性原子分子碰撞是一个多原子中心的量子态跃迁过程, 具有强库仑场、多通道、高激发态等动力学基本特征. 电荷交换过程研究不仅有助于理解原子尺度强库仑场下量子态的跃迁动力学, 对极端条件下量子散射理论的检验和高温等离子体的诊断与建模同样具有重要意义. 本文围绕高电荷态离子与原子分子电荷交换过程实验和理论研究发展的历史、现状和面临的挑战, 综述了动力学相关的电荷交换总截面的绝对测量、量子态选择截面及伴随X射线发射的谱学研究, 最后以彗星大气X射线起源为例, 讨论了电荷交换在天体环境冷-热流非平衡态等离子体X射线天文观测建模中的重要性.

关键词 高电荷态离子, 电荷交换, 绝对截面, 态选择截面, X射线发射, 天文建模

PACS: 34.70.+e, 34.80.Lx, 33.20.Rm, 95.30.Ky, 95.30.Dr

1 引言

高电荷态原子物理是研究高电荷态离子结构、光谱及其与原子、分子、团簇、材料表面相互作用的学科. 一方面, 高电荷态离子具有极强的电磁场, 其与原子分子碰撞诱发的电子跃迁可以揭示微观极端电磁场中原子结构和多体动力学机理^[1], 包括静态结构相关的组态作用、电子-电子关联效应和量子电动力学效

应(Quantum Electrodynamics, QED), 以及碰撞中通道相互作用、电子-电子及电子-原子核之间的相互作用等^[2,3]. 另一方面, 它为天体与聚变等离子体物理、辐射生物物理、材料及化学等领域提供高精度原子数据和物理支撑^[4-6], 促进对宏观复杂体系的认识和新技术的发展. 同时, 高电荷态原子物理又萌发着新的研究机遇, 例如, 近年来高电荷态离子与激光光谱技术结合, 促进了原子精密光谱测量、基本物理常数检验和超越

引用格式: 魏宝仁, 张瑞田. 高电荷态原子物理: 电荷交换及其在X射线天文建模中的应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 250008
Wei B R, Zhang R T. Highly charged atomic physics: Charge exchange and its application in X-ray astrophysical modeling (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 250008, doi: [10.1360/SSPMA-2024-0469](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0469)

标准模型的新物理的探寻^[7]. 本文主要围绕高电荷态离子与中性原子分子电荷交换过程, 系统介绍电荷交换的研究历史、现状、发展及其在X射线天文领域的重要应用.

在离子与原子分子碰撞中, 电荷交换是离子俘获靶原子或分子体系中一个或多个电子的过程(也叫电子俘获或电荷转移). 早在100年前, 电荷交换就被预言和观测到^[8,9]. 然而, 如何理解这一两原子中心的束缚态跃迁过程困扰着早期原子物理学家. 20世纪20年代, Thomas^[10]提出炮弹首先和靶电子作用使得电子逃离靶核原有的束缚, 然后该电子与靶核作用被炮弹离子俘获, 或者直接与靶中电子作用导致电子被炮弹离子俘获的经典模型. 该预言直到七十多年后才部分被实验证实^[11]. 随着量子力学理论的建立, Openheimer^[12]提出了电荷交换过程的量子力学解释, 即俘获过程是由于电子波函数在两原子中心的重叠导致的. 20世纪40–50年代, 随着核武器相关的裂变反应研究, 如何认识裂变产物中高原子序数的高电荷态离子在媒介中慢化, 使得电荷交换过程成为一个重要的应用研究课题^[13]. 进一步, 如何理解离子与物质作用和传递能量(库仑势能和动能的转化)促进了微观机理的研究. 由此, 基于离子加速器的原子物理实验和理论研究正式拉开序幕.

20世纪80年代以来, 电子回旋共振离子源(Electron Cyclotron Resonance Ion Source, ECRIS)和电子束离子源(Electron Beam Ion Source, EBIS)的问世, 促进了实验室高电荷态原子物理研究的快速发展^[14–16]. 如图1所示, 不同于中低电荷态离子, 高电荷态离子与原子分子电荷交换通道丰富, 还伴随着光谱(X射线)发射. 这一时期, 电荷交换过程的总截面和微分截面在国际上备受关注, 理论方法和实验技术也层出不穷^[17]. 其中最主要的研究动机是通过发展量子散射理论来重现实验测量结果并理解电荷交换微观机理, 最后获得大量可靠的原子数据, 应用到武器物理及聚变物理中, 解决国防相关的重大工程物理难题. 一个典型的例子是Tokamak聚变装置的兴起, 人们认识到聚变等离子体中较重的痕量杂质离子与中性气体作用影响等离子体能量累积, 由此发展了利用电荷交换X射线谱来诊断等离子体状态的方法, 该方法迄今为止依旧是获得等离子体温度和密度信息的可靠手段^[18].

进入20世纪90年代, X射线天文物理在酝酿了30

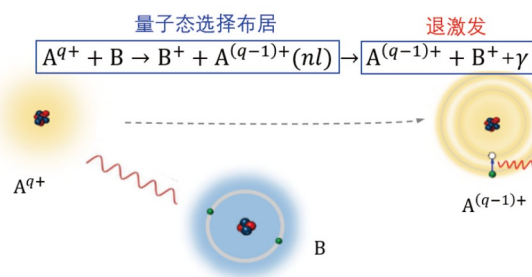


图1 高电荷态离子 A^{q+} 与B原子(分子)发生电荷交换过程示意图, γ 表示退激发射光子

Figure 1 Schematics of charge exchange between highly charged ions A^{q+} with atom/molecule B, and γ represents the following X-ray emission.

年后终于迎来了快速发展时期. 美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的钱德拉望远镜观测到一系列彗星的X射线谱, 为什么彗星会辐射X射线一直困扰着天文界, 因为X射线通常与太阳等高温天体有关, 而彗星则是太阳系中最冷的天体之一. 天体物理学家很快意识到太阳风中高电荷态离子是这类X射线产生的缘由, 即太阳风离子与行星或彗星大气原子分子发生电子俘获过程, 处于激发态的高电荷态离子退激发出X射线^[19]. 进一步研究发现, 太阳风高电荷态离子的电荷交换过程普遍存在, 这类过程导致了火星^[20]、土星^[21]、木星^[22]大气X射线发射及太阳系弥漫X射线的产生^[23]. 至此, 电荷交换过程成为太阳系内X射线研究的焦点.

随着天文观测技术的进一步发展, 高电荷态离子广泛存在于高温天体环境如星风、喷流、超新星遗迹以及系外星系团中已成为既定事实^[24–26]. 这类天体的高温喷流与周围冷的天体或者星际介质发生电荷交换, 进而产生辐射, 是天体非平衡态等离子体X射线和极紫外光谱发射的重要机制之一, 这类X射线是宇宙弥散X射线背景辐射(宇宙X射线背景)的重要组成部分. 如何通过准确建模理解这类宇宙弥散X射线起源成为当今X射线天体物理研究的难题之一. 高电荷态原子物理研究表明, 电荷交换过程总截面以及主量子数 n 和角动量子数 l 的态选择布居截面本质上决定了X射线的谱线能量和强度信息. 因此, 实验室获得“干净”而且可靠的高电荷态离子与原子分子电荷交换总截面、 n 、 l 量子态选择截面及高分辨的X射线谱, 成为天体环境弥散软X射线准确建模的基石^[27].

综上所述, 电荷交换过程是宇宙中普遍存在的原

子过程, 如何准确认识两中心束缚态量子跃迁的基本机理, 进而获得高精度原子数据并应用到天文建模, 认知复杂天体与聚变等离子体是未来研究的重要方向. 本文综合讨论了电荷交换总截面、量子态选择截面、X射线光谱在理论模拟和实验测量上近半个世纪的重要进展, 及其在天文建模中扮演的愈来愈重要的角色. 最后, 结合近期X射线天文观测领域和高电荷态原子物理领域的重要技术进展, 展望了高电荷态原子物理在X射线天体物理研究方面的应用前景.

2 电荷交换过程研究现状

高电荷态离子与原子分子电荷交换是典型的强库仑场中多体相互作用难题, 不论是实验还是理论研究, 目前仍然充满挑战^[28]. 多体问题的根源在于任何一个包含三个或三个以上粒子相互作用的体系, 其运动方程是无法解析求解的. 因此, 理论处理上必须采用各种近似, 例如最常用的微扰理论、玻恩近似等.

时至今日, 虽然量子力学在原子结构计算上已经取得了巨大的成功^[29], 但是对于多个相互作用的粒子随时间演化过程却无法精确描述. 理论学家不得不采用理论近似和数值求解的方法^[30,31]. 目前已发展成熟的理论方法包括: 经典的蒙特卡罗(Classical Trajectory Monte Carlo, CTMC)^[32]模拟、分子过垒(Molecular Over Barrier, MOB)^[33]模型、多通道朗道-齐纳模型(Multi Channel Landau-Zener, MCLZ)^[34]、两中心基组产生方法(Two Center-Basis Generator Method, TC-BGM)^[35]、原子轨道紧耦合方法(Atomic-Orbital Close Coupling, AOCC)^[36]、分子轨道紧耦合方法(Molecular-Orbital Close Coupling, MOCC)^[37]、全量子力学分子轨道耦合方法(Fully Quantum-Mechanical Molecular Orbital Close-Coupling, QMOCC)^[38]、含时密度泛函方法^[39]、渐进紧耦合方法^[30,40]等. Wang等人^[41]理论模拟了0.1–10 MeV/u能区 S^{4+} 离子与He碰撞体系的电荷交换过程, 系统分析了MOCC, AOCC, CDW (Continuum Distorted Wavefunction Approximation), CTMC与MCLZ等模型在计算电子俘获过程中的能量适用范围. 然而, 这些理论方法是否合理还需进一步的实验验证. 下面分别从电子俘获绝对截面、量子态分辨的电子俘获截面及电荷交换X射线重构相关的实验和理论研究展开介绍.

2.1 电子俘获绝对截面

电荷交换截面是反映高电荷态离子与原子分子碰撞过程微观机制和检验理论模型可靠性的关键物理量之一. 1970年, Zwally和Koopman^[42]测量了 C^{4+} 离子与He原子作用过程中单电子俘获绝对截面, 实验发现在400 eV–40 keV能量范围内单电子俘获截面随能量增加而增加. 1976年, 美国橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory)的Crandall等人^[43]进一步研究了20–80 keV能量范围内 C^{4+} 离子与He原子作用中电子俘获过程. 实验发现在低能区双电子俘获截面大于单电子俘获截面, 随着能量增加, 双电子俘获截面逐渐递减, 而单电子俘获截面则逐渐增加, 并很快超越双电子俘获截面.

电子俘获绝对截面测量主要是采用增长率法^[44], 通过测量俘获电子的离子个数 N_{q-j} 与碰撞前总离子个数 N_q 之比与气压关系获得绝对截面, 具体如下式:

$$\sigma_{q,q-j} = \frac{kT N_{q-j}}{PL N_q},$$

其中, k 为玻尔兹曼常数, P , T 和 L 分别为作用区域的气体压强、温度和长度, q 为入射离子的电荷态, j 为俘获的电子个数($j = 1$ 为单电子俘获). 图2为电子俘获绝对截面测量的实验示意图.

1981年, Bliman等人^[45]利用ECR离子源, 测量了 $2q$ – $10q$ keV (q 为离子电荷态)能量范围高电荷态 C^{q+} ($2 \leq q \leq 6$)和 Ar^{q+} ($2 \leq q \leq 12$)离子与氖气作用过程中的单、双电子俘获总截面, 实验误差约为20%. 1982年, Iwai等人^[46]由EBIS引出的多种元素高电荷态离子与He靶相互作用, 采用增长率法测量了1 keV/u以下能量的单电子俘获绝对截面, 发现俘获截面与入射离子能量关系不明显, 其实验误差约为30%. 美国橡树岭国家实验室的Meyer等人^[47]测量了裸核和类氢C, N, O, F和Ne等离子与氢原子及氢分子碰撞中电子俘获绝对截面, 入射离子能量范围为0.18–8.5 keV/u, 实验发现当入射离子能量大于3 keV/u时, 电子俘获截面与入射离子能量无关. 1985年, Rudd等人^[48]系统测量了10–300 keV/u能量范围内 He^{2+} 离子与多种气体作用时电子俘获绝对截面, 不同碰撞体系的实验误差为8%–30%.

由于增长率法测量绝对截面时只关注发生电子俘获的散射离子强度, 没有测量反冲离子, 因此在测量的

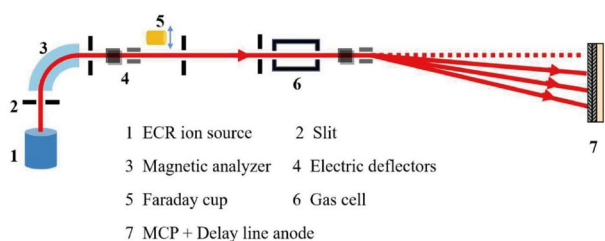


图 2 电子俘获绝对截面测量示意图

Figure 2 Schematic diagram of electron capture absolute cross section measurement.

电子俘获过程中会混有转移电离的贡献. Cocke等人^[49]通过散射离子与反冲离子符合测量技术,可以有效区分电子俘获过程和转移电离过程,以前人的绝对总截面为归一化条件,获得了约百eV能量的 Ar^{q+} ($2 \leq q \leq 8$)离子与惰性气体碰撞中纯单、双电子俘获总截面的同时,还获得了直接电离截面,实验误差为14%.随后, Liljeby等人^[50]采用类似符合测量技术,研究了1.8q keV能量的 Ar^{q+} ($1 \leq q \leq 8$)离子与多个惰性气体靶作用过程中电子俘获总截面和转移电离截面.这一期间高电荷态离子与原子分子作用过程电子俘获绝对截面实验误差普遍偏高,而入射离子能量集中在keV/u范围.

Wu等人^[51]总结了早期(1955–1986年)实验与理论上获得的电子俘获绝对截面数据. Barat和Roncin^[52]对多电子俘获过程研究进行了总结. 1993年, Wu等人^[53]实验研究了0.9–60 keV/u的 Ar^{16+} 离子与He靶作用过程中电子俘获与转移电离截面随入射离子速度的依赖关系. Itoh等人^[54]测量了1q–20q keV能量范围内 C^{q+} ($q = 1-4$)离子与多个分子靶作用中的单、双及三电子俘获截面,发现俘获截面在一定程度上与入射离子速度相关. 随着入射离子能量降低,电子俘获截面与入射离子速度的依赖关系开始变强.

2006年, Kusakabe等人^[55]在0.20–2.70 keV/u能量范围内测量了 He^{2+} 离子与 N_2 , O_2 , CO 和 CO_2 分子单电子俘获和双电子俘获截面,实验误差小于15%,并尝试用紧耦合方法(Close-Coupling Method)对实验结果进行了解释. 同一时间, Figueira da Silva等人^[56]测量了0.0035–2 keV/u的 He^{2+} 离子与 O_2 , H_2 和 D_2 分子单、双电子俘获截面,指出在低能区时双电子俘获截面会大于单电子俘获截面. 相对而言, He^{2+} 离子与原子分子作用过程中电子俘获绝对截面的数据在系统性和实验精度

方面好于其他元素的高电荷态离子数据. 图3展示了 He^{2+} 离子与He靶碰撞过程的单电子俘获绝对截面^[44].

在2000–2018年近20年时间里, 美国加州理工学院喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory)采用多种元素的高电荷态离子与各种原子分子靶相互作用, 对3.5q和7q keV两个能量点的高电荷态离子与原子分子碰撞单、双电子俘获截面进行了测量, 实验精度好于11%^[57–59]. 为了进一步确认电子俘获截面与入射离子速度的依赖关系, 作者课题组开展了5–40 keV/u的 Ne^{8+} 离子与 CH_4 , N_2 , O_2 作用中单、双电子俘获绝对截面测量^[44], 如图4所示, 可以看出电子俘获截面在keV能区对碰撞能量和靶子均有较弱的依赖.

对于keV以下能区, Ishii等人^[60]结合了EBIS引出的高电荷态离子束与气室技术, 测量了1q–1800q eV能区 C^{q+} , N^{q+} 和 O^{q+} ($q = 2-6$)离子与He原子碰撞的电子俘获截面, 发现随入射离子速度降低, 电子俘获截面会快速下降, 入射离子能量在几个eV附近时出现极小值, Ishii等人认为在低能区, 偶极势的吸引和散射离子的瞬时激发对电子俘获截面具有重要影响. 另外, 美国橡树岭国家实验和比利时鲁汶大学均发展了专门针对高电荷态离子与氢原子电荷交换截面测量的共线束装置^[61].

2.2 量子态分辨的电子俘获截面

随着实验技术如能损谱^[62]、光谱^[63]以及冷靶反

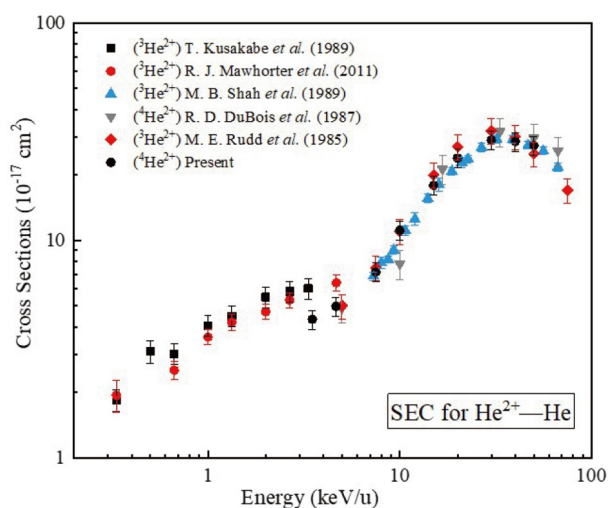
图 3 He^{2+} 离子与He碰撞的单电子俘获绝对截面^[44]

Figure 3 Single electron capture absolute cross sections for He^{2+} ions colliding with He ^[44].

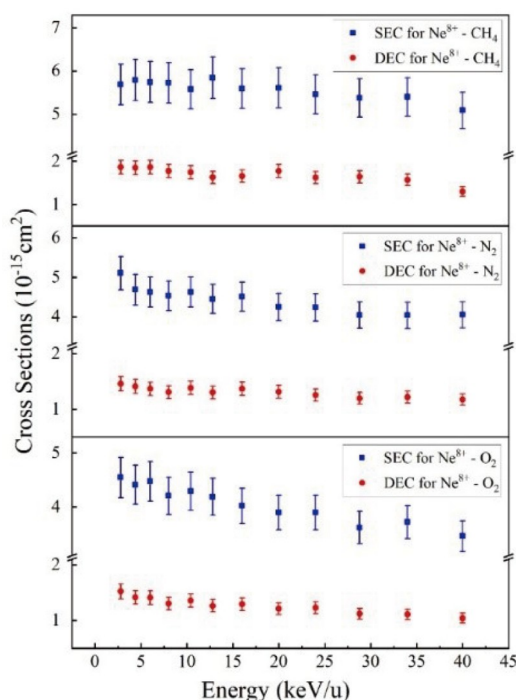


图 4 $^{20}\text{Ne}^{8+}$ 离子与 CH_4 , N_2 , O_2 作用中单(蓝色方块)、双(红色圆形)电子俘获绝对截面^[44]

Figure 4 Absolute SEC (single electron capture) (blue square) and DEC (double electron capture) (red circle) cross sections for $^{20}\text{Ne}^{8+}$ colliding with CH_4 , N_2 , and O_2 [44].

冲离子动量谱(Cold Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy, COLTRIMS)^[64]的出现, 量子态分辨电子俘获截面的实验测量成为可能. 其中能损谱与光谱测量是在电子俘获绝对截面系统中分别加入测量散射离子能量变化的能损谱仪和测量散射离子退激辐射的光谱仪. 散射离子俘获电子所处的电子态不同, 相应的碰撞转移的能量和动量也不同. 1982年, Ohtani等人^[62]采用能损谱仪测量了0.45 keV/u全裸C和O离子与He碰撞的主量子数 n 分辨电子俘获绝对截面, 发现 C^{6+} 离子主要俘获到 $n = 3$ 的态, O^{7+} 离子主要俘获到 $n = 4$ 的态. McLaughlin等人^[65]测量了0.33, 0.67和1.33 keV/u的 C^{4+} 离子与 H_2 和 O_2 分子碰撞电子俘获到3s, 3p和3d态的绝对截面, 并与MCLZ模型进行了对比. 能损谱仪的实验精度有限, 对离子束流的能散要求苛刻.

光谱仪(单色仪)的测量精度高, 光谱仪与绝对截面测量装置结合, 通过测量高电荷态离子俘获电子后激发态退激发射的光谱, 获得散射离子的激发态信息. 测量电子俘获绝对总截面的同时, 通过退激光谱强度

给出俘获到具体量子态的绝对截面. Dijkkamp等人^[63]测量了 C^{6+} , N^{6+} , O^{6+} 和 Ne^{6+} 等离子与He, H_2 和Ar靶作用后量子态分辨的电子俘获绝对截面, 给出了0.5–10 keV/u能量范围内上述高电荷态离子碰撞后主量子数 n 和角动量子数 l 分辨的单电子俘获绝对截面. 该结果成为此后一系列实验与理论研究的基准参考数据. 随后, Suraud等人^[66]测量了0.83–7.5 keV/u能区的 C^{5+} 和 N^{6+} 离子与He和 H_2 靶作用后量子态分辨的电子俘获绝对截面. 2007年, Bodewits和Hoekstra^[67]测量了0.1–7.5 keV/u能量范围的 O^{6+} 离子与水分子 H_2O 相互作用过程中量子态分辨的电子俘获绝对截面. 通过光谱测量获得俘获电子的态信息, 需要考虑散射离子激发态寿命, 另外光谱仪接收立体角小, 分光法测量光谱效率比较低, 且无法获得亚稳态离子的信息.

相比于能损测量和光谱测量方法, 冷靶反冲离子动量谱仪(COLTRIMS)对量子态分辨电子俘获截面测量具有直接、高效、分辨本领高以及适用范围广的独特优势. 这使得COLTRIMS成为研究高电荷态离子与原子分子电荷交换过程量子态分辨电子俘获截面的主要实验设备^[64]. 其工作原理如图5所示, 离子源产生的高电荷态离子束进入碰撞腔室, 与超声气体束垂直碰撞. 通过测量反冲离子的动量, 根据动量和能量守恒关系, 就可以获得电子被俘获到散射离子的激发态信息.

20世纪90年代, 法兰克福大学的Mergel等人^[68]利用COLTRIMS研究了 He^{2+} 离子与He原子作用过程中主量子数 n 分辨的态选择电子俘获截面. 1996年, Cassimi等人^[69]利用COLTRIMS测量了 Ne^{10+} 离子与He碰撞 n 分辨的态选择电子俘获截面. 1998年, Abdallah等人^[70]测量了4–60 keV/u的 Ar^{16+} 离子与He靶作用后量子数分辨的单、双电子俘获相对截面. COLTRIMS符合测量散射离子和反冲离子, 可以有效识别单、双电子俘获过程与转移电离过程. 因此, Abdallah等人^[70]给出了单电子俘获态选择截面与转移电离截面随入射离子能量变化关系, 并与MCLZ模型进行了比较, 理论结果只能与部分实验点符合. Flécharde等人^[71]研究了2.5–7.5 keV/u的 Ne^{10+} 离子与He原子作用中量子态 n , l 分辨的单双电子俘获过程. Hasan等人^[72]测量了2–4.7 keV/u的 N^{7+} 和 O^{7+} 离子与 H_2O , CO_2 和 CO 分子作用过程中量子态分辨的单电子俘获绝对截面, 并与CTMC模型计算结果符合. 如图6所示, 2002年, Fischer等人^[73]研究了9q keV

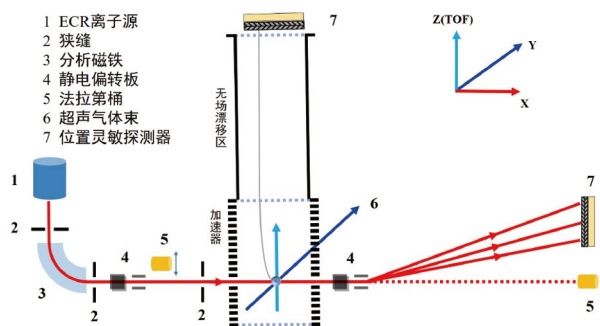
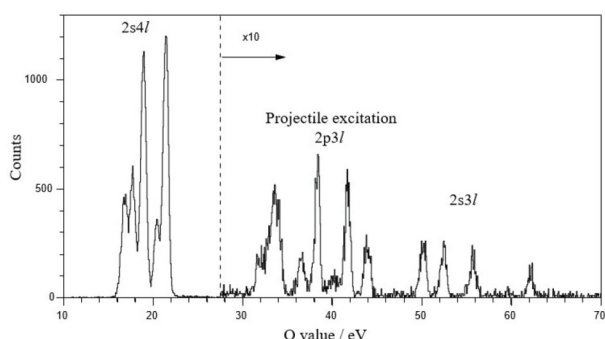


图 5 COLTRIMS示意图

Figure 5 Schematic diagram of the COLTRIMS.

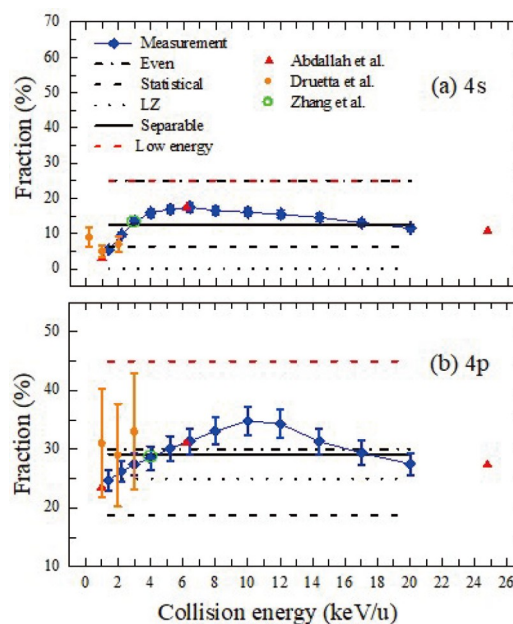
图 6 Ne^{7+} 离子与He碰撞后被俘获的电子所处的各个激发态分布^[73]Figure 6 Excited state distribution following Ne^{7+} single-electron capture with He [73].

的 Ne^{7+} 和 Ne^{8+} 离子与He原子碰撞的电子俘获态选择截面. 他们发现除了He原子靶电子被俘获到炮弹离子激发态外, 还存在散射离子电子被激发的过程. 2024年, 中国科学院近代物理研究所Gao等人^[74]研制了一套纵向高分辨COLTRIMS, 其反冲离子动量分辨达到0.068 a.u., 进一步促进了角动量子态分辨的电荷交换过程研究.

随着COLTRIMS实验结果精度不断提高, 一些早期的理论模型的准确性受到挑战. 近来, Smith等人^[75]指出原子物理早期发展的描述电荷交换过程角动量子态布居的解析模型存在不足. 这些模型由于简洁常常被应用在天文建模中, 结合级联辐射模型来获得电荷交换发射光谱, 进而拟合天文观测结果. 然而, 随着X射线天文领域准确建模对原子数据需求的日益增加, 这些模型的可靠性和适用范围需要实验检验, 并期望在此基础上能发展更便捷、更可靠的模型. 作者课题组利用COLTRIMS系统开展了1–20 keV/u的 Ar^{8+} -He角

动量量子态分辨的电荷交换实验, 在宽能阈检验以上模型的可靠性^[76]. 如图7所示, 研究发现这些理论模型虽然可以高效产生天文建模所需数据, 然而仅仅在个别能量点与实验符合, 绝大多数能量点与实验测量结果存在较大差异. 中国科学院近代物理研究所马新文课题组^[77–81]和作者课题组先后测量了 C^{4+} , Ne^{8+} , Ne^{9+} , Ar^{8+} 和 O^{6+} 等离子与He原子作用过程中量子态分辨的电子俘获截面. Siddiki等人^[82]结合实验与理论, 研究了 Ar^{8+} 离子与 H_2 分子碰撞过程中量子态分辨的电子俘获绝对截面. Zhu等人^[83]最新研究结果显示, 在天文建模中处理角动量和自旋态的电子俘获布居时, 传统上经常使用的自旋统计分布(布居)假定并不具有普遍性.

由于COLTRIMS中靶密度的直接测量存在困难, 且离子与靶的作用区域无法限定, 不能直接获得量子态分辨的绝对态选择截面. 目前的方法是采用COLTRIMS研究量子态分辨的电子俘获相对截面, 归一到相应碰撞体系的电子俘获绝对总截面, 进而获得态选择绝对截面. 为解决量子态分辨电子俘获截面归一问题, 作者课题组在复旦大学150 kV高压平台上建立了

图 7 实验获得角动量子数 l 分辨的电荷交换态选择截面与模型比较^[76]. (a)和(b)分别表示4s, 4p电子俘获布居随碰撞能量的变化Figure 7 Comparison between the measured l -resolved charge exchange cross sections and these calculated with models [76]. (a) and (b) represent 4s and 4p electron capture dependence on the collision energy, respectively.

COLTRIMS和电子俘获绝对总截面测量系统, 兼顾电子俘获总截面和量子态分辨的电子俘获截面测量^[81].

2.3 电荷交换X射线谱重构

通过理论计算的 n, l 分态选择截面来获得X射线谱及谱线强度比是一个常用的方法. 2016年, Leung和Kirchner^[84]基于独立电子模型(Independent Electron Model, IEM), 求解单粒子的含时薛定谔方程, 计算了 C^{6+} 离子与He和 H_2 靶碰撞过程中电子俘获截面, 并给出了俘获后电子所处的激发态以及退激发发射X射线强度随入射离子能量的变化. Mullen等人^[85]采用MCLZ方法计算建立了类氢类氦系列高电荷态离子与H, He的电荷交换截面数据库KRONOS, 可以快速获得电荷交换X射线谱. 然而由于MCLZ方法在计算总截面及态选择截面方面存在较大的误差, 该方法虽然在获得X射线谱方面高效, 但存在较大的不确定性. 随着反冲离子动量谱仪 n, l 量子态分辨电子俘获截面测量精度的提高, 且碰撞过程电荷转移时间尺度远小于X射线辐射时间尺度. 本文提出结合实验测量 n, l 分态选择截面和级联辐射理论来获得X射线发射谱, 进而获得准确谱线强度比的方法^[86].

近年来, 微卡计(用于X射线测量的微量能器)、晶体谱仪等探测器技术的成熟极大地促进了高电荷态原子物理的发展. 以微卡计为例, 其宽谱、高效、高分辨的优势在加速器高电荷态离子碰撞中发挥了重要作用. 图8展示了Seely等人^[87]利用美国橡树岭国家实验室的高电荷态离子平台及微卡计开展的 O^{8+} 离子与Kr原子碰撞过程中电子俘获后退激发射的软X射线谱. 然而, 该测量方法无法量化多电子俘获引起的谱线增强. 因此可以预见, 微卡计、COLTRIMS和绝对截面测量多手段有机结合, 将是未来高电荷态离子与原子分子碰撞绝对X射线发射谱测量的新方案.

3 电子束离子阱和储存环高电荷态离子光谱实验

等离子体环境中的电离平衡主要取决于电子碰撞电离和电子-离子复合过程, 电离截面与复合截面的比值决定了相邻电荷态离子的比例, 电离与复合截面是计算等离子体中电荷态分布的关键数据. 此外, 电子-离子复合过程伴随着电磁辐射, 是天体与实验室等离

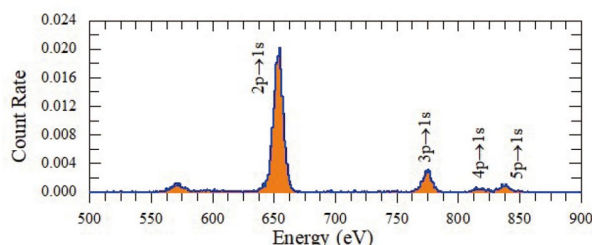


图 8 4.5 keV/u O^{8+} 与Kr电荷交换X射线谱^[87]

Figure 8 X-ray spectrum in 4.5 keV/u O^{8+} charge exchange with Kr^[87].

子体环境中重要的辐射机制. 因此, 电子-离子复合截面是模拟天文观测中辐射光谱的重要输入参数, 高电荷态离子的双电子复合伴线也是等离子体中电子温度、密度等参数无损诊断的重要依据.

EBIS作为离子源, 其成功的应用是作为光源研究高电荷态离子光谱, 即电子束离子阱(Electron Beam Ion Trap, EBIT). 1988年, 美国利弗莫尔国家实验室研制了第一台用于高电荷态离子光谱研究的EBIT^[88], 开启了基于EBIT的高电荷态离子光谱实验研究. 次年, Knapp等人^[89]测量了类氢镍离子(Ni^{26+})的双电子复合过程(Dielectronic Recombination, DR), 获得了DR过程的共振强度以及辐射复合过程(Radiative Recombination, RR)的截面. 此后人们开展了一系列Fe, Ni, Si等元素的高电荷态离子光谱研究工作, 篇幅限制不再展开, 详细内容可以参考文献^[90,91].

随着EBIT和离子加速器技术的日益成熟, 天文相关的高电荷态离子光谱成为近30年来研究的热点. Fe作为宇宙中最常见的重元素之一, 其光谱一直是空间和天文观测的重点, 而其中 Fe^{16+} 离子光谱的谱线强度与理论模拟存在很大差异. 为此, Bernitt等人^[92]和Kühn等人^[93]先后用EBIT与同步辐射和自由电子激光结合, 在实验室中细致研究了 Fe^{16+} 离子的跃迁谱线, 检验了多个理论模型的可靠性. 但对Fe离子的辐射不透明度研究中, 天文观测与理论模拟仍存在巨大差异. 2015年, Li等人^[94]理论上提出通过实验室测量 Fe^{9+} 离子在不同外磁场下谱线发射强度, 间接确定太阳日冕磁场强度的方法. 2022年, 上海EBIT实验室证实 Fe^{9+} 离子在不同外磁场下的磁场诱导跃迁效应, 为诊断日冕和星冕中的磁场提供了一个新的方案^[95]. 在光谱方面, Shah等人^[96]在海德堡EBIT上系统测量了 $Fe^{(18-24)+}$ 离子K壳层的DR谱, Steinbrügge等人^[97]通过

EBIT与同步辐射结合, 测量了 $\text{Fe}^{(20-22)+}$ 离子的吸收谱. 针对太阳观测光谱, Sakaue等人^[98]在东京EBIT上测量了 Fe^{14+} 离子光谱, 对谱线233.9和243.8 Å谱线强度比进行了分析. 此外, EBIT与高精度X射线探测器微卡计结合, Gillaspay等人^[99]测量了 Fe^{16+} 离子的X射线发射谱, Hell等人^[100]测量了Si和S等元素高电荷态离子Kα高精度X射线谱, Shah等人^[101]测量了类He硫离子的K壳层X射线发射截面. 理论方面, Si等人^[102]计算了24–30号元素类硼离子的电子碰撞激发速率系数, Zhang等人^[103]系统计算了S离子的DR过程和电子碰撞激发速率系数. 高电荷态离子光谱实验精度不断提高的同时, 原子结构理论也不断优化, 目前较为完善的理论方法包括多组态Dirac-Hartree-Fock (Multi-Configuration Dirac-Hartree-Fock, MCDHF)方法、相对论多体微扰理论(Relativistic Many-Body Perturbation Theory, RMBPT)以及相对论组态相互作用方法(Relativistic Configuration Interaction, RCI)^[104,105].

利用加速器研究原子分子结构及高电荷态离子光谱的历史更为久远, 早期人们主要通过束箔光谱法研究原子结构^[106]. 近年来, 利用加速器主要研究DR过程和高Z元素的QED效应. 其中DR作为共振过程, 具有更大的截面, 因此也最受关注. 1990年, Kilgus等人^[107]在海德堡储存环(Test Storage Ring)上开展了类氢氧离子的DR实验, 获得了DR过程的共振能量及绝对截面. 1996年, DeWitt等人^[108]在斯德哥尔摩的储存环(CRYRING)上测量了 Ar^{13+} 离子的DR过程共振能量和复合速率系数. 基于加速器的DR过程早期研究可以参考文献^[109,110]. 2009年, Orban等人^[111]测量了 S^{5+} 和 Ar^{7+} 离子的DR过程复合速率系数, 2013年, Mahmood等人^[112]测量了 Ne^{5+} 离子的复合速率系数. 2018年, Huang等人^[113]在兰州重离子储存环(CSR)上测量了 Ar^{13+} 离子的DR复合速率系数以及三电子复合过程的复合速率系数, Zhang等人^[114]对该实验结果进行了理论模拟和分析. Wen等人^[115]在CSR测量了 Ca^{14+} 离子的DR复合速率系数. 2024年, 在完成对兰州重离子储存环电子扫描系统升级后, Shao等人^[116]测量了 Kr^{25+} 离子的DR过程精密谱, 如图9所示, 为今后开展高电荷态离子的双电子复合精密谱学实验提供了基础.

基于储存环离子加速器开展内靶高原子序数的X射线谱学实验是另一个重要领域. Yang等人^[117]研究了单电子非辐射电子俘获至 Xe^{53+} 离子 $2p_{3/2}$ 量子态角动量

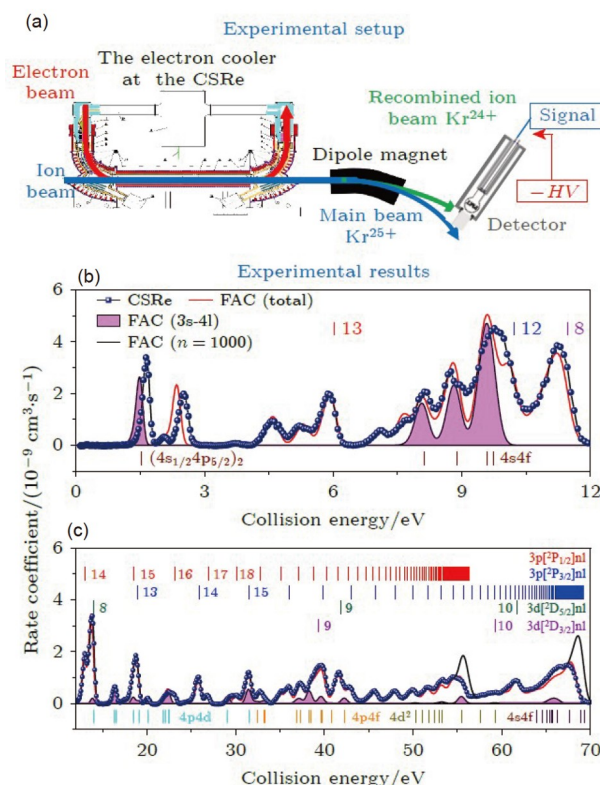


图9 (a) 加速器测量DR过程的实验简图. (b), (c) Kr^{25+} 离子双电子复合速率(蓝色点线)与FAC理论计算(红色实线)结果^[116]

Figure 9 (a) Experimental schematic for measuring the DR process using an accelerator. (b), (c) Experimental dielectronic recombination rate coefficients (blue dotted line) and FAC theoretical (red solid line) of the Kr^{25+} ions ^[116].

空间取向, 以及非辐射电子俘获至 Xe^{53+} 激发态选择分布的相关研究. Loetzsch等人^[118]在德国重离子物理中心储存环开展了类氢U离子与内靶碰撞实验, 获得了类氢U离子 $2p_{3/2} \rightarrow 2s_{1/2}$ 内壳层跃迁, 对量子电动力学理论的精度检验达到了37 ppm.

加速器与EBIT具有很好的互补性. EBIT中通常测量K壳层和L壳层的高电荷态离子X射线谱, 而加速器中通过调节电子束能量可以对离子外壳层的DR过程进行精细扫描. EBIT侧重极低能碰撞, 而加速器内靶实验则使得高电荷态原子物理研究拓展至高能甚至相对论能区.

4 电荷交换在X射线天文中的应用及进展

利用EBIT测量的高电荷态离子光谱, 2003年,

Beiersdorfer等人^[119]成功模拟了彗星C/1999 S4的X射线发射谱,如图10所示.这使得高电荷态C, N, O离子与中性原子的电荷交换过程再次受到重视.然而考虑到EBIT实验中离子能量并非典型的太阳风离子能量,所用气体靶为CO₂也并非彗星中主导的H原子, Otranto等人^[120]采用经典的蒙特卡罗模拟重新拟合了该彗星天文观测的X射线谱,拟合结果与天文观测存在较大差异.直到2023年, Zhang等人^[121]采用高电荷态C, N, O离子与H原子电荷交换总截面实验数据,结合角动量分布模型,很好地重现了该彗星X射线天文观测的结果.

电荷交换X射线谱作为探针也被用来研究太阳系行星和黑洞喷流系统.例如国家天文台Liang等人^[122]采用太阳风高电荷态离子与H, H₂, He, O, CO₂电荷交换的实验和理论截面数据研究了火星外大气圈形貌,重现了太阳风与火星大气作用产生的弓形激波.紫金山天文台Zhang等人^[123]利用电荷交换模型研究了M82黑洞星盘喷流X射线产生机理,发现类氢C, N, O等离子的电荷交换过程起主要作用,并指出电荷交换导致的X射线发射是星爆星系X射线的重要来源.

随着X射线探测器技术微卡计的日趋成熟,世界范围内X射线波段天文观测快速发展.2016年,日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)发射的“瞳(Hitomi)”高精度X射线卫星获得了能量分辨为5 eV的X射线谱,主要来自25和26价Fe离子发射的X射线^[124],如图11所示.2023年9月,日本宇宙航空研究开发机构与NASA合作发射的XRISM高精度X射线卫星已经工作一年多时间,采集了大量高精度X射线谱^[125].其中之前从未观测到的Si, S, Ar, Ca, Fe等元素高电荷态离子X射线光谱清晰可见.天文X射线观测方面的重要进展再次把高电荷态离子与原子分子电荷交换过程研究推至科学研究的前沿.

除了在轨运行的X射线卫星外,诸多的X射线卫星项目在积极预研和发展中,而微卡计X射线探测器成为必备的探测器载荷.例如NASA探空火箭项目、AXIS (Advanced X-ray Imaging Satellite)和LEM (Line Emission Mapper) X射线天文卫星项目均以微卡计为X射线主要探测器.其中探空火箭项目侧重于高分辨测量太阳风诱发的X射线,AXIS和LEM X射线卫星目标是开展高分辨成像和X射线谱测量,研究行星到宇宙生态系统结构形成和生长的物理.针对宇宙弥散X

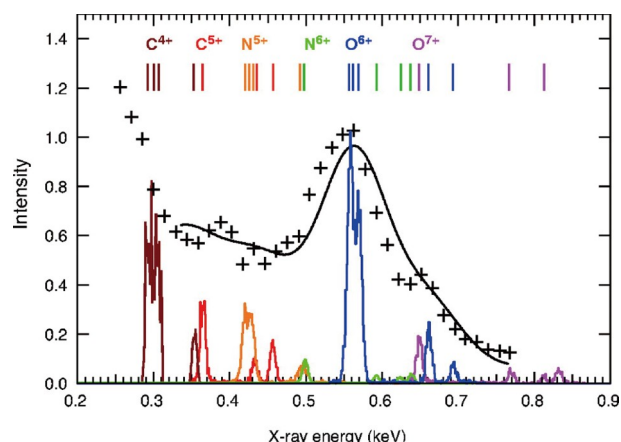


图 10 电荷交换X射线谱. 十字交叉代表太阳风彗星大气电荷交换X射线谱天文观测; 彩色谱线和黑色实线表示EBIT实验室测量结果和拟合^[119]

Figure 10 Charge exchange X ray. Cross indicates the X-ray observation from solar wind charge exchange with cometary; color line and black line indicate simulation with EBIT measured spectra and fitting results^[119].

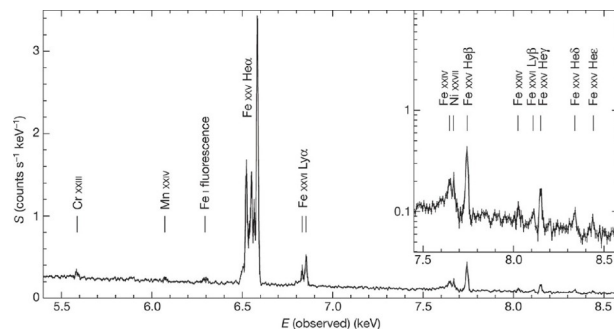


图 11 “瞳”卫星观测的英仙座星团高精度X射线谱^[124]

Figure 11 High-resolution X-ray spectrum of the core of the Perseus cluster obtained by the Hitomi observatory^[124].

射线背景难题, 中欧联合提出的SMILE卫星计划于2025年发射, 主要研究太阳风和地球磁层相互作用诱发的空间天气^[126]. 清华大学Bregman等人^[127]提出围绕“宇宙重子缺失”重大科学问题, 利用微卡计X射线探测器, 发展大视场、高效率、高分辨X射线成像和高分辨X射线观测手段, 探测星际热气体的分布.

理解空间高精度X射线谱需要在实验室获得高精度且系统的原子数据, 包括高电荷态离子光谱(原子态识别)、高电荷态离子与原子分子作用过程中量子态分辨电子俘获截面(谱线强度). 与此同时, 随着核能的发展, 聚变(裂变)等离子体的诊断和模拟研究同样需要大量高精度原子数据. 因此, 可靠的电荷交换实验数据对

于理解天体、聚变(裂变)高温等离子体至关重要。

5 结论和展望

高电荷态离子广泛存在于高温天体环境和聚变、裂变过程中. 以高温天体等离子体环境为例, 当高温喷流、星风、超新星遗迹与冷的星际气体作用时, 其中高电荷态离子与原子分子电荷交换是一个基本的原子物理过程, 该过程为我们理解复杂天体物理现象打开了一个窗口. 随着高分辨X射线天文卫星项目的发展, 高分辨X射线天文观测将揭示更多、更精细的天体等离子现象背后的物理. 而针对天文X射线谱准确建模的关键是可靠的原子物理数据. 本文以高电荷态离子与原子分子电荷交换为例, 详细阐述了电荷交换过程理论和实验研究的进展, 以及近些年在X射线天文建模中的重要应用. 伴随着国内外高分辨X射线天文观测项目的发展, 实验室天体物理也迎来了新的发展机

遇. 例如NASA正在联合利弗莫尔国家实验室等科研机构, 布局一套结合微卡计和COLTRIMS的量子态分辨电子俘获截面测量实验平台. 荷兰空间研究中心联合德国马普核物理所正在开展EBIT与微卡计结合的X射线光谱实验. 国内复旦大学、中国科学院近代物理研究所等单位目前建成了从测量总截面、态选择截面以及高分辨X射线谱, 覆盖离子阱极低能区到相对论能区的全方位高电荷态离子实验设施. 这些实验设施的建立使得我国该领域的研究处于国际领先行列.

未来, 随着德国亥姆霍兹重离子物理研究中心FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research)^[128], 中国科学院近代物理研究所新一代加速器HIAF (High Intensity Accelerator Facility)^[129]和美国密歇根大学新一代加速器FRIB (Facility for Rare Isotope Beams)^[130]大科学装置的相继建成和运行, 新型粒子鉴别、探测及X射线谱学测量技术的更迭发展, 高电荷态原子物理实验及X射线天文建模必将迎来前所未有的新机遇.

参考文献

- 1 Ullrich J, Shevelko V. Many Particle Quantum Dynamics in Atomic and Molecular Fragmentation. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003
- 2 Eichler J, Stöhlker T. Radiative electron capture in relativistic ion-atom collisions and the photoelectric effect in hydrogen-like high-Z systems. *Phys Rep*, 2007, 439: 1–99
- 3 Ma X, Zhang S, Wen W, et al. Atomic structure and collision dynamics with highly charged ions. *Chin Phys B*, 2022, 31: 093401
- 4 Kallman T R, Palmeri P. Atomic data for X-ray astrophysics. *Rev Mod Phys*, 2007, 79: 79–133
- 5 Hill C, Dipti C, Heinola K, et al. Atomic collisional data for neutral beam modeling in fusion plasmas. *Nucl Fusion*, 2023, 63: 125001
- 6 Smirnov Baris M. Reference Data on Atomic Physics and Atomic Processes. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008
- 7 Safronova M S, Budker D, DeMille D, et al. Search for new physics with atoms and molecules. *Rev Mod Phys*, 2018, 90: 025008
- 8 Flamm L, Schumann R. Die geschwindigkeitsabnahme der α -strahlen in materie. *Ann Phys*, 1916, 355: 655–699
- 9 Henderso G H. Changes in the charges of an alpha-particle passing through matter. *Proc Roy Soc A*, 1923, 102: 496–506
- 10 Thomas L H. On the capture of electrons by swiftly moving electrified particles. *Proc Roy Soc A*, 1927, 114: 561–576
- 11 Mergel V, Dörner R, Achler M, et al. Intra-atomic electron-electron scattering in p-He collisions (Thomas process) investigated by cold target recoil ion momentum spectroscopy. *Phys Rev Lett*, 1997, 79: 387–390
- 12 Oppenheimer J R. On the quantum theory of the capture of electrons. *Phys Rev*, 1928, 31: 349–356
- 13 Lassen N O. Total charges of fission fragments as functions of the pressure in the stopping gas. *Mat Fys Medd Dan Vid Selsk*, 1951, 2612: 1–49
- 14 Geller R. ECRIS: The electron cyclotron resonance ion sources. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 1990, 40: 15–44
- 15 Sun L T, Zhao H W, Zhang X Z, et al. The development of all-permanent magnet ECR ion sources at IMP (in Chinese). *Nucl Tech*, 2009, 32: 173 [孙良亭, 赵红卫, 张雪珍, 等. 全永磁ECR离子源研究进展. *核技术*, 2009, 32: 173]
- 16 Schmidt M, Peng H, Zschornack G, et al. A compact electron beam ion source with integrated Wien filter providing mass and charge state separated beams of highly charged ions. *Rev Sci Instrum*, 2009, 80: 063301
- 17 Narumi H, Shimamura I. Atomic Wysics 10. In: Proceedings of the Tenth International Conference on Atomic Physics (ICAP-X). Amsterdam: North-Holland Physics Publishing, 1986
- 18 Isler R C. An overview of charge-exchange spectroscopy as a plasma diagnostic. *Plasma Phys Control Fusion*, 1994, 36: 171–208

- 19 Cravens T E. X-ray emission from comets. *Science*, 2002, 296: 1042–1045
- 20 Gunell H, Holmström M, Kallio E, et al. X rays from solar wind charge exchange at Mars: A comparison of simulations and observations. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: 2004GL020953
- 21 Branduardi-Raymont G, Bhardwaj A, Elsner R F, et al. X-rays from Saturn: A study with XMM-Newton and Chandra over the years 2002–05. *Astron Astrophys*, 2010, 510: A73
- 22 Branduardi-Raymont G, Bhardwaj A, Elsner R F, et al. A study of Jupiter’s aurorae with XMM-Newton. *Astron Astrophys*, 2007, 463: 761
- 23 Snowden S L, Collier M R, Kuntz K D. XMM-Newton observation of solar wind charge exchange emission. *Astrophys J*, 2004, 610: 1182–1190
- 24 Nicastro F, Mathur S, Elvis M. Missing baryons and the warm-hot intergalactic medium. *Science*, 2008, 319: 55–57
- 25 Liu J, Wang Q D, Mao S. Charge-exchange X-ray emission of nearby star-forming galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 420: 3389–3395
- 26 Kuntz K D. Solar wind charge exchange: An astrophysical nuisance. *Astron Astrophys Rev*, 2019, 27: 1
- 27 Gu L, Shah C. Charge exchange in X-ray astrophysics. In: Bambi C, Jiang J, eds. *High-Resolution X-ray Spectroscopy*. Singapore: Springer, 2023
- 28 Rescigno T N, Baertschy M, Isaacs W A, et al. Collisional breakup in a quantum system of three charged particles. *Science*, 1999, 286: 2474–2479
- 29 Belkić D, Mančev I, Hanssen J. Four-body methods for high-energy ion-atom collisions. *Rev Mod Phys*, 2008, 80: 249–314
- 30 Gao J W, Wu Y, Sisourat N, et al. Single- and double-electron transfer in low- and intermediate-energy $C^{4+} + He$ collisions. *Phys Rev A*, 2017, 96: 052703
- 31 Stolterfoht N, DuBois R D, Rivarola R D. *Electron Emission in Heavy Ion-Atom Collisions*. Berlin: Springer, 1997
- 32 Schultz D R, Olson R E. Single-electron-removal processes in collisions of positrons and protons with helium at intermediate velocities. *Phys Rev A*, 1988, 38: 1866–1876
- 33 Niehaus A. A classical model for multiple-electron capture in slow collisions of highly charged ions with atoms. *J Phys B-At Mol Phys*, 1986, 19: 2925–2937
- 34 Lyons D, Cumbee R S, Stancil P C. Charge exchange of highly charged Ne and Mg ions with H and He. *Astrophys J Suppl Ser*, 2017, 232: 27
- 35 Leung A C K, Kirchner T. Two-center basis generator method calculations for Li^{3+} , C^{3+} and O^{3+} ion impact on ground state hydrogen. *Atoms*, 2022, 10: 11
- 36 Fritsch W, Lin C D. Atomic-orbital-expansion studies of electron transfer in bare-nucleus Z ($Z = 2, 4-8$)—Hydrogen-atom collisions. *Phys Rev A*, 1984, 29: 3039–3051
- 37 Kimura M, Lane N F. The low-energy, heavy-particle collisions—A close-coupling treatment. *Adv Atomic Mol Opt Phys*, 1986, 26: 79–160
- 38 Liu L, Liu C H, Wang J G, et al. Cross sections for electron capture in H^+Li ($2p\sigma$, π^+) collisions. *Phys Rev A*, 2011, 84: 032710
- 39 Yu W, Gao C Z, Sato S A, et al. Single and double charge transfer in the $Ne^{2+} + He$ collision within time-dependent density-functional theory. *Phys Rev A*, 2021, 103: 032816
- 40 Gao J W, Wu Y, Wang J G, et al. Double electron capture in $H^+ + H^-$ collisions. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 093402
- 41 Wang J G, Turner A R, Cooper D L, et al. Electron capture in collisions of S^{4+} with helium. *J Phys B-At Mol Opt Phys*, 2002, 35: 3137–3156
- 42 Zwally H J, Koopman D W. Single-electron capture by C^{4+} in helium, neon, and argon below 40 keV. *Phys Rev A*, 1970, 2: 1851–1861
- 43 Crandall D H, Olson R E, Shipsey E J, et al. Single and double charge transfer in C^{4+} -He collisions. *Phys Rev Lett*, 1976, 36: 858–860
- 44 Ma P F, Wang J R, Zhang Z X, et al. Measurements of absolute electron capture cross sections in He^{2+} -He and Ne^{8+} - O_2 , N_2 , CH_4 collisions. *Nucl Sci Tech*, 2023, 34: 156
- 45 Bliman S, Aubert J, Geller R, et al. Electron-capture collisions at keV energies of multiply charged ions of carbon and argon with molecular deuterium. *Phys Rev A*, 1981, 23: 1703–1707
- 46 Iwai T, Kaneko Y, Kimura M, et al. Cross sections for one-electron capture by highly stripped ions of B, C, N, O, F, Ne, and S from He below 1 keV/amu. *Phys Rev A*, 1982, 26: 105–115
- 47 Meyer F W, Howald A M, Havener C C, et al. Low-energy total-electron-capture cross sections for fully stripped and H-like projectiles incident on H and H_2 . *Phys Rev A*, 1985, 32: 3310–3318
- 48 Rudd M E, Goffe T V, Itoh A. Ionization cross sections for 10–300-keV/u and electron-capture cross sections for 5–150-keV/u $^3He^{2+}$ ions in gases. *Phys Rev A*, 1985, 32: 2128–2133
- 49 Cocke C L, DuBois R, Gray T J, et al. Coincidence measurements of electron capture and ionization in low-energy $Ar^{+q} + (He, Ne, Ar, Xe)$

- collisions. *Phys Rev Lett*, 1981, 46: 1671–1674
- 50 Liljeby L, Astner G, Bárány A, et al. Absolute cross sections for multielectron processes in slow $\text{Ar}^{q+} + \text{Ne}$, Ar , Kr collisions. *Phys Scr*, 1986, 33: 310–320
- 51 Wu W K, Huber B A, Wiesemann K. Cross sections for electron capture by neutral and charged particles in collisions with He. *Atomic Data Nucl Data Tables*, 1988, 40: 57–200
- 52 Barat M, Roncin P. Multiple electron capture by highly charged ions at keV energies. *J Phys B-At Mol Opt Phys*, 1992, 25: 2205–2243
- 53 Wu W, Giese J P, Ben-Itzhak I, et al. Velocity dependence of one- and two-electron processes in intermediate-velocity $\text{Ar}^{16+} + \text{He}$ collisions. *Phys Rev A*, 1993, 48: 3617–3625
- 54 Itoh A, Imanishi N, Fukuzawa F, et al. Single-, double- and triple-electron capture cross sections for multicharged slow carbon ions in H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 and CO_2 molecules. *J Phys Soc Jpn*, 1995, 64: 3255–3264
- 55 Kusakabe T, Miyamoto Y, Kimura M, et al. Charge-transfer processes in collisions of He^{2+} ions with H_2 , N_2 , O_2 , CO , and CO_2 molecules below 4 keV/u. *Phys Rev A*, 2006, 73: 022706
- 56 Figueira da Silva S, Winter H, Aumayr F. Single- and double-electron capture cross sections for slow He^{2+} impact on O_2 , H_2 , and D_2 . *Phys Rev A*, 2007, 75: 042706
- 57 Greenwood J B, Williams I D, Smith S J, et al. Measurement of charge exchange and X-ray emission cross sections for solar wind-comet interactions. *Astrophys J*, 2000, 533: L175–L178
- 58 Mawhorter R J, Greenwood J B, Chutjian A, et al. Measurement of absolute charge-exchange cross sections for He^{2+} collisions with He and H_2 . *Phys Rev A*, 2011, 84: 052714
- 59 Moradmand A, El Ghazaly M O A, Mahaptra D P, et al. Measurement of absolute single and double charge exchange cross sections for $\text{Si}^{(7-10)+}$ at 0.88–2.50 keV/u impacting He and H_2 . *Astrophys J Suppl Ser*, 2018, 234: 14
- 60 Ishii K, Itoh A, Okuno K. Electron-capture cross sections of multiply charged slow ions of carbon, nitrogen, and oxygen in He. *Phys Rev A*, 2004, 70: 042716
- 61 Phaneuf R A, Havener C C, Dunn G H, et al. Merged-beams experiments in atomic and molecular physics. *Rep Prog Phys*, 1999, 62: 1143–1180
- 62 Ohtani S, Kaneko Y, Kimura M, et al. Observation of electron capture into selective state by fully stripped ions from He atom. *J Phys B-At Mol Phys*, 1982, 15: L533–L535
- 63 Dijkkamp D, Gordeev Y S, Brazuk A, et al. Selective single-electron capture into (n , l) subshells in slow collisions of C^{6+} , N^{6+} , O^{6+} and Ne^{6+} with He, H_2 and Ar. *J Phys B-At Mol Phys*, 1985, 18: 737–756
- 64 Ullrich J, Moshhammer R, Dorn A, et al. Recoil-ion and electron momentum spectroscopy: Reaction-microscopes. *Rep Prog Phys*, 2003, 66: 1463–1545
- 65 McLaughlin T K, McCullough R W, Gilbody H B. State-selective electron capture by slow C^{4+} ions in collisions with H_2 and O_2 . *J Phys B-At Mol Opt Phys*, 1992, 25: 1257–1264
- 66 Suraud M G, Hoekstra R, Heer F J, et al. State selective electron capture into nl subshells in slow collisions of C^{5+} and N^{6+} with He and H_2 studied by photon emission spectroscopy. *J Phys B-At Mol Opt Phys*, 1991, 24: 2543–2558
- 67 Bodewits D, Hoekstra R. Electron capture in collisions between O^{6+} ions and H_2O molecules. *Phys Rev A*, 2007, 76: 032703
- 68 Mergel V, Dörner R, Ullrich J, et al. State selective scattering angle dependent capture cross sections measured by cold target recoil ion momentum spectroscopy. *Phys Rev Lett*, 1995, 74: 2200–2203
- 69 Cassimi A, Duponchel S, Flechard X, et al. State-selective electron capture in low velocity multiply charged ion, helium collisions. *Phys Rev Lett*, 1996, 76: 3679–3682
- 70 Abdallah M A, Wolff W, Wolf H E, et al. Single and double electron capture from He by Ar^{16+} studied using cold-target recoil-ion momentum spectroscopy. *Phys Rev A*, 1998, 58: 2911–2919
- 71 Fléchard X, Harel C, Jouin H, et al. Single- and double-electron capture in low-energy Ne^{10+} -He collisions. *J Phys B-At Mol Opt Phys*, 2001, 34: 2759–2779
- 72 Hasan A A, Eissa F, Ali R, et al. State-selective charge transfer studies relevant to solar wind-comet interactions. *Astrophys J*, 2001, 560: L201–L205
- 73 Fischer D, Feuerstein B, DuBois R D, et al. State-resolved measurements of single-electron capture in slow Ne^{7+} - and Ne^{8+} -helium collisions. *J Phys B*, 2002, 35: 1369–1377

- 74 Gao Y, Cao T, Lin K Z, et al. A high resolution reaction microscope with universal two-region time-focusing method. *Rev Sci Instrum*, 2024, 95: 043302
- 75 Smith R K, Foster A R, Edgar R J, et al. Resolving the origin of the diffuse soft X-ray background. *Astrophys J*, 2014, 787: 77
- 76 Xia Z H, Ren B, Zhang R T, et al. Measurement of n - and l -resolved state-selective charge exchange in Ar^{8+} collision with He. *Astrophys J*, 2022, 933: 207
- 77 Guo D L, Gao J W, Zhang S F, et al. State-selective single-electron capture in intermediate-energy $\text{C}^{4+} + \text{He}$ collisions. *Phys Rev A*, 2021, 103: 032827
- 78 Xu J W, Xu C X, Zhang R T, et al. Measurement of n -resolved state-selective charge exchange in $\text{Ne}^{(8,9)+}$ collision with He and H_2 . *Astrophys J Suppl Ser*, 2021, 253: 13
- 79 Cao T, Meng T, Gao Y, et al. State-selective charge exchange in 19.5–100 keV amu^{-1} O^{6+} collision with He and H_2 . *Astrophys J Suppl Ser*, 2023, 266: 20
- 80 Zhang R T, Gao J W, Zhang Y W, et al. Strongly perturbed state-selective charge exchange between slow Ar^{8+} and He. *Phys Rev Res*, 2023, 5: 023123
- 81 Meng T, Ma M X, Tu B, et al. Study of single electron capture in $\text{O}^{6+} + \text{He}$ collisions. *New J Phys*, 2023, 25: 093026
- 82 Siddiki M A K A, Zhao G P, Liu L, et al. Highly excited quantum state-selective capture dynamics in slow Ar^{8+} - H_2 collisions. *Phys Rev A*, 2024, 109: 032819
- 83 Zhu X L, Zhang S, Gao Y, et al. Direct evidence of breakdown of spin statistics in ion-atom charge exchange collisions. *Phys Rev Lett*, 2024, 133: 173002
- 84 Leung A C K, Kirchner T. Analysis of X-ray emission spectra in charge-exchange collisions of C^{6+} with He and H_2 . *Phys Rev A*, 2016, 93: 052710
- 85 Mullen P D, Cumbee R S, Lyons D, et al. Charge exchange-induced X-ray emission of Fe XXV and Fe XXVI via a streamlined model. *Astrophys J Suppl Ser*, 2016, 224: 31
- 86 Xu J W, Xu C X, Zhang R T, et al. Experimental measurement of state-selective charge exchange and test of astrophysics soft X-ray emission model (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2021, 70: 080702 [徐佳伟, 许传喜, 张瑞田, 等. 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. *物理学报*, 2021, 70: 080702]
- 87 Seely D G, Andrianarijaona V M, Wulf D, et al. Line ratios for soft-X-ray emission following charge exchange between O^{8+} and Kr. *Phys Rev A*, 2017, 95: 052704
- 88 Levine M A, Marrs R E, Henderson J R, et al. The electron beam ion trap: A new instrument for atomic physics measurements. *Phys Scr*, 1988, T22: 157–163
- 89 Knapp D A, Marrs R E, Levine M A, et al. Dielectronic recombination of heliumlike nickel. *Phys Rev Lett*, 1989, 62: 2104–2107
- 90 Beiersdorfer P. Laboratory X-ray astrophysics. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2003, 41: 343–390
- 91 Wargelin B J, Beiersdorfer P, Brown G V. EBIT charge-exchange measurements and astrophysical applications. *Can J Phys*, 2008, 86: 151–169
- 92 Bernitt S, Brown G V, Rudolph J K, et al. An unexpectedly low oscillator strength as the origin of the Fe XVII emission problem. *Nature*, 2012, 492: 225–228
- 93 Kühn S, Cheung C, Oreshkina N S, et al. New measurement resolves key astrophysical Fe XVII oscillator strength problem. *Phys Rev Lett*, 2022, 129: 245001
- 94 Li W, Grumer J, Yang Y, et al. A novel method to determine magnetic fields in low-density plasma facilitated through accidental degeneracy of quantum states in Fe^{9+} . *Astrophys J*, 2015, 807: 69
- 95 Xu G, Yan C, Lu Q, et al. First laboratory measurement of magnetic-field-induced transition effect in Fe X at different magnetic fields. *Astrophys J*, 2022, 937: 48
- 96 Shah C, Amaro P, Steinbrügge R, et al. Polarization of K-shell dielectronic recombination satellite lines of Fe XIX–XXV and its application for diagnostics of anisotropies of hot plasmas. *Astrophys J Suppl Ser*, 2018, 234: 27
- 97 Steinbrügge R, Kühn S, Nicastro F, et al. X-ray photoabsorption of density-sensitive metastable states in Ne VII, Fe XXII, and Fe XXIII. *Astrophys J*, 2022, 941: 188
- 98 Sakaue H A, Kato D, Yamamoto N, et al. Energy dependence of the line ratio $I(233.9 \text{ \AA})/I(243.8 \text{ \AA})$ in Fe XV observed with an electron beam ion trap. *Astrophys J*, 2023, 943: 14

- 99 Gillaspy J D, Lin T, Tedesco L, et al. Fe XVII X-ray line ratios for accurate astrophysical plasma diagnostics. *Astrophys J*, 2011, 728: 132
- 100 Hell N, Brown G V, Wilms J, et al. Laboratory measurements of the K-shell transition energies in L-shell ions of Si and S. *Astrophys J*, 2016, 830: 26
- 101 Shah C, Hell N, Hubbard A, et al. High-resolution laboratory measurements of K-shell X-ray line polarization and excitation cross sections in helium-like S XV ions. *Astrophys J*, 2021, 914: 34
- 102 Si R, Zhang C Y, Cheng Z Y, et al. Energy levels, transition rates and electron impact excitation rates for the B-like isoelectronic sequence with $Z = 24\text{--}30$. *Astrophys J Suppl Ser*, 2018, 239: 3
- 103 Zhang D H, Wu Z W, Ren C, et al. Calculations of dielectronic recombination and electron-impact excitation rate coefficients of highly charged sulfur ions. *Astrophys J Suppl Ser*, 2020, 247: 22
- 104 Fischer C F, Godefroid M, Brage T, et al. Advanced multiconfiguration methods for complex atoms: I. Energies and wave functions. *J Phys B-At Mol Opt Phys*, 2026, 49: 182004
- 105 Zhang C, Wang K, Si R, et al. Benchmarking calculations of excitation energies and transition properties with spectroscopic accuracy of highly charged ions used for the fusion plasma and astrophysical plasma. *Chin Phys B*, 2023, 32: 113102
- 106 Yang Z H, Du S B, Zeng X T, et al. Sulfur IX to XIII spectral measurements between 170 and 500 Å. *Astron J*, 2009, 137: 4020–4023
- 107 Kilgus G, Berger J, Blatt P, et al. Dielectronic recombination of hydrogenlike oxygen in a heavy-ion storage ring. *Phys Rev Lett*, 1990, 64: 737–740
- 108 DeWitt D R, Schuch R, Gao H, et al. Dielectronic recombination of boronlike argon. *Phys Rev A*, 1996, 53: 2327–2336
- 109 Schuch R, Böhm S. Atomic physics with ions stored in the round. *J Phys-Conf Ser*, 2007, 88: 012002
- 110 Schippers S, Lestinsky M, Muller A, et al. Dielectronic recombination data for astrophysical applications: Plasma rate-coefficients for Fe^{q+} ($q = 7\text{--}10, 13\text{--}22$) and Ne^{25+} ions from storage-ring experiments. *Inter Rev Atomic Mol Phys*, 2010, 1: 109–121
- 111 Orban I, Böhm S, Schuch R. Dielectronic recombination of Na-like S and Na-like Ar in the presence of external fields. *Astrophys J*, 2009, 694: 354–358
- 112 Mahmood S, Orban I, Ali S, et al. Recombination rate coefficients of boron-like Ne. *Astrophys J*, 2013, 771: 78
- 113 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
- 114 Zhang C Y, Wu S J, Wang K, et al. Effect of electron correlation on trielectronic-recombination rate coefficients for Be-like argon. *Phys Rev A*, 2023, 108: 022801
- 115 Wen W Q, Huang Z K, Wang S X, et al. Rate coefficients for dielectronic recombination of carbon-like $^{40}\text{Ca}^{14+}$. *Astrophys J*, 2020, 905: 36
- 116 Shao L, Huang Z K, Wen W Q, et al. Dielectronic recombination experiment of Na-like Kr^{25+} at heavy ion storage ring CSRe (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2024, 73: 123402 [邵林, 黄忠魁, 汶伟强, 等. 重离子储存环CSRe上类钠 Kr^{25+} 离子的双电子复合精密谱学实验研究. 物理学报, 2024, 73: 123402]
- 117 Yang B, Wu Z, Yu D, et al. Nonradiative double-electron capture in fast collisions of bare Xe^{54+} ions with Kr and Xe gaseous targets. *Phys Rev A*, 2024, 110: 022801
- 118 Loetzsch R, Beyer H F, Duval L, et al. Testing quantum electrodynamics in extreme fields using helium-like uranium. *Nature*, 2024, 625: 673–678
- 119 Beiersdorfer P, Boyce K R, Brown G V, et al. Laboratory simulation of charge exchange-produced X-ray emission from comets. *Science*, 2003, 300: 1558–1559
- 120 Otranto S, Olson R E, Beiersdorfer P. X-ray emission cross sections following charge exchange by multiply charged ions of astrophysical interest. *Phys Rev A*, 2006, 73: 022723
- 121 Zhang R T, Liao T, Zhang C J, et al. Charge exchange between highly charged ions and atomic H for modelling comet C/1999 S4 X-ray emission. *Mon Not R Astron Soc*, 2023, 520: 1417–1420
- 122 Liang G Y, Sun T R, Lu H Y, et al. X-ray morphology due to charge-exchange emissions used to study the global structure around Mars. *Astrophys J*, 2023, 943: 85
- 123 Zhang S, Wang Q D, Ji L, et al. Spectral modeling of the charge-exchange X-ray emission from M82. *Astrophys J*, 2014, 794: 61
- 124 Aharonian F, Akamatsu H, Akimoto F, et al. The quiescent intracluster medium in the core of the perseus cluster. *Nature*, 2016, 535: 117–121
- 125 Audard M, Awaki H, Ballhausen R, et al. The XRISM first-light observation: Velocity structure and thermal properties of the supernova remnant

- N 132D. *Publ Astron Soc Jpn*, 2024, 76: 1186–1201
- 126 Sun T R, Connor H, Samsonov A. Preface to the special issue on modeling and data analysis methods for the SMILE mission. *Earth Planet Phys*, 2024, 8: 1–4
- 127 Bregman J, Cen R, Chen Y, et al. Scientific objectives of the hot universe baryon surveyor (HUBS) mission. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2023, 66: 299513
- 128 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
- 129 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 [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]
- 130 Wrede C, Schwengner R, Zuber K. The facility for rare isotope beams. *EPJ Web Conf*, 2015, 93: 07001

Highly charged atomic physics: Charge exchange and its application in X-ray astrophysical modeling

WEI BaoRen^{1*} & ZHANG RuiTian^{2,3*}

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 School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

*Corresponding authors (WEI BaoRen, email: brwei@fudan.edu.cn; ZHANG RuiTian, email: zhangrt@impcas.ac.cn)

The collision of highly charged ions with neutral atoms or molecules is a fundamental process of quantum transition among multi-centers, which is characterized by unique features of a strong Coulomb field condition at the atomic scale, multi-channel involvement, and highly excited state population. Such collision processes are prevalent in various extreme matter environments, such as hot astrophysical plasmas, fusion, and fission processes, and serve as crucial diagnostic tools. Consequently, studying atomic collisions with highly charged ions is vital for testing fundamental collision theories and understanding complex physics in extreme-matter environments. Here, we reviewed theoretical and experimental studies of charge exchange dynamics and high-fidelity data production related to total cross-sections, state-selective cross-sections, and X-ray emission over recent decades. Additionally, we highlight the significance of laboratory studies in modeling cometary X-ray emission in the solar system and diffuse X-ray emission from other astrophysical objects. Finally, we are able to conclude that charge exchange is ubiquitous, and its studies can enhance the understanding of quantum transition dynamics in strong Coulomb fields and astrophysical X-ray modeling.

highly charged ions, charge exchange, absolute cross sections, state-selective cross sections, X-ray emission, astrophysical modeling

PACS: 34.70.+e, 34.80.Lx, 33.20.Rm, 95.30.Ky, 95.30.Dr

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0469](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0469)