

# 基于 X 射线荧光光谱的温稠密物质离化分布 实验方法研究\*

张志宇<sup>1)</sup> 赵阳<sup>1)</sup> 青波<sup>1)</sup> 张继彦<sup>1)</sup> 林成亮<sup>2)</sup> 杨国洪<sup>1)</sup> 韦敏习<sup>1)</sup>  
熊刚<sup>1)</sup> 吕敏<sup>1)</sup> 黄成武<sup>1)</sup> 朱托<sup>1)</sup> 宋天明<sup>1)</sup> 赵妍<sup>1)</sup> 张玉雪<sup>1)</sup>  
张璐<sup>1)</sup> 李丽灵<sup>1)</sup> 杜华冰<sup>1)</sup> 车兴森<sup>1)</sup> 黎宇坤<sup>1)</sup> 詹夏宇<sup>1)</sup> 杨家敏<sup>1)†</sup>

1) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2023 年 7 月 26 日收到; 2023 年 9 月 12 日收到修改稿)

受温度及密度等环境效应影响, 温稠密物质的电子结构发生显著变化, 其理论描述非常复杂, 精密实验测量亦极其困难. 本文发展了基于 X 射线荧光光谱研究温稠密物质离化分布的实验方法, 结合理论研究有助于深入理解温稠密物质的电子结构变化. 在万焦耳激光装置上, 设计特殊构型黑腔复合加载产生数十 eV、近固体密度的稠密 Ti 物质, 利用激光辐照 V 产生的热发射线泵浦 Ti 的荧光, 并采用晶体谱仪诊断样品的 X 射线荧光光谱. 实验中获得冷样品和加载样品的荧光光谱, 观测到加载样品  $K_{\alpha}$  及  $K_{\beta}$  荧光谱线相对于冷样品光谱在高能侧的显著变化, 结合理论计算解释了加载样品荧光谱线的变化主要来源于其温度上升后离化分布的改变, 建立了基于 X 射线荧光光谱的温稠密物质离化分布实验研究能力.

**关键词:** 温稠密物质, 电子结构, 离化分布, X 射线荧光光谱

**PACS:** 52.27.Gr, 36.20.Kd, 52.70.La, 78.70.En

**DOI:** 10.7498/aps.73.20231216

## 1 引言

温稠密物质 (warm dense matter, WDM) 是介于凝聚态物质和高温等离子体之间的一种过渡态物理体系, 温度为 1—100 eV、密度达到 0.1—10 倍固体密度, 具有强耦合和部分简并等复杂特性, 广泛存在于行星内部、冷恒星和超新星遗迹等自然天体中, 亦是惯性约束聚变和 Z 箍缩等极端物理过程必须经历的重要物质状态<sup>[1,2]</sup>. 相比于孤立原子, 经历加热和压缩的稠密物质受环境中自由电子和离子的屏蔽, 其电子波函数发生严重畸变, 出现束缚电子能级展宽、移动以及压致电离等. 电

子结构的变化会改变稠密物质中的辐射与流体物理性质, 影响辐射能的输运和交换、材料的辐射不透明度以及电离平衡等. 特别是对于温度相对较低的温稠密物质 (1—100 eV), 原子核周围有较多的束缚电子, 相互作用体系非常复杂. 由于温稠密物质的复杂特性, 理想等离子体和凝聚态物质模型都不能对其进行准确描述, 而量子分子动力学等基于第一性原理的理论研究也存在不小挑战<sup>[3-8]</sup>. 基于 X 射线光谱的研究结果表明, 不同模型的计算结果差异很大, 且实验结果与理论结果的差异也很大<sup>[9-17]</sup>.

随着高功率强激光等技术的发展, 温稠密物质实验研究也逐步开展起来. 在温稠密物质产生方面, 利用强激光等容加热或冲击加载是开展温稠密

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12004351, 11734013) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yjm70018@sina.cn

物质实验研究的主要加载手段之一<sup>[18-22]</sup>. 在诊断方面, X 射线光谱是研究温稠密物质电子结构及辐射光谱特征的重要手段, 主要包括两种途径: 吸收光谱法和发射光谱法. 自 Bradley 等<sup>[9]</sup>的研究开始, 利用 X 射线吸收边光谱诊断温稠密物质 K 吸收边的展宽和移动已经有不少研究<sup>[10-12]</sup>, 但利用吸收边光谱所获得的结果主要研究了温稠密物质吸收边随状态改变而发生的变化, 对束缚电子能级结构的变化无法直接研究.

通过束缚-束缚跃迁发射的 keV 能区 X 射线光谱, 可用于研究束缚电子能级结构<sup>[23]</sup>. 但是由于温稠密物质的温度较低, 仅通过电子碰撞激发机制很难产生足够的内壳层空穴, 因此实验中难以测量到 keV 能区的束缚-束缚跃迁 X 射线发射光谱. 通过外加 X 光泵浦源泵浦 K 壳层电子可以产生空穴, 有一定概率是通过外壳层电子跃迁填补空穴并发射荧光, 因此借助 X 射线荧光光谱可研究温稠密物质的束缚电子能级结构. 但是, 即使利用外源泵浦, 能够产生的发射谱线强度仍然较弱, 因此开展温稠密物质 X 射线荧光光谱实验研究仍需克服弱信号测量的问题. 鉴于对实验加载能力与诊断条件要求非常苛刻, 温稠密物质的荧光光谱实验研究很少, 所覆盖的状态区间很窄, 并且主要是通过测量高密度样品谱线的移动研究密度效应对温稠密物质电子结构的影响<sup>[15-17]</sup>, 对温度变化造成的影响研究极少.

本文基于 X 射线荧光光谱开展了温稠密物质状态对其电子结构的影响研究: 采用特殊黑腔设计(泡沫直柱腔)产生近固体密度、数十 eV 的温稠密物质; 获得并观测到加载样品荧光光谱相对于冷样品光谱在高能侧的显著变化, 结合理论计算解释了加载样品荧光谱线的变化主要来源于其温度上升后离化分布的改变, 建立了基于 X 射线荧光光谱的温稠密物质离化分布实验研究能力.

## 2 实验方法及排布

实验在万焦耳激光装置上开展, 包括荧光光谱测量和样品处辐射源测量两部分, 实验示意图如图 1 所示. 在荧光光谱测量实验中, 如图 1(a) 所示, 8 路激光 ( $8 \times 800$  J, 1 ns, 三倍频) 从两端注入泡沫直柱腔, 产生 X 射线并输运至样品 (CH/Ti/CH) 处, 在样品中形成软 X 射线辐射驱动对撞冲

击压缩和高能 X 射线体加热的复合加载, 产生数十 eV、近固体密度的稠密 Ti 物质. 第 9 路激光辐照 10  $\mu\text{m}$  厚的 V 产生  $\text{He}_\alpha$  (约 5.21 keV) 以及  $\text{Ly}_\alpha$  (约 5.44 keV) 等特征 X 射线作为泵浦源, 泵浦 Ti 样品的内壳层电子 (电离能约为 4.97 keV), 外壳层电子有一定概率通过跃迁填补空穴并发射荧光, 其光谱采用 TAM 晶体谱仪诊断. 实验中通过改变打靶策略 (只打泵浦激光、调控加载激光与泵浦激光的延时), 获得冷 Ti 样品和加载 Ti 样品的荧光光谱.

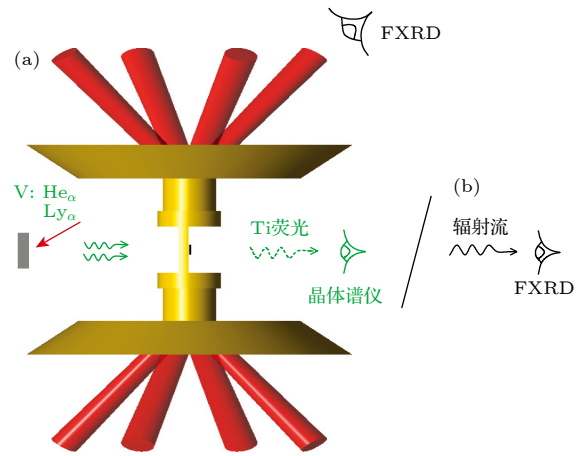


图 1 温稠密 Ti 的荧光光谱实验示意图 (a) 荧光光谱测量; (b) 样品处辐射源测量

Fig. 1. Schematic of the X-ray fluorescence spectrum experiment of warm dense Ti: (a) Measurement of the X-ray fluorescence spectrum; (b) measurement of the radiation source for sample.

在样品状态研究方面, 本实验主要通过辐射流测量获得样品处辐射源, 进而结合流体模拟给出样品状态演化过程. 样品处辐射源测量实验采用同样的黑腔, 将中心的样品替换为 Au 样品或者无样品, 利用平响应 X 射线探测器 (FXRD) 测量 8 路激光注入时 Au 的再发射流 (用有 Au 样品时的辐射流测量结果扣除无样品时的本底辐射流), 进而利用 Au 的反照特性获得样品处的辐射源<sup>[22]</sup>, 如图 1(b) 所示. 样品处的辐射源如图 2(a) 所示, 其峰值辐射温度约为 123 eV、M 带份额约为 10% (激光注入期间). 以该辐射源作为输入, 利用流体程序 MULTI1D<sup>[24]</sup> 模拟获得 Ti 样品的温度密度演化过程, 结果如图 2(b) 所示. 基于上述方法开展过 Al 吸收谱实验中 Al 状态的模拟, 与利用 X 射线吸收边给出的温度测量结果符合较好<sup>[13]</sup>.

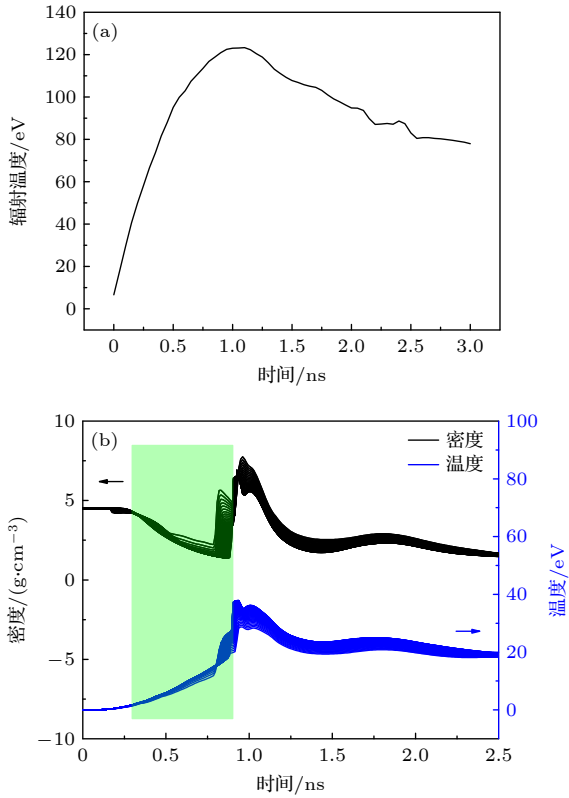


图 2 (a) 样品处辐射源; (b) Ti 样品的温度密度演化过程模拟结果, 绿色区域对应 Shot 2 的诊断时间窗口  
 Fig. 2. (a) Incident flux for the sample; (b) simulated density and temperature evolution of Ti sample, and the green area corresponds to the diagnostic window for Shot 2.

### 3 实验结果及讨论

综合考虑样品状态演化和信号强度需求, 实验中设置用于泵浦的第 9 路激光的脉宽为 600 ps, 通过改变打靶策略, 获得了冷 Ti 样品和加载样品的荧光光谱: 1) 第一发实验 (Shot 1) 中没有用于加载的 8 路激光而只有用于泵浦的第 9 路激光, 因此样品是冷样品 ( $4.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,  $0.03 \text{ eV}$ ); 2) 第二发实验 (Shot 2) 中采用 8 路、第 9 路激光联合打靶且第 9 路激光前沿相对 8 路激光前沿延时 0.3 ns, 在诊断时间窗口内样品的状态为  $1.8\text{--}4.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,  $1\text{--}25 \text{ eV}$ , 如图 2(b) 绿色区域所示.

不同状态 Ti 样品的荧光光谱及解谱结果 ( $\text{K}_\alpha$ ,  $\text{K}_\beta$  谱线) 如图 3 所示. 实验中通过优化设计保证  $\text{K}_\alpha$  荧光谱线的亮度足够强, 因此其信噪比较好, 但是亮度比  $\text{K}_\alpha$  弱一个量级的  $\text{K}_\beta$  荧光谱线信噪比稍差. 从解谱结果来看, 相比于冷样品, 加载样品的  $\text{K}_\alpha$  及  $\text{K}_\beta$  荧光光谱线型在高能侧明显展宽, 表明荧光谱线受到样品状态的影响.

实验中荧光谱线变化的可能原因包括两种: 1) 状态发生变化后 Ti 样品的束缚能级发生展宽和移动导致谱线展宽; 2) 状态发生变化后出现更多

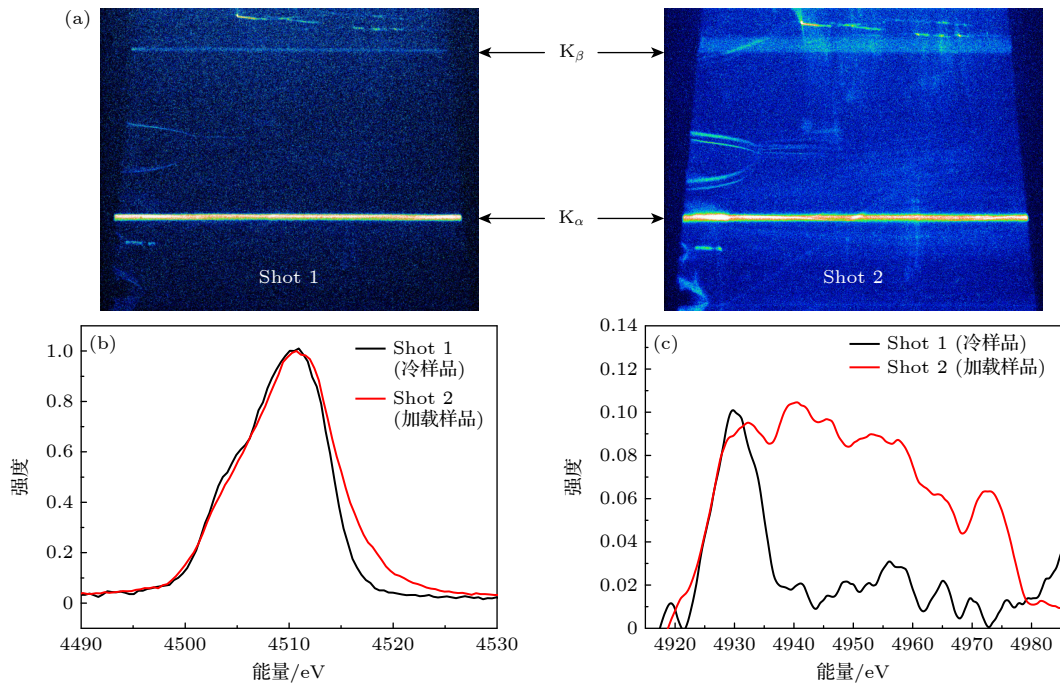


图 3 不同状态 Ti 样品的荧光光谱 (a) 原始图像; (b)  $\text{K}_\alpha$  解谱结果; (c)  $\text{K}_\beta$  解谱结果

Fig. 3. X-ray fluorescence spectrum of Ti samples with different state: (a) Original images; (b) spectral results of  $\text{K}_\alpha$ ; (c) spectral results of  $\text{K}_\beta$ .

电离度的 Ti 样品, 各个电离度的 Ti 的荧光谱线重叠在一起导致谱线展宽. 下面结合理论计算结果进行分析, 理论方面采用一种“two-step Hartree-Fock-Slater (TSHFS)”模型计算温热稠密 Ti 的电子结构及荧光光谱的跃迁能量. TSHFS 理论模型中的第一步是求解基于平均原子模型的 Hartree-Fock-Slater 方程以获取平均组态中电子的轨道能量. 第二步是给出同一价态不同组态之间跃迁的能量 [25,26].

### 3.1 $K_{\alpha}$ 荧光光谱

冷 Ti 样品的  $K_{\alpha}$  谱线包括两个高斯分布的谱线  $K_{\alpha 1}$  和  $K_{\alpha 2}$ , 能量分别为 4511 eV 和 4505 eV, 强度比约为 2, 使用不同的谱分辨对这两个谱线进行拟合会获得不同线形的  $K_{\alpha}$  谱线, 因此实验中谱仪的谱分辨会影响所测量的  $K_{\alpha}$  谱线线形. 根据光源大小和实验所用晶体谱仪的特性初步评估谱仪的谱分辨约为 800, 以此谱分辨作为输入,  $K_{\alpha}$  谱线线形的拟合结果与实验结果符合很好, 如图 4 所示, 因此可以确定实验诊断的 Ti 的荧光光谱的谱分辨为 800.

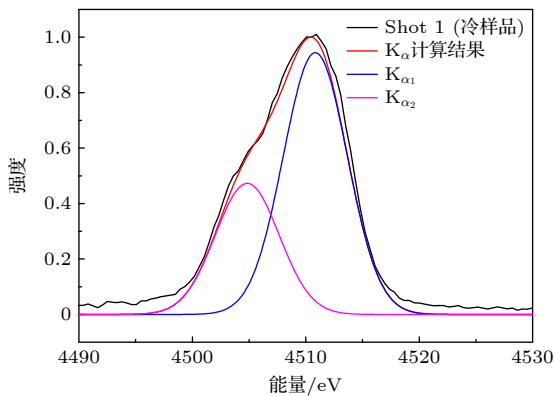


图 4 冷 Ti 样品  $K_{\alpha}$  计算结果与实验结果的比较  
Fig. 4. Comparison between simulated results and experimental results of cold Ti sample  $K_{\alpha}$ .

基于上述谱分辨, 进一步比较加载样品  $K_{\alpha}$  谱线的实验结果与理论结果. 由图 2 可知, 在诊断时间窗口内, 样品的状态并不均匀, 早期样品的密度更接近固体密度且温度比较低, 中后期样品的密度接近 0.5 倍固体密度而温度达到 10—20 eV. 早期样品的状态接近冷样品, 其荧光谱线相对于冷样品变化也很小, 对高能侧的变化贡献很弱, 因此加载样品光谱的变化主要来源于诊断窗口的中后期.

图 5 给出冷样品和 Ti 的  $K_{\alpha}$  荧光谱线 ((2.25 g/cm<sup>3</sup>, 10 eV) 与 (2.25 g/cm<sup>3</sup>, 20 eV)) 理论计算结果, 随着温度的升高, 谱线在 高能侧展宽. 表 1 给出了密度为 2.25 g/cm<sup>3</sup>, 温度分别为 10 eV 和 20 eV 的 Ti 的离化分布以及相应荧光谱线能量的计算结果. 对于温度为 10 eV 的 Ti 样品, 其主要电离度为 4, 5, 6, 平均电离度为 4.4; 而对于温度为 20 eV 的 Ti 样品, 其主要电离度为 4, 5, 6, 7, 8, 9, 平均电离度为 6.1. 从计算结果可以看出, 随着温度的升高, Ti 样品中出现更多价态和组态的离子且离化分布向高电离度移动. 不同价态或组态 Ti 的  $K_{\alpha}$  荧光谱线能量不同但差异较小 (相邻价态的差异大致在 1—3 eV), 导致无法被分辨, 因此结果表现为谱线在 高能侧展宽. 实验结果介于两种单一温度 (10 和 20 eV) 的理论计算结果之间, 与对样品状态的预估比较一致.

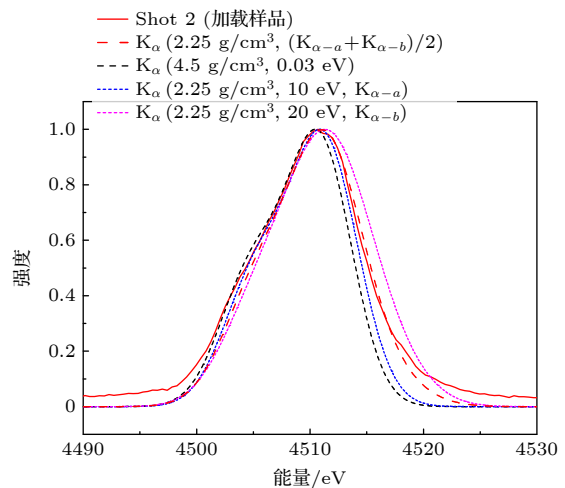


图 5 加载 Ti 样品  $K_{\alpha}$  荧光光谱计算结果与实验结果的对比

Fig. 5. Comparison between simulated results and experimental results of warm dense Ti sample  $K_{\alpha}$ .

### 3.2 $K_{\beta}$ 荧光光谱

相比 L 壳层, 距离原子核更远的 M 壳层受环境影响更大, 实验中诊断的  $K_{\beta}$  荧光谱线随状态的变化更为显著, 如图 3(c) 所示. 理论结果表明, 不同价态 Ti 样品的  $K_{\beta}$  谱线能量差相比于  $K_{\alpha}$  显著增大 (相邻价态 Ti 的  $K_{\beta}$  能量差异大致在 6—12 eV), 如图 6 所示, 在实验谱分辨下可以分辨. 与  $K_{\alpha}$  光谱一样, 加热状态 Ti 样品  $K_{\beta}$  荧光谱线的理论计算结果变化与实验结果定性一致, 但两种单一温度 (10 和 20 eV) Ti 光谱的理论计算结果均无法定量

表 1 密度为 2.25 g/cm<sup>3</sup>、不同温度 Ti 的离化分布的相应荧光谱线能量  
Table 1. Ionization distribution and spectrum line energy of Ti with 2.25 g/cm<sup>3</sup> and different temperature.

温度/eV	价态	组态	组态占比	K <sub>α1</sub> 能量/eV	K <sub>β</sub> 能量/eV
10	4	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup>	0.59	4510.78	4930.90
	5	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup>	0.31	4511.95	4936.91
	5	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>1</sup> 3p <sup>6</sup>	0.01	4511.80	4936.99
	6	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup>	0.07	4513.47	4944.08
20	4	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup>	0.07	4508.75	4935.17
	5	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup>	0.20	4510.24	4942.15
	5	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>1</sup> 3p <sup>6</sup>	0.02	4510.01	4942.00
	6	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup>	0.25	4512.07	4950.23
	6	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>1</sup> 3p <sup>5</sup>	0.06	4511.80	4949.96
	7	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup>	0.16	4514.26	4959.43
	7	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>1</sup> 3p <sup>4</sup>	0.08	4513.95	4959.03
	8	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup>	0.06	4516.83	4969.80
	8	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>1</sup> 3p <sup>3</sup>	0.05	4516.47	4969.27
	9	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup>	0.01	4519.78	4981.40
	9	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>1</sup> 3p <sup>2</sup>	0.02	4519.38	4980.74

注: 组态占比小于0.01的组态已忽略

重复实验结果. 实验结果与 10 和 20 eV 理论计算结果的插值结果较为一致, 但在各峰值的绝对强度上还存在差异, 可能的原因包括理论状态不能完全对应实验状态的不均匀、以及理论计算还不够丰富且可能存在一些偏差等. 但是, 上述分析表明, X 射线荧光光谱可以用于研究温稠密物质的离化分布, 后续通过改善样品状态的均匀性并开展实验测量, 可以获得一套温稠密物质的离化分布数据

(温度、密度、离化分布), 进而结合理论定量地研究温稠密物质电子结构的变化.

### 4 结 论

本文通过发展基于激光间接驱动的温稠密物质 X 射线荧光光谱实验方法, 建立了温稠密物质离化分布的实验研究能力. 基于特殊构型黑腔在样品处形成软 X 射线对撞冲击压缩结合高能 X 射线加热的复合加载, 产生数十 eV、近固体密度的稠密 Ti 物质, 采用 TAM 晶体谱仪获得冷样品以及加载样品的荧光光谱, 观测到加载样品 K<sub>α</sub> 及 K<sub>β</sub> 荧光谱线相对于冷样品光谱的明显变化, 结合理论计算 (TSHFS) 解释了加载样品 K<sub>α</sub> 及 K<sub>β</sub> 荧光谱线的变化主要来源于其温度上升后的离化分布改变.

后续拟采用内爆方法产生短脉冲的连续光源, 优化诊断时间窗口内样品状态的均匀性和稳定性, 并将 Al 掺杂在 Ti 样品中, 在测量 Ti 荧光光谱的同时测量 Al 的吸收光谱, 利用 Al 等离子体 K<sub>α</sub> 线相对强度和 Al 等离子体类 F 离子 K<sub>α</sub> 线的线形分别进行温度和密度诊断, 优化荧光光谱诊断技术提升光谱分辨, 进而获得一套较为完整的稠密样品离化分布数据 (温度、密度、离化分布), 结合理论定量研究稠密环境对电子结构的影响, 如电离势降低 (IPD) 等.

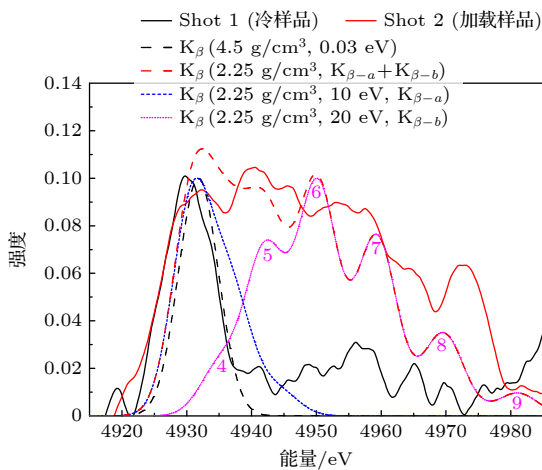


图 6 Ti 样品 K<sub>β</sub> 计算结果与实验结果的比较, 图中数字代表 Ti 的价态

Fig. 6. Comparison between simulated results and experimental results of Ti sample K<sub>β</sub>, the numbers in the figure represent the valence state of Ti.

## 参考文献

- [1] Saumon D, Chabrier G 1991 *Phys. Rev. A* **44** 5122
- [2] Lindl J D 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3933
- [3] Surh M P, Barbee T W, Yang L H 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5958
- [4] Mazevet S, Zérah G 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 155001
- [5] Jin Y, Zhang P, Li Y J, Hou Y, Zeng J L, Yuan J M 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 073102 (in Chinese) [金阳, 张平, 李永军, 侯永, 曾交龙, 袁建民 2021 *物理学报* **70** 073102]
- [6] Zhang S, Zhao S J, Kang W, Zhang P, He X T 2016 *Phys. Rev. B* **93** 115114
- [7] Dai J Y, Hou Y, Yuan J M 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 245001
- [8] Wang C, He X T, Zhang P 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 145002
- [9] Bradley D K, Kilkenny J, Rose S J, Hares J D 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 2995
- [10] DaSilva L, Ng A, Godwal B K, Chiu G, Cottet F, Richardson M C, Jaanimagi P A, Lee Y T 1989 *Phys. Rev. Lett.* **62** 1623
- [11] Yaakobi B, Boehly T R, Sangster T C, Meyerhofer D D, Remington B A, Allen P G, Pollaine S M, Lorenzana H E, Lorenz K T, Hawreliak J A 2008 *Phys. Plasmas* **15** 062703
- [12] Benuzzi-Mounaix A, Dorchie F, Recoules V, Festa F, Peyrusse O, Levy A, Ravasio A, Hall T, Koenig M, Amadou N, Brambrink E, Mazevet S 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 165006
- [13] Zhao Y, Yang J M, Zhang J Y, Yang G H, Wei M X, Xiong G, Song T M, Zhang Z Y, Bao L H, Deng B, Li Y K, He X A, Li C G, Mei Y, Yu R Z, Jiang S E, Liu S Y, Ding Y K, Zhang B H 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 155003
- [14] Zhao Y, Zhang Z Y, Qing B, Yang J M, Zhang J Y, Wei M X, Yang G H, Song T M, Xiong G, Lü M, Hu Z M, Deng B, Hu X, Zhang W H, Shang W L, Hou L F, Du H B, Zhan X Y, Yu R Z 2017 *EPL* **117** 65001
- [15] Hansen S B, Harding E C, Knapp P F, Gomez M R, Nagayama T, Bailey J E 2017 *High Energy Density Phys.* **24** 39
- [16] Hansen S B, Harding E C, Knapp P F, Gomez M R, Nagayama T, Bailey J E 2018 *Phys. Plasmas* **25** 056301
- [17] Jiang S, Lazicki A E, Hansen S B, Sterne P A, Grabowski P, Shepherd R, Scott H A 2020 *Phys. Rev. E* **101** 023204
- [18] Mančić A, Lévy A, Harmand M, Nakatsutsumi M, Antici P, Audebert P, Combis P, Fourmaux S, Mazevet S, Peyrusse O, Recoules V, Renaudin P, Robiche J, Dorchie F, Fuchs J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 035002
- [19] Park H, Remington B A, Braun D, Celliers P, Collins G W, Eggert J, Giraldez E, Pape S L, Lorenz T, Maddox B, Hamza A, Ho D, Hicks D, Patel P, Pollaine S, Prisbrey S, Smith R, Swift D, Wallace R 2008 *J. Phys. Conf. Ser.* **112** 042024
- [20] Lee H J, Neunayer P, Castor J, Döppner T, Falcone R W, Fortmann C, Hammel B A, Kritcher A L, Landen O L, Lee R W, Meyerhofer D D, Munro D H, Redmer R, Regan S P, Weber S, Glenzer S H 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 115001
- [21] Benuzzi-Mounaix A, Mazevet S, Ravasio A, Vinci T, Denoed A, Koenig M, Amadou N, Brambrink E, Festa F, Levy A, Harmand M, Brygoo S, Huser G, Recoules V, Bouchet J, Morard G, Guyot F, Resseguier T, Myanishi K, Ozaki N, Dorchie F, Gaudin J, Leguay P M, Peyrusse O, Henry O, Raffestin D, Pape S, Smith R, Musella R 2014 *Phys. Scr.* **T161** 014060
- [22] Zhang Z Y, Zhao Y, Zhang J Y, Hu Z M, Jing L F, Qing B, Xiong G, Lü M, Du H B, Yang Y M, Zhan X Y, Yu R Z, Mei Y, Yang J M 2019 *Phys. Plasmas* **26** 072704
- [23] Eidmann K, Andiel U, Pisani F, Hakel P, Mancini R C, Junkel-Vives G C, Abdallah J, Witte K 2003 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **81** 133
- [24] Ramis R, Schmalz R, Meyer-Ter-Vehn J 1988 *Comput. Phys. Commun.* **49** 475
- [25] Son S K, Thiele R, Jurek Z, Ziaja B, Santra R 2014 *Phys. Rev. X* **4** 031004
- [26] Lin C L 2019 *Phys. Plasmas* **26** 122707

# Experimental method for warm dense matter ionization distribution based on X-ray fluorescence pectroscopy\*

Zhang Zhi-Yu<sup>1)</sup> Zhao Yang<sup>1)</sup> Qing Bo<sup>1)</sup> Zhang Ji-Yan<sup>1)</sup>  
 Lin Cheng-Liang<sup>2)</sup> Yang Guo-Hong<sup>1)</sup> Wei Min-Xi<sup>1)</sup> Xiong Gang<sup>1)</sup>  
 Lü Min<sup>1)</sup> Huang Cheng-Wu<sup>1)</sup> Zhu Tuo<sup>1)</sup> Song Tian-Ming<sup>1)</sup> Zhao Yan<sup>1)</sup>  
 Zhang Yu-Xue<sup>1)</sup> Zhang Lu<sup>1)</sup> Li Li-Ling<sup>1)</sup> Du Hua-Bing<sup>1)</sup>  
 Che Xing-Sen<sup>1)</sup> Li Yu-Kun<sup>1)</sup> Zhan Xia-Yu<sup>1)</sup> Yang Jia-Min<sup>1)†</sup>

1) (*Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

2) (*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*)

( Received 26 July 2023; revised manuscript received 12 September 2023 )

## Abstract

Warm dense matter (WDM), a state of matter that lies at the frontier between condensed matter and plasma, is one of the main research objects of high energy density physics (HEDP). Comparing with the isolated atom, the electron structure of WDM will change because of the influence of density and temperature effect. Both the accurate theoretical representation and the accurate experimental study of WDM electron structure are challenging, as it is strongly coupled and partially degenerated. In this work, an experimental method of studying the ionization distribution of WDM based on X-ray fluorescence spectroscopy is developed. In the experiment, in a specially designed hohlraum, warm and dense titanium with several tens of electron volts and nearly solid density is produced by simultaneous driving of high-energy X-ray heating and shock compression. Then, using the characteristic line spectrum emitted by the laser irradiation on pump material (Vanadium) as a pump source, the titanium emits fluorescence. The X-ray fluorescence spectra of titanium with different states (cold sample, 1.8–4.5 g/cm<sup>3</sup> and 1–25 eV) are diagnosed by changing the experimental strategy. The experimental results indicate that the line profiles of K<sub>α</sub> and K<sub>β</sub> fluorescence spectrum of the heated sample change obviously compared with those of the cold sample. According to the theoretical calculation of the two-step Hartree-Fock-Slater (TSHFS) method, the main reason for the change of the line profile is the change of ionization distribution caused by temperature rising. The future work will focus on optimizing the experimental method of X-ray fluorescence spectrum, such as improving the spectrum resolution, characterizing the temperature and density experimentally, obtaining a set of ionization distribution data, and then studying the influence of dense environment on electronic structure.

**Keywords:** warm dense matter, electron structure, ionization distribution, X-ray fluorescence spectrum

**PACS:** 52.27.Gr, 36.20.Kd, 52.70.La, 78.70.En

**DOI:** [10.7498/aps.73.20231216](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231216)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12004351, 11734013).

† Corresponding author. E-mail: [yjm70018@sina.cn](mailto:yjm70018@sina.cn)

## 基于X射线荧光光谱的温稠密物质离化分布实验方法研究

张志宇 赵阳 青波 张继彦 林成亮 杨国洪 韦敏习 熊刚 吕敏 黄成武 朱托 宋天明 赵妍 张玉雪 张璐  
李丽灵 杜华冰 车兴森 黎宇坤 詹夏宇 杨家敏

## Experimental method for warm dense matter ionization distribution based on X-ray fluorescence spectroscopy

Zhang Zhi-Yu Zhao Yang Qing Bo Zhang Ji-Yan Lin Cheng-Liang Yang Guo-Hong Wei Min-Xi  
Xiong Gang Lü Min Huang Cheng-Wu Zhu Tuo Song Tian-Ming Zhao Yan Zhang Yu-Xue  
Zhang Lu Li Li-Ling Du Hua-Bing Che Xing-Sen Li Yu-Kun Zhan Xia-Yu Yang Jia-Min

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 015201 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231216

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231216>

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

温稠密物质中不同价态离子分布对X-射线弹性散射光谱计算的影响

Influence of different charge-state ion distribution on elastic X-ray scattering in warm dense matter  
物理学报. 2021, 70(7): 073102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201483>

温稠密铝等离子体物态方程及其电离平衡研究

Investigation on equation of state and ionization equilibrium for aluminum in warm dense matter regime  
物理学报. 2020, 69(9): 099101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191826>

基于可分离编码的高分辨X射线荧光成像技术研究

High-resolution coded aperture X-ray fluorescence imaging with separable masks  
物理学报. 2020, 69(19): 198701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200674>

X射线荧光CT成像中荧光产额、退激时间、散射、偏振等关键物理问题计算与分析

Calculation and analysis of key physical problems: Fluorescence yield, deexcitation time, scattering and polarization in X-ray fluorescence CT imaging  
物理学报. 2021, 70(19): 195201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210765>

上海光源硬X射线相干衍射成像实验方法初探

Preliminary exploration of hard X-ray coherent diffraction imaging method at SSRF  
物理学报. 2020, 69(3): 034102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191586>

光子碰撞Au靶产生L系特征X射线角分布

Angular distribution of L characteristic X-ray emission from Au target impacted by photons  
物理学报. 2020, 69(12): 123201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191977>