

与天体物理相关的光电离等离子体的实验室研究^{*}

杨培强 王菲鹿 赵刚[†]

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘要 光电离等离子体在天体物理环境中普遍存在,并且由于与黑洞等致密天体紧密关联而具有重要的研究意义.近年来,随着大功率强激光及 Z 箍缩技术的发展,在实验室中实现了天体环境中的光电离等离子体和光电离过程的模拟.这为验证光电离理论模型的可靠性和准确性,以及认识天体物理环境中的光电离过程及其物理环境的诊断提供了重要的新手段.文章介绍了与天体物理相关的光电离等离子体的实验室研究进展.

关键词 天体物理,等离子体,综述,光电离

Laboratory studies of photoionized plasma related to astrophysics

YANG Pei-Qiang WANG Fei-Lu ZHAO Gang[†]

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract Photoionized plasma is universal in astronomy and has great importance on account of its close relation to compact astrophysical objects such as black holes. Recently, with the development of high energy density lasers and Z-pinch facilities, it has become possible to simulate astronomical photoionized plasma in the laboratory. These experiments help us to benchmark and modify the photoionization models, and to understand the photoionization processes to diagnose related astronomical plasma environments.

Keywords astrophysics, plasmas, review, photoionization

1 引言

新一代 X 射线天文望远镜卫星(如 Chandra 和 XMM-Newton)的成功发射,获得了大量来自不同天体环境的高分辨率 X 射线光谱^[1-3].通过对高分辨率光谱的分析研究,人们对各类天体的性质和结构有了全新的认识.其中对致密天体的研究引起了天文学家们的广泛兴趣^[4],例如黑洞、中子星、白矮星.该类天体吸积周围的物质,释放引力能,发出硬 X 射线辐射,将附近的物质光离化^[5],产生了低温低密高离化态的光电离等离子体(见图 1).获取和分析来自致密天体周围光离化等离子体的谱线和等离子体环境,对理解致密天体及其吸积盘的物理性质和理论模型的发展具有重要的意义.

长期以来,由于受到地面实验室条件的限制,天体物理学家对致密天体的研究,只能依靠分析来自遥远天体的光谱和测光数据,这在很大程度上限制了研究的深度.近年来,随着高功率强激光和 Z 箍缩技术的发展,在地面实验室中产生具有天体物理意义的光电离等离子体已经成为现实^[6-10].这为天体物理学的研究提供了新的研究途径,是一个飞跃性的进步.

本文将在第二部分介绍具有天体物理意义的光电离实验;第三部分介绍目前常用的光电离等离子体理论模型;最后介绍与天体物理相关的光电离等

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10821061,10876040)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2007CB815103)资助项目

2010-04-23 收到

[†] 通讯联系人, Email: gzhao@bao.ac.cn

离子体的实验室研究的现状,并展望这个研究方向的前景.

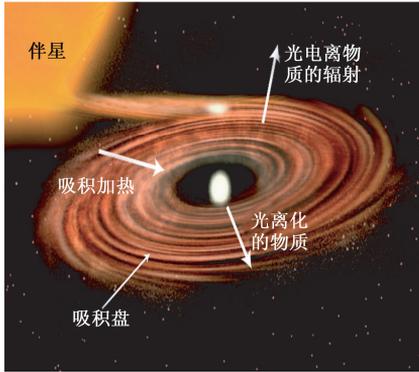


图1 双星系统及其吸积盘等结构的示意图^[5]

2 与天体物理相关的光电离实验研究

2.1 电离参数

等离子体状态取决于辐射过程(包括光吸收与受激发射,光电离,辐射复合等)和碰撞过程(包括碰撞激发与退激发,碰撞电离与三体复合,自电离与双电子复合等)的共同作用和相互平衡.为了分辨是辐射过程还是碰撞过程占主导,Tarter于1969年首次提出了电离参数 ξ (单位: $\text{erg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)的概念^[11]:
 $\xi = L/n_e r^2$, L 为辐射源的光度(单位: $\text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$), n_e 为等离子体的电子密度(单位: cm^{-3}), r 为等离子体到辐射源中心的距离(单位: cm).一般认为,满足 $\xi \geq 10^2$ 时,辐射过程占主导地位^[12,13].

天体等离子体中 ξ 为 $10-10^4$,这里的下限10是由现有的空间望远镜的分辨本领推出的,而实际中可能存在着电离参数更低的天体光电离等离子体.于是Remington提出了一个无量纲的参数: $\xi\varphi/C$ ^[14], φ 为光电离截面(单位: $\text{cm}^2 \cdot \text{erg}^{-1}$), C 为碰撞电离的速率系数(单位: $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).以硅等离子体的实验为例^[9],将硅光离化到 Si^{+11} 时,电子温度约为30eV.在现有的实验条件下,可估算 $C < 10^{-10} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $\varphi \sim 10^{-8} \text{cm}^2 \cdot \text{erg}^{-1}$.当 $\xi > 0.1$ 时,满足 $\xi\varphi/C > 10^2$,即满足光电离过程占主导的条件.可见,无量纲参数的引入,放宽了对 ξ 的要求,即有更多的天体物理环境中的光电离过程和现象有可能在实验室中进行模拟.

2.2 铁元素的光电离实验

Foord等人在Sandia国家实验室利用Z箍缩装置进行了光电离铁等离子体的实验研究^[6,7],并在实验室中首次获得与天体物理相关的光电离等离

子体.Z箍缩装置作为辐射源的工作原理是:将直径 $11.5\mu\text{m}$ 的钨丝绕成直径为2cm、长度为1cm的线圈,当线圈通入脉宽为100ns、强度高达20MA的电脉冲时,在电磁感应力的作用下,线圈迅速向中心坍塌并以辐射的形式释放能量,产生了半高全宽为8ns、功率为120TW、辐射温度约为165eV的类黑体辐射,样品在此辐射场作用下被离化.实验样品为Fe和NaF按1.35:1比例制成的薄膜,样品两面均覆盖有500—750Å的莱克桑(Lexsan,化学组成为 $\text{C}_{16}\text{H}_{14}\text{O}_3$).样品放置在距离线圈中心1.5—1.6cm的位置(见图2).

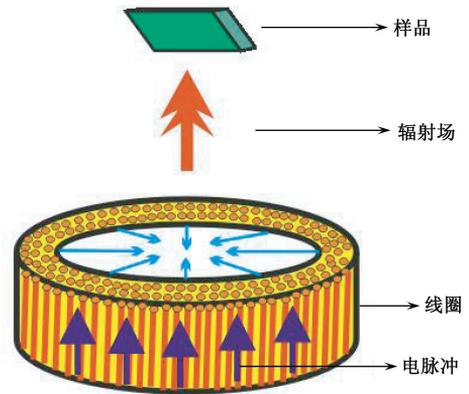


图2 Z箍缩装置上的光电离实验布局的示意图

在这个实验当中,电离参数最高达到了 $25 \text{erg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$.实验的观测波段为 $8.5-12 \text{Å}$,在此波段观测到了Fe的L壳层的吸收线,以及Na和F的K壳层的吸收线,并由此得到了光离化等离子体的离子数布局.这些实验值与光电离等离子体模型GALAXY,NIMP等相对比,结果较为吻合^[7].

2.3 氮元素的光电离实验

王菲鹿等人在日本大阪大学Gekko-XII激光器上进行了氮元素的光电离实验^[8].这个实验首次采用了气体作为样品靶,这样可以有效地降低等离子体密度,从而提高光电离参数.实验采用了“狗骨头”腔靶的设计(见图3).腔靶是圆柱形对称结构,中部圆柱形空腔部分的直径为 $800\mu\text{m}$,高度为 $1020\mu\text{m}$,上下两端激光入射口的直径为 $520\mu\text{m}$,整个腔靶的高度为 $2564\mu\text{m}$.为了产生高质量的类黑体谱,腔靶材料选用了原子序数较大的金.氮气样品被 $1\mu\text{m}$ 厚的聚酰亚胺(polyimide)薄膜密封在腔靶的中部.强度为250J/束、波长为 $0.53\mu\text{m}$ 、半高全宽为0.5ns的6束激光分别从上下两端打入腔靶(上下各3束).在腔靶的中部产生辐射温度约为80eV的类黑体辐射,用以光离化氮气样品.

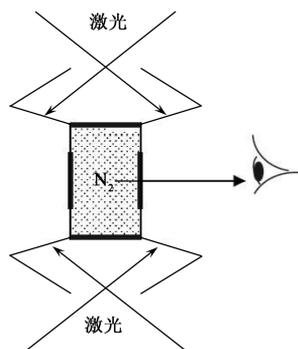


图3 N₂ 光电离实验的结构示意图^[8]

此实验的电离参数最大值为 $10 \text{ erg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 在 $80\text{--}200 \text{ \AA}$ 的波段上, 观测到了 N 和 O 的 K 壳层的发射线. 其中氧元素来自于聚酰亚胺薄膜及腔靶上的氧化物. 通过理论与实验光谱的比对, 他们得到了合理的等离子体温度, 并给出了光电离过程占主导的证据. 同时他们指出, 在光电离和局部热动平衡 (LTE) 假设下, 有可能分别给出相同的光谱特征. 从而认为, 判断实验中获得的等离子体是否为光电离等离子体, 辐射场温度的测量是非常关键的.

2.4 硅元素的光电离实验

中国科学院物理研究所、国家天文台与日本大阪大学利用上海神光II激光器和大阪大学的 Gekko-XII 激光器进行了光电离等离子体的合作研究. 他们在上海神光II激光装置上进行了硅元素的光电离实验. 利用 2.4 kJ 主激光, 在腔靶中产生了辐射温度约 100 eV 的类黑体辐射, 来离化二氧化硅气凝胶样品^[15], 观测到了硅元素 K 壳层的吸收谱线, 利用局部热动平衡 (LTE) 模型对吸收谱进行了较好的拟合^[16]. 实验中通过调节背景光和主激光之间的延迟, 得到了不同时刻等离子体温度、密度和离化态的空间分布.

Fujioka 等人在日本大阪大学的 Gekko-XII 激光器上, 进行了内爆式的强辐射源驱动的光电离实验^[9]. 这个实验大幅度地提高了辐射源的温度, 使其达到了前所未有的 0.5 keV . 该实验产生类黑体辐射的方式是, 将 12 束脉宽为 $1.2 \pm 0.1 \text{ ns}$ 、波长为 $0.53 \mu\text{m}$ 的绿激光同时加热一个球壳, 使其向球心挤压, 在高温致密的条件下, 产生内爆式的类黑体辐射 (见图 4). 球壳的厚度为 $6.1 \pm 0.1 \mu\text{m}$, 直径为 $505 \pm 5 \mu\text{m}$. 实验中 12 束激光总共携带约 $4.0 \pm 0.2 \text{ kJ}$ 的能量, 将球壳挤压加热到温度近 1 keV , 面密度达 $0.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的致密状态. 硅样品先被一束较弱的激光预加热, 再被类黑体辐射辐照而

进一步离化. 这样就在实验室内模拟了双星系统中致密天体吸积盘周围的光电离等离子体. 实验光谱中包括了 Si 的 K 壳层和 L 壳层的发射谱线, 通过理论模拟, 得到电子温度 $T_e = 27.5 \pm 1.5 \text{ eV}$, 电子密度 $n_e = (0.75 \pm 0.25) \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ^[17].

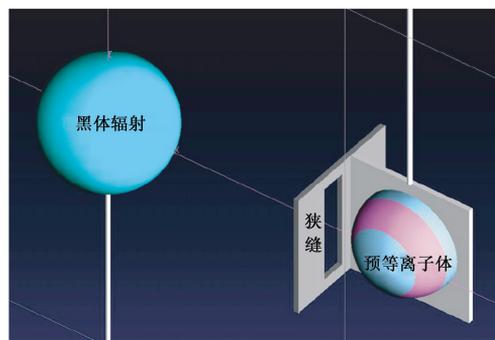


图4 硅元素光电离实验的结构示意图^[17]

实验中电离参数的最大值为 $5.9 \text{ erg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$. 通过对比预热激光不同延迟 (-5 ns , 0 ns , 10 ns) 的实验结果, 发现只有在延迟为 0 ns 时, 才能观测到样品的发射线, 从而证明了预等离子体对这类光电离实验的重要性.

3 光电离的理论模型

分析天体和实验的光电离等离子体光谱, 需要构建光电离理论模型. 在构造模型时, 为了减小计算量, 常常采用近似的计算方法 (如平均原子模型), 忽略不重要的原子过程 (如在低密度时可忽略双电子复合、三体复合等过程) 等. 这里我们将介绍几种常用的模型: Cloudy 模型^[18]、NIMP 模型^[19]、GALAXY 模型^[20].

3.1 Cloudy 模型

Cloudy 模型最早于 1978 年诞生于英国剑桥天文研究所^[18], 模型中所采用的程序最初致力于解决类星体的宽线区问题. Cloudy 90 版本于 1996 年公开发布, 之后又进行了多次改进. Cloudy 是计算处于不同条件下等离子体状态和光谱的集成程序, 尤其是对在非局部热动平衡 (non-LTE) 下的光薄等离子体有着很好的计算结果. 由于追求精准细致的原子模型, Cloudy 在 C84 版本及更早版本中, 只考虑了最轻的 13 种元素的原子数据. 从 C90 开始才逐步加入了重元素. Cloudy 采用并校对 NIST 数据库的最新原子数据, 考虑能量平衡, 通过加入加热机制 (光电离、光激发) 和冷却机制 (退激发、辐射复合) 来计算电子温度和电离平衡.

Cloudy 模型充分考虑了各种辐射和碰撞过程, 采用了细致的原子数据模型, 因此其拟合结果被认为是最可靠的^[7], 同时, 也带来了计算量大、耗时长 的弊端. 除了可以处理光电离等离子体, Cloudy 还可以用于拟合其他物理状态的等离子体谱线, 如冕区电离平衡(CIE)等离子体光谱等.

3.2 NIMP 模型

对于部分电离的非局部热动平衡(non-LTE)等离子体, 可以用平均电离度作为每个离子的电离度, 因此离子每个壳层的电子数可以是非整数, 这样处理后, 计算过程变得简单而且可靠^[21]. 基于这种假设, Rose 编写了基于平均原子模型的 NIMP 程序^[19], 来计算非局部热动平衡的光电离等离子体. 模型中考虑了光电离和光激发过程及其反过程, 光电离系数是通过把光电离截面和辐射场强度卷积而得到^[22]. 对于每个能级的自电离和双电子复合过程, 则采用了 Albritton 等人的近似方法来计算^[23].

由于模型采用了简单的平均原子模型, 大大减小了计算量, 但在分析谱线细致结构时, 可能存在一些问题. 该模型在光电离铁和氮元素的实验光谱的分析上得到了很好的结果^[19].

3.3 GALAXY 模型

在给定的电子密度、电子温度和辐射场的情况下, GALAXY 模型可用来计算等离子体稳态的电离平衡^[20]. 程序考虑了碰撞激发、光激发、碰撞电离和光电离等过程, 速率方程中初态和末态全都采用了简单的类氢近似. 对于原子序数小于 30 的元素, 若电子从基态被电离掉, 则光电离截面采用精确的 HDS (Hartree-Dirac-Slater) 方法计算; 若从激发态被电离到高电离态的基态, 则采用 Kramers 截面. 辐射复合的速率通过细致平衡关系得到. 对于主量子数小于 5 的量子态, 采用平均组态近似来计算.

GALAXY 考虑到了激光驱动等离子体和天体等离子体的不同, 如前者要考虑更多的重元素, 并且需要耦合流体动力学过程. 因此, GALAXY 在处理激光驱动等离子体时, 结果较为可靠.

4 光电离等离子体实验室研究的展望

4.1 实验的总结与展望

近年来光电离实验取得了令人鼓舞的结果, 实验样品从固体扩展到气体, 离化方式从直接离化样品到先将样品加热成为预等离子体, 然后再进行光离化, 同时, 辐射场温度也大大提高(见表 1).

表 1 光电离实验参数

实验方式	样品元素	辐射温度/eV	电离参数/ (erg · cm · s ⁻¹)	文献
Z 箍缩	Fe, Na, F	165	25	[6, 7]
激光	N	80	10	[8]
激光	Si	500	6	[9]

为了在实验室中模拟物理条件更加接近天体环境中的光电离等离子体, 提高电离参数, 有以下两个努力的方向:

第一, 高质量的辐射源: (1)更加接近类黑体辐射的辐射源. 这可以通过采用高原子序数的元素(如 Au, W 等)作为产生辐射源的靶材和靶的设计等手段来实现; (2)更高的辐射温度. 使用更大功率的强激光器和改进靶的设计以提高能量的使用率; (3)更稳定的辐射源. 和天体物理学中的时标相比, 实验室中纳秒级的模拟过程实在太过短暂. 除了用预等离子体的方法外, 还可以利用高时间分辨的观测手段(如条纹相机), 观测到纳秒量级的时间内等离子体的演化特性.

第二, 制作低密度的实验样品, 降低等离子体的密度, 从而可以加大电子和离子的自由程, 减少碰撞几率, 这样就使得光电离过程处于更为主导地位, 和天体环境中的光电离等离子体更为接近.

4.2 光电离理论模型的改进

随着实验手段的逐渐提高, 光电离实验获得了越来越多的高质量数据. 光电离理论模型也面临着新的挑战. 对于模型的改进主要有两个方面:

第一, 需要时间分辨的光电离模型. 以往的光电离模型均是从处理天文观测光谱出发而建立的稳态的模型, 而在处理实验室中快速演化的光电离等离子体或时间分辨的光谱时, 稳态的模型不能满足需求, 而需要时间分辨的光电离模型.

第二, 需要更加准确的原子数据. 原子数据的精度, 对光电离模型能否给出可靠的结果是至关重要的. 其中包括能级、波长、自发跃迁速率、振子强度、电子碰撞强度等, 更新和扩充光电离模型中的相关原子数据是十分必要的.

5 结束语

光电离等离子体的实验室研究为模拟和解释天体物理学问题提供了一条新的途径. 随着天体物理学与实验室研究更紧密的结合, 以及实验装置的升级, 这个方向的研究将不断深入和扩展.

美国国家点火设施(NIF)^[24]是超大型激光器装

置. 该装置由 192 束 1.8MJ/束的激光组成, 目前已有部分激光束建成并投入使用. 全部建成后, 能够提供约 10keV 的辐射温度的辐射场, 可用于模拟中子星吸积过程产生的光电离现象, 对宇宙暗物质的本质、重元素的起源等问题的研究有重要意义^[5]. 超大型激光器的建成和 Z 箍缩等设备的升级改造, 以及高能密度物理的发展, 将为探索相关天体物理问题提供更为有力的实验手段和理论支撑.

参考文献

[1] Brinkman A C *et al.* *Astrophys. J.*, 2000, 530: L111
 [2] Canizares C R *et al.* *Astrophys. J.*, 2000, 539: L41
 [3] Liang G Y *et al.* *New Astronomy*, 2007, 12: 435
 [4] Turner M. *Connecting Quarks with the Cosmos: Eleven Science Questions for the New Century.* National Academies Press, 2003
 [5] Drake R P. *Nature Physics*, 2009, 5: 786
 [6] Foord M E *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93: 055002
 [7] Foord M E *et al.* *J. Quant. Spect. Rad. Trans.*, 2006, 99: 712

[8] Wang F L *et al.* *Phys. Plasmas*, 2008, 15: 073108
 [9] Fujioka S *et al.* *Nature Phys.*, 2009, 5: 821
 [10] 张杰, 赵刚. *物理*, 2000, 29: 393 [Zhang J, Zhao G. *Wuli (Physics)*, 2000, 29: 393]
 [11] Tarter C B *et al.* *Astrophys. J.*, 1969, 156: 943
 [12] Takabe H, Theor P. *Phys. Suppl.*, 2001, 143: 202
 [13] Kallman T R *et al.* *Astrophys. J.*, 1982, 50: 263
 [14] Remington B A *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2006, 78: 755
 [15] Dong Q L, Wang S J, Li Y T *et al.* *Phys. Plasmas*, 2010, 17: 012701
 [16] Wei H G *et al.* *The Astrophysical J.*, 2008, 683: 577
 [17] Wang F L *et al.* *The Astrophysical J.*, 2009, 706: 592
 [18] Ferland G J *et al.* *PASP*, 1998, 110: 761
 [19] Rose S J *et al.* *J. Phys. B*, 2004, 37: L337
 [20] Rose S J. *J. Phys. B*, 1998, 31: 2129
 [21] Grasberger W H *et al.* *Lawrence Livermore National Laboratory Internal Report*, 1965, UCRL-12408
 [22] Kramers H. *Phil. Mag.*, 1923, 46: 836
 [23] Albritton J R, Wilson B G. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83: 1594
 [24] Moses E I. *The National Ignition Facility: transition to a target shooter.* In: *Proceedings of the 2003, International Conference of Inertial Fusion Science and Applications.* 2004, 535



• 书评和书讯 •

科学出版社物理类重点图书推荐

书名	作(译)者	书名	作(译)者
中国科学技术经典文库·物理卷		现代物理基础丛书	
理论物理第一册 古典动力学	吴大猷	高等结构动力学	李东旭
理论物理第二册 量子论与原子结构	吴大猷	微分几何入门与广义相对论	梁灿彬、周彬
理论物理第三册 电磁学	吴大猷	现代声学理论基础	马大猷
理论物理第四册 相对论	吴大猷	物理学中的群论(第二版)	马中骥
理论物理第五册 热力学、气体运动论及统计力学	吴大猷	计算物理学	马文淦
理论物理第六册 量子力学(甲部)	吴大猷	物理学家用微分几何(第二版)	侯伯元 侯伯宇
理论物理第七册 量子力学(乙部)	吴大猷	相互作用的规范理论(第二版)	戴元本
半导体物理基础	黄昆 韩汝琦	输运理论(第二版)	黄祖洽
群论及其在物理学中的应用	谢希德 蒋平 陆奋	数学物理方程及其近似方法	程建春
近期新书		高等原子分子物理学(第二版)	徐克尊
薄壁构件稳定理论及其应用	周绪红 等	狭义相对论(第二版)	刘辽
可压缩湍流直接数值模拟	傅德薰 等	量子光学导论	谭维翰
先进低成本医疗技术	刘静 等	经典电动力学	曹昌祺
无损检测技术及其应用(第二版)	张俊哲	国外物理名著系列	
高等量子力学(第二版)	张永德	量子力学原理	P. A. M. Dirac
全光开关原理	李淳飞	液晶物理学	P. G. de Gennes
纳米光电子器件	彭英才 傅广生	实用量子力学	S. Flugge
现代光学基础与前沿	林强、叶兴浩	相变和晶体对称性	Y. A. Izyumov
多孔介质多场耦合作用及其工程响应	赵阳升	量子系统中的几何相位	A. Bohm
火星——关于其内部、表面和大气的引论	Nadine G. Barlow 著, 吴季等译	自组织纳米材料	Motonari Adachi, D. J. Lockwood
10000 个科学难题物理卷	编委会	光学与激光	M. Young
火灾风险评估方法学	范维澄 等	飞秒激光脉冲	C. Rullière
超常规能源技术	刘静 等	量子光学	M. Orszag

更多信息请访问 <http://www.sciencep.com/>
 邮购电话: 010-64034558
 如有其他需要, 请咨询编辑部
 联系人: 钱俊, 64017957, qianjun@mail.sciencep.com