

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2017.04.03

基于电子束离子阱的天体 X 射线 和极紫外辐射研究进展

彭吉敏^{1,2}, 仲佳勇¹, 梁贵云², 刘畅¹

(1. 北京师范大学 天文系, 北京 100875; 2. 中国科学院 光学天文重点实验室 国家天文台, 北京 100012)

摘要: 观测光谱是研究天体的基础资料, 对这些光谱的理解主要依靠理论模型。由于各模型依赖于众多的基本原子参数, 且不同的模型对同一特定对象有不同的理解, 所以对这些模型进行实验校准十分重要。电子束离子阱 (electron beam ion trap, 简称 EBIT) 能够产生与天体环境类似的等离子体环境, 因此基于电子束离子阱的实验室光谱测量极大地促进了对天体 X 射线和极紫外辐射的研究。主要对以下内容进行介绍: 卫星观测光谱和理论数值计算的现状及所面临的问题; 基于电子束离子阱的类氦铁 (Fe XVII) 3C/3D 重要诊断谱线比的最新研究进展; 近年来实验室电子束离子阱对 X 射线和极紫外辐射的测量进展。最后, 对现有的实验室光谱研究工作予以简要的展望。

关键词: 电子束离子阱; X 射线; 极紫外辐射; 原子数据; 高分辨率

中图分类号: P141 **文献标识码:** A

1 引 言

了解天体辐射与光谱信息依赖于天体辐射成像和光谱观测, 光谱获得主要基于高分辨率光谱仪观测。要更好地认识天体辐射特性、天体辐射结构等因素, 需构建相应的理论物理模型来重建观测光谱或成像数据。观测光谱与理论光谱比较拟合可获得天体辐射、丰度、结构、加热等信息。长期以来对观测光谱的分析均是基于理论模型计算的合成光谱, 但在这些模型中存在着严重的辐射丢失现象和不严谨的辐射物理机制。近年来, 随着实验室电子束离子阱^[1]的发展, 人们拥有了一个研究天体 X 射线和极紫外辐射情况的新途径, 该途径具有主动、可重复等特点^[2]。电子束离子阱可模拟出各天体等离子体环境, 分析其中的物理过程对解释天体光谱有重要意义。宏观上实验室等离子体与天体等离子体存在诸多不同, 如标度、

收稿日期: 2017-02-22; 修回日期: 2017-07-05

资助项目: 国家自然科学基金 (11522326)

通讯作者: 梁贵云, gyliang@bao.ac.cn

复杂性等, 所以直接通过实验室等离子体推断天体物理等离子体往往存在一些困难, 但是可以通过实验检验理论模型, 从而完善各光谱分析模型。

当前, 极紫外和 X 射线波段的空间观测望远镜主要包括太阳动力学天文台 (SDO)^[3]、钱德拉 X 射线天文台 (CXO)^[4]、XMM-Newton 卫星^[5]、Hinode^[6]、太阳能子午观测站 (SOHO)^[7]、Astrosat^[8]、太阳过渡层成像光谱仪 (IRIS)^[9] 和硬 X 射线调制望远镜^[10] 等。广泛使用的分析观测光谱的原子数据库有 CHIANTI^[11], AtomDB^[12], XSTAR^[13], CLOUDY^[14], PINTofALE^[15] 和 NIST^[16] 等。数值模型依赖于等离子体中的碰撞辐射物理过程和基本原子数据。原子数据的缺陷导致模型计算中存在很多未知辐射源和诸多近似, 所以需要实验室测量来标定谱线^[17]。电子束离子阱独特的特性及产生的等离子体环境和天体等离子体环境高度一致的特点, 使得其成为原子物理研究领域的一个重要的实验研究平台 (或方法), 其中, X 射线和极紫外波段的光谱研究是该实验平台的主要研究方向。随着技术的进步与实验室测量的需要, 理论与实验平台建设方面也在不断更新。目前国内外用于等离子体研究的电子束离子阱装置非常多, 如德国德累斯顿工业大学、美国国家技术标准局、英国牛津大学、美国劳伦斯·利弗莫尔实验室、瑞典斯德哥尔摩大学、中国复旦大学、中国近代物理研究所和中国科学院国家天文台等机构都有该装置。

电子束离子阱物理的发展促进了 X 射线和极紫外波段光谱的研究, 近年来获得了一些新的重大进展, 如: 对 X 射线和极紫外辐射观测光谱的分析和基于原子数据的辐射数值模型的完善、对重要诊断谱线的测量、天体 X 射线和极紫外辐射问题的实验室测量研究。以上几个方面的探讨有助于加深对天体的温度、密度、金属丰度、辐射通量、动力学特征和等离子体环境等信息的系统性和准确性研究。本文将对上述研究方向进行详细介绍。

2 主要内容

2.1 天体中的 X 射线和极紫外辐射观测现状

由于地球大气层对 X 射线的不透明性以及探测设备的限制, X 射线极紫外辐射天文学的发展一度非常缓慢。早期对天体辐射的探测主要是利用探空火箭进行太阳研究。最早始于 1949 年, 美国海军实验室发射 V-2 火箭探测太阳的 X 射线^[18]。Giacconi 等人^[19]于 1962 年首次探测到太阳系外的第一个 X 射线源, 即天蝎 X-1, 打破了人们无法观测到太阳系外 X 射线的认识。随后 ROSAT 卫星探测到超过 200 000 个 X 射线源, 几乎覆盖了所有发射 X 射线的天体^[20]。对极紫外波段的光谱研究比对 X 射线波段的光谱研究更晚^[21]。第一个极紫外巡天是装载在 ROSAT X 射线卫星上的英国极紫外宽视场相机 (WFC), 1990—1991 年间该设备观测到 35 个极紫外源^[22]。至 20 世纪末, 天文学家已能观测到来自所有类型天体的 X 射线辐射。

近年来, 空间技术的进步使得各观测任务获得大量高分辨率的光谱。目前仍在正常工作且比较重要的卫星有 SDO, SOHO, Hinode, IRIS, Astrosat, HXMT, CXO 和 XMM-Newton 卫星, 其中 SDO, SOHO, Hinode 和 IRIS 为太阳 X 射线极紫外辐射观测卫星。SDO 包含

三个重要组成部分: 极紫外变化实验 (EVE), 日震及磁场成像仪 (HMI) 和大气成像组件 (AIA)。开展这些观测的目的是了解太阳本身及其对地球和近地空间的影响, 例如对太阳磁场的产生和结构形成, 以及储存磁能的转换和释放的观测^[23]。其中 HMI 用于观测太阳内部和各磁活动区域的变化特征; EVE 通过测量 30 nm 以下的高分辨率太阳极紫外辐射来研究磁场与极紫外辐射之间的变化关系以及太阳辐射对地球上层大气的影响; AIA 则通过 7 个极紫外通道对太阳光球层、色球层、日冕区和过渡区等进行全盘观测。SOHO 卫星包含 12 个仪器, 主要对太阳各区域的一些基本物理参数进行测量, 如各区域的密度、温度、太阳风成分和整个太阳盘的速度变化等, 其也是主要的实时空间天气预测的数据源。但是, 与 SDO 相比, 其分辨率较低且采集数据的速度较慢。Hinode 包括光学望远镜、极紫外成像谱仪和 X 射线卫星, 主要任务为观测太阳磁场和日冕之间的相互作用, 促进对太阳大气能量产生机制和驱动太阳爆发的机制的理解。极紫外成像谱仪 (EIS) 观测覆盖 17~21.2 nm 和 24.6~29.2 nm 两个极紫外波段, 峰值有效面积分别为 0.23 cm² 和 0.06 cm², 光谱分辨率约为 0.006 5~0.007 5 nm; 光学望远镜的分辨率约为 0.2", 主要对太阳色球层和光球层进行成像; X 射线卫星则对整个太阳进行成像, 分辨率约为 0.1 pixel。IRIS 负载的高帧率紫外成像光谱仪每秒可提供一张角分辨率和光谱分辨率分别为 0.2" 和 0.1 nm 的图像, 其主要任务为诊断色球等日面边缘的物理条件。Astrosat 为低分辨率多波段巡天卫星, 其 X 射线和极紫外观测能段为 0.03~150 keV, 主要用于 X 射线双星、活动星系核等天体辐射和 X 射线源周期性与非周期性变换等观测研究。2017 年发射的 HXMT(即慧眼) 为中国第一颗天文卫星, 其主要任务为对活动星系核、黑洞和中子星等天体的 X 射线和伽马射线辐射进行观测。X 射线波段观测最主要的两个高分辨率光谱卫星为美国的钱德拉 X 射线天文台和欧洲的 XMM-Newton 卫星。地球轨道最高分别可达 140 000 km 和 114 000 km, 而一般卫星轨道均在 500~700 km 之间。钱德拉 X 射线卫星携带着先进的 CCD 成像谱仪 (ACIS)、高分辨率相机 (HRC)、高能量透射光栅谱仪 (HETGS) 和低能量透射光栅谱仪 (LETGS), 其主要任务为 X 射线源巡天。HETGS 测谱范围为 0.4~10 keV, 光谱分辨率 $\lambda/\Delta\lambda$ 为 60~1 000; LETG 的光谱测量范围为 0.09~3 keV, 谱分辨率 $\lambda/\Delta\lambda$ 为 40~2 000; ACIS 观测波段为 0.2~10 keV; HRC 观测波段为 0.1~10 keV。XMM-Newton 卫星可测量 0.5~3.5 nm 的光谱, 光谱分辨率为 0.006 nm, 其主要任务为天体 X 射线辐射探测、天体形成区的详细研究、超质量黑洞环境和神秘暗物质映射的诊断等。基于两者的高分辨率和大的轨道半径, 科学家们获得了大量高质量光谱, 因此可将许多混合谱线分开, 从而为天体环境、元素丰度及天体特性等的诊断提供了重要的观测资料。利用这些观测到的高分辨率光谱可以获得天体的结构信息, 如恒星等离子体的温度分布、磁场结构、电子温度、元素丰度和非麦克斯韦电子速度分布等。

虽然近年来通过观测获得了大量高分辨率光谱, 但是仍然存在着不少问题。对这些高分辨率观测光谱的研究强烈依赖于建立在各种假设之上的理论模型。例如, CHIANTI 模型在分析太阳过渡区、色球层和冕区观测光谱时广泛使用了热电子和平衡条件下的光学薄假设^[24]; AtomDB 模型在分析 Chandra 和 XMM-Newton 卫星观测的 X 射线光谱时也采用了光学薄和热电子假设^[25]。这些模型还强地烈依赖于精确和完整的原子参数, 因此模型数据的升级严重影响着等离子体温度和密度的诊断, 例如, Foster 等人^[26]发现, 当温度为 10⁶ K 时类氦离

子的 G 值改变了 60%，导致其诊断温度改变了 2 倍。对双星系统来说，利用谱线的多普勒位移和展宽信息可以推断冕区结构，但是这种方法受到光谱分辨率的限制。高分辨率光谱仍然提供天体电子密度的诊断，在 X 射线和极紫外辐射波段存在许多对电子密度敏感的谱线。然而利用谱线比进行诊断必须保证不受混合效应的影响，且使用尽可能精确的原子数据。目前，电子束离子阱测量可以解决其中的很多问题。

2.2 X 射线和极紫外辐射数值模型研究现状

观测光谱的分析须采用能正确描述等离子体环境及基本物理过程的光谱分析模型。当前使用较广泛的光谱分析模型有 CHIANTI, AtomDB, XSTAR, CLOUDY 和 PINTofALE 等。CHIANTI 和 AtomDB 模型用于分析太阳、恒星、星系、星系团等类冕等离子体的辐射光谱，其中，天体物理学家建模和分析光谱时广泛使用的分析模型为 CHIANTI 数据库。在 0.1~200 nm 波段，目前 CHIANTI 为最完备、最准确的光谱分析模型，采用该模型，人们成功地重建了这一波段的观测数据^[27]。在此基础上，Landi 等人^[28]对 O, Ca, Fe 和 C 的各离子态进行了建模计算，很大程度上完善了数据库中的精细能级结构。与 CHIANTI 相比，AtomDB 数据库则具有更好的完备性，其分析模型 APEC 被整合为钱德拉 X 射线卫星数据分析工具包 XSPEC 的一部分^[12]。XSTAR 和 CLOUDY 主要用于辐射场主导的光电离等离子体的 X 射线光谱的分析。例如，XSTAR 分析强辐射源激发球状气体层放出光子时所产生的光谱，其原子数据主要来源于经验公式计算。为加快计算速度，XSTAR 提供并行化计算程序^[29]。CLOUDY 模型^[14]用于模拟外部辐射场或其他加热源下等离子体的电离、化学和热平衡状态，同时可提供发射谱和吸收谱，但相比其他模型则要更加复杂。CLOUDY 模型考虑了所有光电离等离子体的微观过程，因此光谱的模拟精度可以达到 1%，但是计算时间也大量增加。PINTofALE 是一个专门进行光谱分析的 IDL 软件包，它采用了 CHIANTI 和 APEC 的数据，主要用于交互式的快速分析和模拟天体观测光谱。数值模型不仅要考虑天体等离子体状态，也需要描述等离子体中决定辐射的基本的微观原子物理过程。只有在原子参数准确的情况下计算模型完美地描述天体的特征，模型计算的光谱才能很好地解释观测结果。其中，数据的准确性和完备性是评判一个模型是否能被广泛应用的两个重要要素。由于原子物理学和计算技术的进步，大量精确的原子数据得到更新并用于天体光谱的分析。例如，采用大规模并行的 R 矩阵^[30]方法对电子碰撞激发数据的计算，极大地改进了天体光谱的认证。

虽然这些光谱模型很好地解释了天体观测光谱，但是也有许多不足之处。首先，CHIANTI 模型仍然不能全面地描述太阳天体观测数据中的所有辐射来源，即有辐射丢失现象，对部分发射线仍然不能给出合理的解释。其次，各模型均只针对某一类特定的天体等离子体环境，并且大多数情况下对实验室测量光谱无法进行有效的分析。对南河三的分析^[31]表明，虽然在不大于 5 nm 波段和不小于 13 nm 波段的理论光谱和观测谱线符合得非常好，但是很大程度上低估了 5~13 nm 波段的光谱观测通量。此外，模型所获得的通量与观测通量相差一个因子，对于波长低于 7 nm 的波段，该因子大约取 1.5；而波长在 7~12.5 nm 的光谱，因子取 5~7 之间的值。引起差异的原因主要来自一些中等质量元素 (Na—Fe) 的 L 壳层发射线的影响。最近的升级极大地改善了这一波段的分析模型，并利用最新的原子数据已经认证了一些元素 (如 Fe, Ar 和 Si) 的高价离子的 L 壳层发射线^[32]。近年来，天文学家在

CHIANTI 模型中强调了这一波段所存在的严重问题^[33]。这些情况说明, 原子数据的完备性和可靠性有待检验, 因此需要通过实验测量对这些数据进行检验。

2.3 Fe XVII 3C/3D 线比的研究进展

Fe XVII 的光谱发射线广泛用于 X 射线等离子体光谱诊断。这不仅是因为其有较强的 X 射线波段辐射, 而且还具有极强的诊断应用价值, 比如对温度的诊断、不透明效应的分析等。在太阳观测中, Fe XVII 离子在很大的温度范围内均大量存在, 并且具有最强的发射线, 因此天文学家利用这些发射线诊断包含 Fe 的天体等离子体。由于光谱的观测和理论之间还存在着许多差异, 所以将 Fe XVII 的发射线用于天文领域还存在着一些问题。例如, Fe XVII 的 3C/3D 线比问题。在很多热天体中观测到 Fe XVII 的 3C ($2p^5 3d(^1P_1) \rightarrow 2p^6(^1S_1)$) 跃迁和 3D ($2p^5 3d(^3D_1) \rightarrow 2p^6(^1S_1)$) 跃迁, 但是其理论计算的强度和观测强度之间存在着很大的差异, 见图 1。

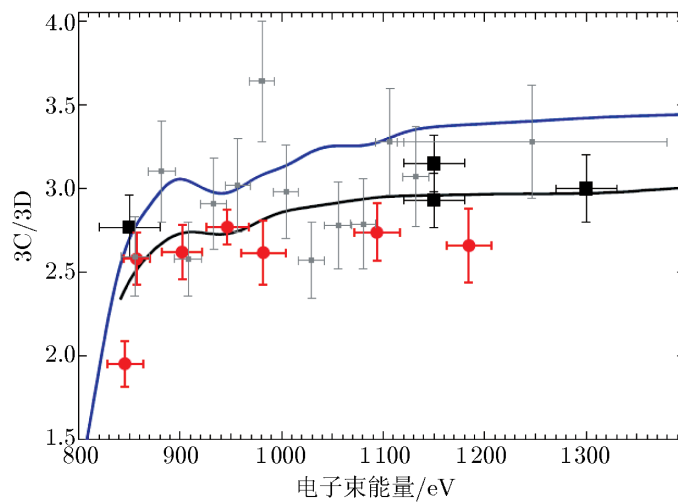


图 1 Fe XVII 的 3C 与 3D 线比^[34]

关于这种偏差的原因引起了持续的争议, 争议的焦点是等离子体环境 (如等离子体对强共振线的散射不透明性), 还是原子物理计算原因引起的差异, 亦或是由不可分辨的 Fe XV 离子的内壳层激发线所引起^[35]。

1975 年, Parkinson^[36]通过火箭弹晶体谱仪对太阳活动区进行观测, 首次观测到 Fe XVII 离子光谱, 由此拉开了对 3C/3D 研究的序幕。Phillips 等人^[37]于 1982 年也对太阳的活动区进行了观测。1994 年, Waljeski 等人^[38]对 Fe XVII 离子各发射线进行了理论计算, 并与观测值比较后发现, 3.8 的 3C/3D 理论计算值与观测值相差很大。他认为 3C 线的共振散射效应很可能是造成如此大差异的原因。1998 年, Brown 等人^[39]通过实验室电子束离子阱高分辨率测量, 发现实验测量结果可以很好地解释观测结果, 因此开始考虑将实验室测量用于解释理论与观测光谱之间无法解释的问题。在这样的背景下, Bhatia 和 Kastner^[40]对理论模型的不透明厚度进行了修正。2001 年, Brown 等人^[41]再次通过实验发现了 Fe XVI 离

子的内部壳层伴线与 3D 线的混合效应, 并提出了横向电场的诊断应用。2002 年 Chen 和 Pradhan^[42] 在综合前面的各因素下, 还考虑了共振效应, 发现理论值与测量值高度相符。但很快, Ness 等人^[43] 通过大样本研究, 否定了共振散射效应。2006 年, Savin 等人^[44] 通过对激发态的强耦合计算诊断出高能级的级联效应。2009 年, Graf 等人^[45] 通过电子束离子阱测量进一步确认了 Fe XVI 离子的内部壳层伴线与 Fe XVI 离子的 3D 线混合效应使其强度增加的结果, 否认了等离子体环境会引起这种差异。2011 年, Gillaspy 等人^[34] 通过分析指出, 在实验室电子束离子阱测量过程中具有能量依赖性。2012 年, Bernitt 等人^[35] 从实验上说明了 3C/3D 问题实质上就是加权振子强度问题。但是 2015 年以来, 欧美学者对这一实验结果提出了进一步的质疑, 并认为自由电子激光是以脉冲的方式来轰击电子束离子阱中约束的离子, 其脉宽约为 200 fs。这个时间尺度与离子的寿命相接近, 也就是说, 离子并没有处于平衡的状态, 需要考虑等离子体的非平衡效应。Loch 等人^[46] 在考虑这些效应后, 采用旧的数据仍然可以重复实验测量的结果; 德国马普所的学者^[47] 提出了另一种可能性, 认为激光场的强度非常大, 以致改变了离子电子结构的描述, 即电子波函数不能用通常的薛定谔或狄拉克方程来描述, 需要引入强场效应, 在其采用的密度矩阵方法考虑强场效应后, 也可以重现实验测量结果。因此, 关于引起这一差异的真正原因仍未查明。

2.4 电子束离子阱原理

电子束离子阱是一个能够产生并约束高电荷态离子的实验装置。该装置主要由电子枪、漂移管、超导线圈 (或永磁铁) 和电子收集器组成, 如图 2 所示。

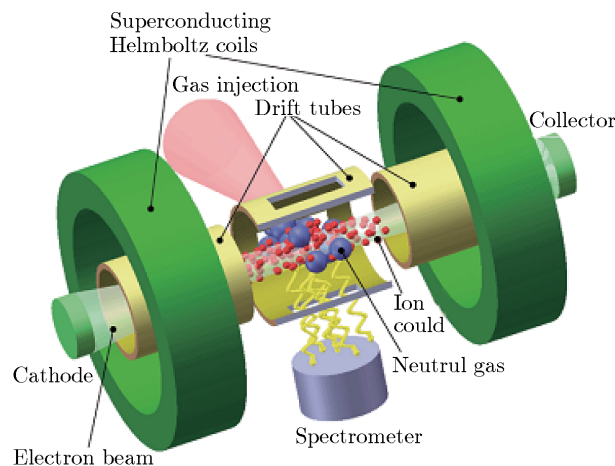


图 2 电子束离子阱组成示意图

在具体的实验过程中, 电子枪发射的电子束经高压加速后进入漂移管, 与注入电子束离子阱的中性气体或低电荷态离子碰撞剥离产生高电荷态离子。超导线圈提供的强磁场压缩电子束, 提高其束流密度, 从而增加碰撞产生高电荷态离子的效率。此外, 压缩的电子束径向形成负的空间电荷势, 约束离子的径向逃逸。当电子束通过大约 2 cm 的阱区后, 电子束直径可被压缩到 60 μm 。在电子束通过的 3 个漂移管上加上适当的电压, 可将离子径向地约束在

阱中。离子的横向约束由电子束的静电吸引和磁场中离子的冻结实现。碰撞后的电子经负高压减速后被收集器收集。其中, 电子束能量可以通过调节漂移管电压来实现, 其能量变化范围在 $50\sim 200\,000\text{ eV}$ 之间。通过改变电子束电流, 可以使电子数密度在 $2\times 10^9\sim 5\times 10^{12}\text{ cm}^{-3}$ 之间, 与天体等离子体密度相当, 如图 3 所示。

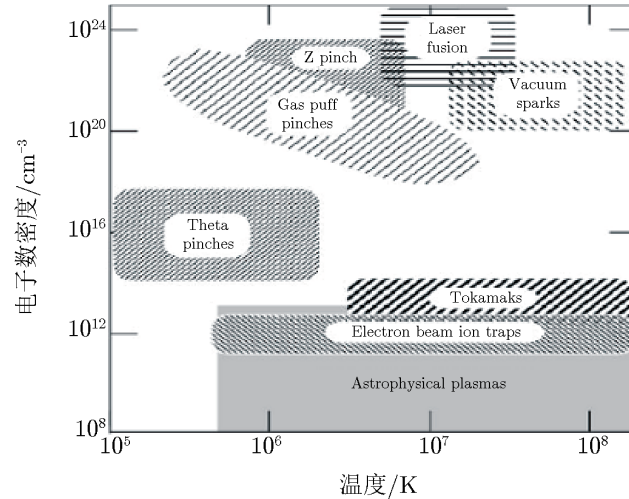


图 3 实验室等离子体环境分布

因此, 电子束离子阱是研究低密度天体等离子体辐射的理想装置。电子束离子阱的另一个特点是可以将注入的低价离子逐渐剥离到高电荷态, 并通过扫描电子束, 可以清楚地将各离子的谱线分开^[48]。电子束离子阱通常被视为光谱源, 通过分析约束在势阱中的高电荷态离子辐射光谱, 可以研究电子与离子碰撞的物理过程、跃迁光子的发射和吸收, 以及离子能级结构方面的信息等。另外, 电子束离子阱还可以作为离子源, 应用于医学等其他领域。

2.5 电子束离子阱光谱测量研究

实验室电子束离子阱的一个重要的研究课题就是光谱学。早在 20 世纪 60 年代, 高电荷态离子已经在原子物理、等离子体物理、加速器物理学等领域十分热门, 因此, 实验室生产高电荷态离子十分必要。在这样的背景下, 前苏联 Dubna 原子核联合研究所成功地建造并运行了第一代电子束离子源设备, 为生产高电荷态离子提供了一条经济的渠道。20 世纪 80 年代末, 美国劳伦斯·利弗莫尔实验室对该装置进行了重新组装, 使其成为世界上第一台用于光谱学研究的电子束离子阱^[49, 50], 为离化、重联、激发截面、禁戒跃迁的鉴定, 相对论量子电动力学对跃迁能量的贡献等广泛的原子物理问题提供了大量数据。另外, 该装置对类氦等离子体的一些物理参数进行了测量, 很大程度上提高了实验室和天体物理等离子体的 X 射线诊断的可靠性, 初步体现出该装置的光谱学研究价值。1999 年, 德国德累斯顿工业大学首次提出室温电子束离子阱研究, 最初设计的德累斯顿电子束离子阱用于提供高电荷态离子 X 射线光谱^[51, 52]。相对于生产出非常高的电荷态离子, 该电子束离子阱更倾向于发展一个能够产生所有稳定元素的高电荷态离子光谱的宽频谱离子源。离子源的设计允许阱内离子产生 X 射线、紫外射线、极紫外射线和可见光光谱辐射, 而且产生的离子可以用于外部离子辐射实

验。该装置目前已用于各个国家的原子物理和光谱学研究机构。中国上海搭建了一台电子束离子阱,其电子束能量可达 130 keV。通过调研发现,该设备的设计指标接近国际上已达到的最好实际指标,上海该方面的专家利用它已做出了很多重要的具有国际影响的成果^[53]。中国科学院国家天文台实验室天体物理组于 2017 年 5 月初也完成了 EBIT-A 设备的搭建和相应的测试工作。作为一个新兴的研究方向,目前已有 4 台该类设备用于研究天体物理问题,包括劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)的 EBIT-I, EBIT-II^[41],德国马普核物理研究所的 FLASH-EBIT 设备^[54]、东京电气通信大学的 CoBIT 设备^[55],以及中国科学院国家天文台的电子束离子阱设备 EBIT-A。

电子束离子阱可用于测量各种元素不同电荷态离子的基本参数,如跃迁速率、碰撞激发和电离截面、双电子复合速率和准麦克斯韦温度下的电离平衡参数等^[56]。同时,电子束离子阱光谱测量有助于完善各光谱模型线表。例如, Brown 等人^[39]在 LLNL 的电子束离子阱上的实验室测量结果表明,早期的光谱模型中有大量的弱线丢失。随之, Brown 等人对一系列不同元素的辐射谱线进行了测量,完善了各模型的线表。例如, Lepson 等人^[57]对 6~14 nm 波段的 Fe VII 和 Fe X 的谱线进行了测量,同时还分别对 2~7.5 nm 短波段的 Ar IX—Ar XVI 和 S VII—S XIV 的谱线进行了测量^[58, 59]。近年来,科学家们也对 19.8~21.8 nm 波段的日冕线进行了电子束离子阱高分辨率测量,即对 C, N, O, F, Ne, S, Ar, Fe 和 Ni 的各种离子的发射线进行高分辨率的实验室测量^[60]。该波段位于以 Fe XV 频谱(21.1 nm)为中心的极紫外波段内,太阳动力学天文台大气成像组早年也观测到该频谱特征。虽然在此区域内的所有强 Fe 线已被人们所熟知,但是仍然有许多 Fe 的弱线尚未得到认证。通过高分辨率实验室测量分离出了 Fe XII, Fe XIII 和 Fe XIV 在 20 nm 和 20.5 nm 处的几条谱线。除了对 X 射线和极紫外波段的研究外,电子束离子阱对光学波段重要的禁戒跃迁也进行了测量。电子束离子阱还可用于研究辐射中的一些物理过程,如电荷交换、级联辐射、辐射复合等。这些潜在的物理过程对谱线的形成有非常重要的影响,例如,级联辐射严重影响着 W XXV 电荷态辐射光谱^[61],见图 4,图 4a)为 W XXV 的碰撞辐射模型计算光谱。但电子束离子阱中所获得的光谱与该模型计算光谱之间存在着很大的差异。Jonaszkas 等人^[62]认为,其中可能存在级联辐射过程。之前的工作已确认级联辐射在 W XIII 离子光谱形成中扮演了非常重要的角色。图 4b)为考虑级联辐射后所得到的光谱,与实验室测量光谱相比,从谱线结构上来说已经非常相似,但是谱线的波长和强度之间仍然存在着小的差异。

电子束离子阱实验室测量为解释天体辐射线特征和辐射缺失提供了新途径。例如,观测发现亮星系团和仙女座星系^[63]中存在着 3.5 keV 的线特征。由于该线特征在之前的所有模型中均未得到认证,因此科学家们认为该线特征为星系暗物质信号。然而, Shah 等人^[64]通过实验室测量发现,该谱线与类氢离子到基态的跃迁谱线符合得非常好。Lepson 等人^[65]对位于 2~7.5 nm 波段的硫的中等电荷态(S V—S XII)离子光谱进行了实验室电子束离子阱测量。他们还通过测量辐射光谱的波长和强度来获得南河三冕区的电子密度,并将测量的基本等离子体环境参数应用于弹性原子码模型,获得混合光谱。混合光谱与钱德拉南河三观测光谱相比较,发现其中的很多谱线未曾得到认证。另外,电子束离子阱测量促进了光谱模型分析天体加热机制。太阳观测表明,阿尔文波对太阳冕区加热做出了巨大的贡献,然而与此相悖的

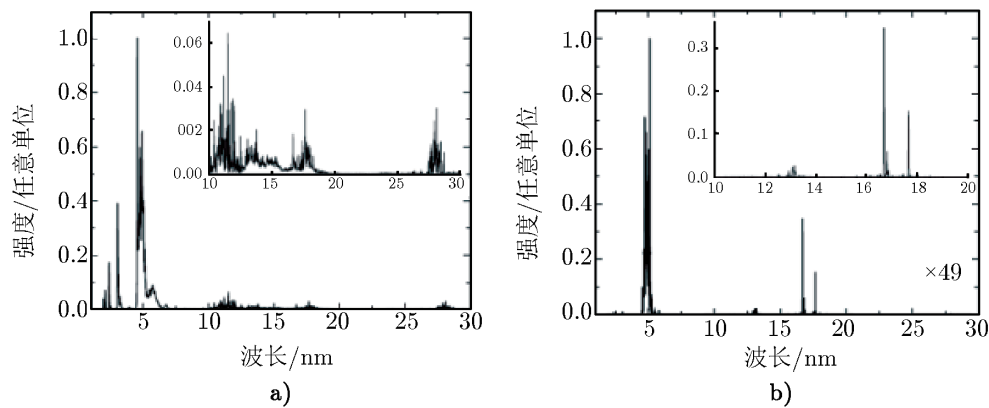


图 4 a) W XXV 的碰撞辐射模拟光谱; b) W XXV 的级联辐射碰撞辐射光谱^[61]

是, 阿尔文波通常消失在极低的冕区高度以下。在这一观测结果的理论研究过程中出现了一些无法解决的问题, 如精确量化波的能量通量和描述导致波阻尼的物理机制。一般来说, 能量通量取决于电子密度, 而电子密度可通过辐射光谱获得。然而光谱密度诊断有很大的不确定性, 因为密度非常敏感地依赖于基本原子参数, 如碰撞激发速率、退激发速率和多原子跃迁速率等。目前这些数据均来源于理论计算, 且没有通过实验测量验证。Savin 等人^[66]通过 LLNL 的电子束离子阱测量, 为光谱密度诊断提供了精确的经验校准, 同时对理论计算也有指导作用。新的结果分析表明, 所观测到的快速消波很可能由能量快速耗散的小尺度等离子体中的驱动流和驱动电流的不均匀性引起, 这种不均匀性也可理解为沿磁场方向的阿尔文速度的梯度变化, 导致波反射和湍流的形成。另外, 穿过磁场的阿尔文波速度梯度可导致混相消散。电子束离子阱测量还可以解释天体中的微观物理过程。太阳系中普遍存在太阳风与彗星、行星大气中的中性气体的电荷交换相互作用, 即电荷交换在任何热等离子体和冷中性气体相互作用环境中都经常发生。然而理论模型的电荷交换光谱不能准确地描述观测现象, 因此需要进一步实验验证。为了改善对观测光谱的理解和电荷交换光谱的模拟, Betancourt 等人^[67]利用电子束离子阱量热仪进行了实验室电荷交换测量。这项工作提供了一个更加全面和准确的电荷交换理论体系。基于已有的电荷交换理论体系, 推测英仙座星系团的星系中央的丝状结构上很可能产生电荷交换辐射。电子束离子阱测量也可通过重现天体观测光谱来获得天体等离子体的基本信息。例如, Beiersdorfer 等人^[68]于 2005 年对彗星 C/1999 T1 的钱德拉 X 射线天文台观测 X 射线光谱进行了实验室模拟。除了对 C, N 和 O 的高电荷态的 K 壳层 X 射线辐射进行测量外, 同时也对 Ne VIII 的光谱进行了测量。对比发现, 测量光谱与观测光谱高度一致。另外还发现 Ne 的辐射线是该彗星的 X 射线辐射中非常重要的一部分, 这一结果在之前的彗星光谱拟合中并没有引起天文学家的注意。从模拟中推断的离子组成成分与直接测量的太阳风离子成分吻合得非常好。

3 总结与展望

本文介绍了电子束离子阱的 X 射线和极紫外辐射的研究进展。首先,从当代先进观测设备和理论模型的角度总结了近年来 X 射线和极紫外辐射的研究现状以及存在的问题,并引出实验室光谱研究;其次,对 Fe XVII 的 3C/3D 线比问题的研究证明了电子束离子阱对解决重要天体光谱问题起到的重要作用;最后,通过介绍实验设备的工作原理,展示了实验室光谱研究的优势,并详细地介绍了电子束离子阱 X 射线和极紫外辐射研究的进展。

虽然电子束离子阱测量已经解决了很多天体 X 射线和极紫外辐射问题,但是实验设备和技术的限制导致光谱研究仍然受不完整和不准确的原子数据的影响,这严重限制了光谱的应用与分析。所以在接下来的实验室光谱研究中应不断解决这些技术问题,并用实验测量来不断完善各理论模型,最终精确地解释所有天体特征。此外,观测方面也应该提供更高分辨率的光谱,以认证更多的混合谱线和现在无法识别的弱的谱线,达到观测、理论计算和实验室测量之间互相支撑、互相检验、互相促进的效果。当前实验室光谱测量的谱仪分辨率仍然较低,这严重制约了实验室中利用光谱进行等离子体特征参数的诊断。虽然电子束离子阱能够将来自不同离化度的离子光谱线分离出来,并较好地避免不同离化度离子光谱线的混合,但是对一些电势非常接近的离子,还不能达到预期的效果。因此,发展更高分辨率的谱仪也是今后光谱测量中一项非常重要的工作。此外,电子束离子阱天体光谱研究的原理是在实验室中创造可与天体环境相比拟的等离子体环境并对其各参数进行测量,但是真正的天体环境与实验室环境有一定的差别,如实验室等离子体环境是小尺度等离子体,而天体等离子体是大尺度等离子体;实验室等离子体成分为单一元素的等离子体,而天体等离子体是多种元素的等离子体等。因此这也是未来实验室天体物理对接宇宙天体物理过程中必须解决的问题。

参考文献:

- [1] Brown G V, Boyce R, et al. Laboratory Astrophysics at the LLNL Electron Beam Ion Trap EBIT-I and EBIT-II. America: NASA, 2002: 38
- [2] 张杰, 赵刚. 物理, 2000, 29(7): 393
- [3] Drobnes E, Pesnell W D. Bulletin of the American Astronomical Society, 2007, 39: 893
- [4] Rajiva S. Bull Astr Soc India, 1999, 27: 231
- [5] Brinkman A C, Reflection Grating Spectrometer Team. Bulletin of the American Astronomical Society, 2000, 32: 1198
- [6] Deluca E E, US-Japan X-Ray Telescope Team. Bulletin of the American Astronomical Society, 2007, 39: 171
- [7] Domingo V, Fleck B, Poland A I. Solar Physics, 1995, 162: 1
- [8] Singh K P, Tandon S N, Agrawal P C, et al. SPIE, 2014, 9144: 15
- [9] Dmitriyev P B, Kudryavtsev V P, Matveev G A, et al. Geomagnetism and Aeronomy, 2009, 49: 1080
- [10] Wu Y P, Ren D H, You Z. AdSpR, 2004, 34: 2667
- [11] Del Zanna G, Mason H E. ASP Conference Proceedings, 2002, 277: 333
- [12] Smith R, Brickhouse N S. Bulletin of the American Astronomical Society, 2008, 40: 186
- [13] Bautista M A, Kallman T R. ApJ, 2001, 134:139
- [14] Ferland G J, Korista K T, Verner D A, et al. PASP, 1998, 110: 761
- [15] Kashyap V, Drake J J. B Astron Soc India, 2000, 28:475

- [16] Martin W C, Wiese W L. NIST Atomic Spectra Database. America: CfA, 1998: 182
- [17] Beiersdorfer P, Lepson J K, Desai P, et al. APJS, 2014, 210: 16
- [18] Friedman H, Lichtman S W, Byram E T. PhysRev, 1951, 83(5): 1025
- [19] Giacconi R, Gursky H, Rossi B B, et al. PhRvL, 1962, 9(11): 439
- [20] Voges W, Aschenbach B, Brauning T, et al. A&A, 1999, 349(2): 389
- [21] Bowyer S, Drake J J, Vennes S. ARA&A, 2000, 38: 231
- [22] Pounds K A, Abbey A F, Barstow M A, et al. MNRAS, 1991, 253: 364
- [23] Lundstedt H H, Persson T. AGUFMSH, 2010, 23: 1824
- [24] Dere K P, Landi E, Mason H E, et al. A&AS, 1997, 125: 149
- [25] Dudk J, Del Zanna G, Mason H E, et al. A&A, 2014, 570: A142
- [26] Foster A R, Ji L, Smith R K, et al. ApJ, 2012, 756: 128
- [27] Landi E. A&A, 2007, 476: 675
- [28] Landi E, Young P R, Dere K P, et al. ApJ, 2013, 763: 88
- [29] Noble M S, Ji L, Young A, et al. ASPCS, 2009, 411: 301
- [30] Tashiro M, Morokuma K, Tennyson J. PhRvA, 2006, 74: 2706
- [31] Testa P, Drake J J, Landi E. ApJ, 2012, 745(2): 111
- [32] Liang G Y, Zhao G. MNRAS, 2010, 405(3): 1987
- [33] Liang G Y, Zhao G. MNRAS, 2008, 384(2): 489
- [34] Gillaspay J D, Lin T, Tedesco L, et al. ApJ, 2011, 728: 12
- [35] Bernitt S, Brown G V, Rudolph J K, et al. NATURE, 2012, 492: 225
- [36] Parkinson J H. IAUS, 1975, 68: 45
- [37] Phillips K J H, Fawcett B C, Kent B J, et al. ApJ, 1982, 256: 774
- [38] Waljeski K, Moses D, Dere K P, et al. ApJ, 1994, 429: 909
- [39] Brown G V, Beiersdorfer P, Liedahl D A, et al. ApJ, 1998, 502: 1015
- [40] Bhatia A K, Kastner S O. ApJ, 1999, 516: 482
- [41] Brown G V, Beiersdorfer P, Chen H, et al. ApJL, 2001, 557: L75
- [42] Chen G X, Pradhan A K. PhRvL, 2002, 89: 3202
- [43] Ness J U, Schnitt J H M M, Audard M, et al. A&A, 2003, 407: 347
- [44] Savin D W, Gwinner G, Grieser M, et al. ApJ, 2006, 642: 1275
- [45] Graf A, Beiersdorfer P, Brown G V, et al. ApJ, 2009, 695:818
- [46] Loch S D, Ballance C P, Li Y, et al. ApJL, 2015, 801: 5
- [47] Oreshkina N S, Cavaletto S M, Keitel C H, et al. PhRvL, 2014, 113: 14
- [48] Liang G Y, Baumann T M, Lopez-Urrutia J R C, et al. ApJ, 2009, 696: 2275
- [49] Marrs R E, Levine M A, Knapp D A, et al. PhReL, 1988, 60: 1715
- [50] Beiersdorfer P, Cauble R, Chantrenne S, et al. X-ray Spectroscopy with EBIT. Germany: ARI, 1993: 59B
- [51] Zschornack G, Kreller M, Ovsyannikov V P, et al. RSci, 2008, 79(2): 5
- [52] Levine M A, Marrs R E, Henderson J R, et al. PhSc, 1988, 22: 157
- [53] Xiao J, Fei Z, Yang Y, et al. PhSc, 2011, 144: 3
- [54] Crespo Lopez-Urrutia J R, Bapat B, Draganic I, et al. Hyperfine Interactions, 2003, 146: 109
- [55] Nakamura N, Kikuchi H, Sakaue H A, et al. Rev Sci Instrum, 2008, 79: 063104
- [56] Fournier K B, Foord M E, Wilson B G, et al. AIPC, 2000, 547: 203
- [57] Lepson J K, Beiersdorfer P, Brown G V, et al. ApJ, 2002, 578: 648
- [58] Lepson J K, Beiersdorfer P, Behar E, et al. ApJ, 2003, 590: 604
- [59] Lepson J K, Beiersdorfer P, Behar E, et al. ApJ, 2005, 625: 1045
- [60] Peter B, Elmar T, Jaan K L, et al. ApJ, 2014, 788: 25
- [61] Jonauskas V, Putterich T, Kucas S, et al. JQSRT, 2015, 160: 22
- [62] Jonauskas V, Masys S, Kyniene A, et al. JQSRT, 2013, 127: 64
- [63] Gu L, Kaastra J, Raassen A J J, et al. A&A, 2015, 584: L11
- [64] Shah C, Dobrodey S, Bernitt S, et al. ApJ, 2016, 833: 52

- [65] Lepson J, Obst M, Beiersdorfer P. New Identifications of Sulfur in the Chandra Spectrum of Procyon. America: APS, 2010: D2001
- [66] Savin D W, Arthanayaka T, Beiersdorfer P, et al. Understanding Solar Coronal Heating through Atomic and Plasma Physics Experiments. America: AAS, 2017:230
- [67] Betancourt M G, Beiersdorfer P, Brown G, et al. Charge Exchange from the Laboratory to Galaxy Clusters. America: AAS, 2016: 15
- [68] Beiersdorfer P, Boyce K R, Brown G V, et al. Laboratory Simulation of the X-Ray Emission from Comet C/1999 TI(McNaught-Hartley). America: AGU, 2005: P42A04

Progress in the Field of Research in Region of X-ray and EUV on Electron Beam Ion Trap

PENG Ji-min^{1,2}, ZHONG Jia-yong¹, LIANG Gui-yun², LIU Chang¹

(1. Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Science, Beijing 100012, China)

Abstract: Observed spectrum is the basic data for celestial research. In recent years, with the enhancement of space, equipment, imaging technologies and simulation techniques, spectrometers with larger effective area have provided abundant X-ray and extreme ultra-violet spectra with high resolution. These spectral data which will post deep insights on different objects, such as plasma heating, accretion of compact objects, energy storage and release, emission structure, feedback of supernova, as well as kinetics and dynamics in X-ray/EUV emitters, are mainly dissected by theoretical calculations. However, the models depend on many elementary atomic parameters and there are different understanding for the same object between different models, it is necessary to calibrate these models by laboratory measurement. The electron beam ion trap which is an inexpensive compact device is an ideal facility for spectroscopic benchmark due to its overlapping electron density and temperature with astrophysical plasma in stellar corona, supernova remnants and so on. Therefore, the spectral measurement based on the electron beam ion trap greatly promotes the study of X-ray and extreme ultraviolet radiation. This article will focus on the following: current situation of spectra of satellite observations and theoretical calculation and the problems; the latest research progress of the important diagnostic line ratio(Fe XVII's 3C/3D) based on EBIT; recent advances in laboratory measurement of X-rays and extreme ultraviolet radiation based on electron beam ion trap. Finally, a brief prospect for the laboratory spectroscopy research will be given.

Key words: EBIT; X-ray; EUV; atomic data; high-resolution