

# Z箍缩 A1 等离子体 X 辐射谱线的分离及 电子温度的提取\*

高启<sup>1)†</sup> 张传飞<sup>2)</sup> 周林<sup>2)</sup> 李正宏<sup>2)</sup> 吴泽清<sup>3)</sup> 雷雨<sup>1)</sup>  
章春来<sup>1)</sup> 祖小涛<sup>1)</sup>

1) (电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

2) (中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

3) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2013 年 9 月 16 日收到; 2014 年 1 月 17 日收到修改稿)

以“强光一号”Z 箍缩装置 10174 发次光谱诊断实验结果为例, 描述了一种对 Z 箍缩等离子体 X 辐射光谱分离提纯、诊断的方法. 对连续辐射谱和特征辐射线谱进行分离, 并从连续辐射谱和特征辐射线谱中提取了等离子体电子温度信息. 结果显示: 等离子体连续谱主要由等离子体中心的高温区 ( $T_e = 290.7 \text{ eV} \pm 1.2 \text{ eV}$ ) 和温度较低的壳层区域 ( $T_e = 95.3 \text{ eV} \pm 8.3 \text{ eV}$ ) 两部分叠加而成; 特征辐射线谱主要反映了等离子体中心的高温区信息, 根据非局域热动平衡模型计算提取的电子温度约为 299—313 eV, 与连续谱诊断结果基本符合.

**关键词:** Z 箍缩, 光谱分离, 光谱诊断, 电子温度

**PACS:** 52.25.jm, 52.25.Os, 32.70.-n

**DOI:** 10.7498/aps.63.095201

## 1 引言

利用等离子体发射光谱诊断等离子体状态是高温稠密等离子体诊断的关键技术手段之一. 该诊断方法具有精确度高, 不会对等离子体内部状态产生干扰等优点, 被广泛应用于 ICF, Z 箍缩等高温稠密等离子体诊断领域<sup>[1-5]</sup>.

同时, X 射线光谱学方法存在两方面的不足: 1) 谱学数据的解释涉及到复杂的理论研究和数值方法, 对等离子体相关模型依赖比较严重. 2) 实验测量结果一般是各种辐射成分叠加在一起的综合结果. 从谱线形状来说, 既有特征线谱, 又有连续谱. 从来源来说, 则是各种不同状态等离子体辐射谱相互叠加. 因此, 要从实验测量结果提取等离子体状态信息, 必须对等离子体辐射光谱进行必要的分析和处理, 对特征线谱和连续谱、不同等离子体辐射谱进行分离和提纯, 并结合必要的理论计算,

才能得到正确的等离子体状态信息.

目前, 国内外的研究人员在高温稠密等离子体诊断领域做了大量工作, 在实验测量方面, 发展了多套光栅谱仪和晶体谱仪等诊断设备<sup>[6-9]</sup>. 理论方面则针对不同的等离子体状态建立了相应的日冕模型、局域热动平衡模型和碰撞辐射模型, 发展了相应的诊断和数值模拟方法<sup>[10-12]</sup>. 但是, 目前研究成果一般只给出最终实验结果或者理论计算结果, 对于实验数据进一步的分析、处理, 并与谱学数据解释相结合方面, 涉及较少. 在 Z 箍缩等离子体诊断领域, 尚未见相关报道.

本文以“强光一号”Z 箍缩装置 10174 发次光谱诊断实验结果为例, 详细描述了一种对 Z 箍缩等离子体 X 辐射实验测量谱进行分离提纯、诊断的方法. 对连续辐射谱和特征辐射线谱以及不同等离子体辐射谱进行了分离, 并从分离的连续辐射谱和特征辐射线谱中提取了等离子体电子温度信息.

\* 国家自然科学基金与中物院联合基金 (批准号: U1230124) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: fbc1980@163.com

## 2 实验结果

“强光一号”10174 发次 X 辐射光谱测量装置为球面云母晶体谱仪. 摄谱范围为 1.4—2.8 keV. 图 1 为实验测量结果: 测量谱有很强的连续谱背景. 特征辐射谱线则有两个比较强的包络组, 分别位于能量区间 1.562—1.621 keV 和 1.702—1.751 keV, 其他的跃迁包络较弱. 在能量区间 1.562—1.621 keV 区间主要存在的特征辐射谱线主要有三个包络, 最强的是 He  $\alpha$  特征跃迁线, 剩余两个包络为 He  $\alpha$  伴线, 分别为类 Li  $1s^1 2p^2 \rightarrow 1s^2 2p^1$  跃迁 (峰值位于 1.577 keV) 和类 Li  $1s^1 2p^1 3p^1 \rightarrow 1s^2 3p^1$  跃迁 (峰值位于 1.590 keV). 在能量区间 1.702—1.751 keV, 最强的一个包络是 Ly  $\alpha$  线. 较弱的包络是 Ly  $\alpha$  线的伴线, 主要由 He  $2p^2 \rightarrow 1s^1 2p^1$  的三条谱线组成. 各跃迁组分已经在图 1 中标注.

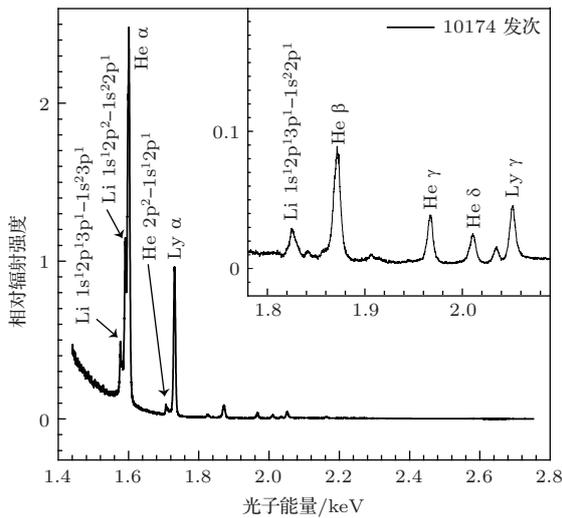


图 1 “强光一号”10174 发次实验结果

## 3 连续谱和特征线谱的分离

### 3.1 连续谱分离的基本原理

要分离连续谱线和特征辐射谱线, 一般的做法是对上述谱线中的相对辐射强度取自然对数, 然后逐步剥离连续谱. 这一做法的基本原理是基于连续谱相对强度自然对数近似正比于光子能量, 其斜率只与等离子体电子温度有关这一原理. 在下面, 将对这一原理详细说明.

在高温稠密等离子体中, 当自由电子与等离子体发生碰撞时, 主要有两种形式的辐射产生. 如果电子仍然处于自由态, 此过程产生的辐射称为韧致

辐射. 如果电子被离子俘获, 此过程产生的辐射称为复合辐射. 在非相对论情况下, 电子与电子碰撞对辐射的贡献很小, 基本可以忽略.

对于韧致辐射过程, 如果电子速度分布满足 Maxwell 分布, 且离子只有一种 (两体碰撞), 则韧致辐射发射率 ( $t$  时刻, 空间  $r$  处的单位体积中物质自发辐射出的单位频率区间的  $\nu$  光子能量) 可以写成<sup>[13,14]</sup>

$$\varepsilon(\nu) = n_e n_i Z^2 \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^3 \frac{8\pi}{3\sqrt{3}m_e^2 c^3} \times \left( \frac{2m}{\pi T_e} \right) e^{-\frac{h\nu}{T_e}} \bar{g}_{\text{ff}}, \quad (1)$$

其中,  $n_e$  为等离子体电子数密度,  $n_i$  为  $i$  阶电离态离子数密度, 参数  $\bar{g}_{\text{ff}}$  可以用包含 Gaunt 因子的函数来近似表示.

对于复合辐射, 如果电子满足 Maxwell 分布, 则有<sup>[13,14]</sup>

$$\varepsilon(\nu) = n_e n_i Z^2 \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^3 \frac{8\pi}{3\sqrt{3}m_e^2 c^3} \left( \frac{2m_e}{\pi T_e} \right) \times e^{-\frac{h\nu}{T_e}} \left[ \frac{Z^2 R_y}{T_e} \frac{2}{n^3} G_n e^{\frac{Z^2 R_y}{n^2 T_e}} \right], \quad (2)$$

其中,  $R_y = \frac{m_e}{2} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar} \right)^2 = 13.6 \text{ eV}$ , 为 Rydberg 能量.

(2) 式为类氢近似下复合辐射公式. 对于非类氢近似, 需要对复合辐射公式作如下修正: 对于最低未填充壳层, 认为存在部分电子, 即最多只能再容纳  $\xi$  个电子而非  $2n^2$  个, 复合辐射概率将会按照因子  $\xi/2n^2$  减小, 与此同时, 用精确的电离能  $\chi_i$  来代替考虑了屏蔽效应的特定能级类氢近似公式  $\frac{Z^2 R_y}{n^2}$ . 此时, 总的连续辐射能量可以写成<sup>[13,14]</sup>

$$\varepsilon(\nu) = n_e n_i Z^2 \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^3 \frac{8\pi}{3\sqrt{3}m_e^2 c^3} \left( \frac{2m}{\pi T_e} \right) \times e^{-\frac{h\nu}{T_e}} \left[ \bar{g}_{\text{ff}} + G_n \frac{\xi}{n^3} \frac{\chi_i}{T_e} e^{\frac{\chi_i}{T_e}} + \sum_{v=n+1}^{\infty} G_v \frac{Z^2 R_y}{T_e} \frac{2}{n^3} G_n e^{\frac{Z^2 R_y}{n^2 T_e}} \right], \quad (3)$$

其中, 第一项是韧致辐射的贡献, 第二项是最低未填充壳层复合辐射的贡献, 第三项则是其他所有壳层复合辐射的贡献. 通常情况下, 如果  $h\nu \geq Z^2 R_y/n^2$ ,  $G_n = 1$ ;  $h\nu < Z^2 R_y/n^2$ ,  $G_n = 0$ .

对上式两边同时取自然对数, 显然有

$$\ln(\epsilon(v)) \propto -\frac{hv}{T_e}. \quad (4)$$

在此近似下, 连续辐射谱辐射强度自然对数近似正比于光子能量, 其斜率只与等离子体电子温度有关.

### 3.2 连续谱分离过程

对“强光一号”装置 10174 发次实验测量相对强度取自然对数, 结果如图 2 中黑色实线所示. 由图 2 可见, 实验测量谱连续谱在高能和低能区域斜率存在明显差别. 这说明, 实验测量等离子体连续谱为叠加后的综合效果. 要提取不同组分连续谱与特征谱线, 需要逐步扣除各部分等离子体连续谱的贡献.

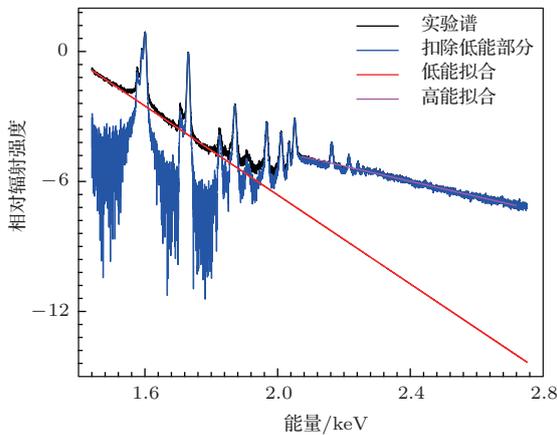


图 2 (网刊彩色) 扣除连续谱本底示意图

具体做法是利用连续谱相对强度自然对数近似正比于光子能量这一原理, 从低能区域开始, 逐步扣除连续谱的影响.

首先通过对能量区间 1.4—2.0 keV 连续谱进行拟合, 拟合结果如图 2 中红色实线所示. 利用拟合结果计算 1.4—2.8 keV 能量区间低能部分连续谱所反映等离子体辐射连续谱, 扣除该部分辐射后的自然对数谱如图 2 中蓝色实线所示.

第二步, 在扣除低能部分连续谱的影响的基础上, 继续扣除高能部分所反映等离子体连续辐射谱, 拟合针对能量范围为 2.0—2.8 keV, 拟合数据如图 2 中淡紫色实线所示.

最终, 对实验测量谱线分离结果见图 3、图 4. 图 3 是扣除连续谱之后单纯的特征辐射谱线. 图 4 是根据前面拟合结果提取的高能区域和低能区域辐射谱线, 分别如图中黑色和红色实线所示. 对高

能区域等离子体连续辐射谱, 考虑到在电子温度为百 eV 量级时, 等离子体连续辐射主要是到 1 s 的复合辐射, 此辐射存在低能极限 (电力阈能), 因此没有往低能区域外推. 从低能区域开始扣除连续谱辐射, 也是由于这一原因.

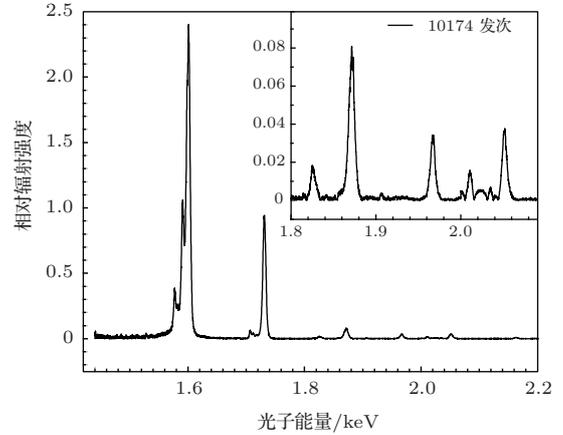


图 3 扣除连续谱结果

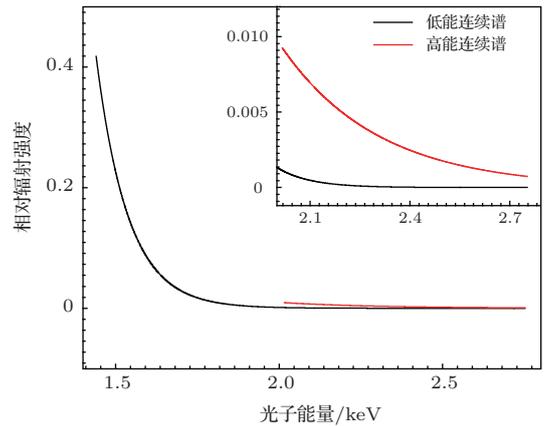


图 4 (网刊彩色) 连续谱提取结果

本文还尝试了对能区做更详细的划分, 将 1.4—2.0 keV 能量区间划分为 1.43—1.54 keV, 1.62—1.69 keV, 1.74—1.89 keV 更细致四个能量区间逐步扣除, 结果和直接从 1.4—2.0 keV 区间拟合参数变化不大.

## 4 利用实验测量谱线提取等离子体电子温度信息

### 4.1 从连续谱提取等离子体电子温度

从 3.1 讨论可知, 等离子体连续谱辐射强度自然对数与电子能量之间近似存在正比关系, 其斜



- [6] Li J, Yang G H, Zhang B H, Zhang J Y, Zhou Y Q 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2389 (in Chinese) [李军, 杨国洪, 张保汉, 张继彦, 周裕清 2000 物理学报 **49** 2389]
- [7] Cheng L X, Xie F J, Yang G H, Yang X D, Zhang H, Zhang J Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3098 (in Chinese) [程新路, 谢方军, 杨国洪, 杨向东, 张红, 张继彦 2003 物理学报 **52** 3098]
- [8] Shlyaptseva A S, Hansen S B, Kantsyrev V L, Bauer B S, Fedin D A, Ouart N, Kazantsev S A, Petrashen A G, Safronova U I 2001 *Rev. Sci. Instrum* **72** 1241
- [9] Ye F, Guo C, Li Z H, Xu R K, Qin Y, Xue F B 2008 *High Power Laser and Particle Beams.* **20** 383 (in Chinese) [叶凡, 郭存, 李正宏, 杨建伦, 徐荣昆, 秦义, 薛飞彪 2008 强激光与粒子束 **20** 383]
- [10] Duan B, Wu Z Q, Yan J, Li Y M, Wang J G 2007 *J. At. Mol. Sci.* **24** 1 (in Chinese) [段斌, 吴泽清, 颜君, 李月明, 王建国 2007 原子与分子物理学报 **24** 1]
- [11] Duan B, Wu Z Q, Wang J G 2009 *Science in China (Series G: Physics, Mechanics & Astronomy).* **39** 43 (in Chinese) [段斌, 吴泽清, 王建国 2009 中国科学 (G辑: 物理学力学天文学) **39** 43]
- [12] Ding Y N, Meng G W, Wang Y, Xu Y, Yan J, Yang G H, Yang J M, Zhang J Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 985 (in Chinese) [丁耀南, 孟广为, 汪艳, 许琰, 颜君, 杨国洪, 杨家敏, 张继彦 2008 物理学报 **57** 985]
- [13] Hutchinson I H 2002 *Principles of Plasma Diagnostics* (UK: Cambridge University Press) 186–201
- [14] Griem H R 1964 *Plasma spectroscopy* (New York: McGraw-Hill Book Company) 114–235
- [15] Gao Q, Wu Z Q, Zhang C F, Li Z H, Xu R K, Zu X T 2012 *Science in China (Series G: Physics, Mechanics & Astronomy)* **42** 385 (in Chinese) [高启, 吴泽清, 张传飞, 李正宏, 徐荣昆, 祖小涛 2012 中国科学 (G辑: 物理学力学天文学) **42** 385]
- [16] Gao Q, Wu Z Q, Zhang C F, Li Z H, Xu R K, Zu X T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 015201 (in Chinese) [高启, 吴泽清, 张传飞, 李正宏, 徐荣昆, 祖小涛 2012 物理学报 **61** 015201]
- [17] Gu M F 2003 *ApJ* **582** 1241

## Separating the Z-pinch plasma X-ray radiation and attaining the electron temperature\*

Gao Qi<sup>1)†</sup> Zhang Chuan-Fei<sup>2)</sup> Zhou Lin<sup>2)</sup> Li Zheng-Hong<sup>2)</sup> Wu Ze-Qing<sup>3)</sup> Lei Yu<sup>1)</sup>  
Zhang Chun-Lai<sup>1)</sup> Zu Xiao-Tao<sup>1)</sup>

1) (University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

2) (Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang 621900, China)

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

( Received 16 September 2013; revised manuscript received 17 January 2014 )

### Abstract

According to the experimental results of spectrum diagnosis made on Qiang-Guang-I generator, we report a method to separate and diagnose Z-pinch plasma radiation spectrum. Spectral lines and different continuums are separated from experimental results and electron temperatures can be acquired. Results show that continuums are superposed by radiation of high electron temperature plasma at the centre field ( $T_e = 290.7 \text{ eV} \pm 1.2 \text{ eV}$ ) and radiation of lower electron temperature plasma at shell region ( $T_e = 95.3 \text{ eV} \pm 8.3 \text{ eV}$ ). Spectral lines reflect the information of high electron temperature plasma at the centre field. According to the calculation by using NLTE model, the electron temperature of such a plasma is in the range of 299–313 eV. The diagnose result by spectral lines is identical with the continuum's results.

**Keywords:** Z-pinch, spectrum separation, spectrum diagnose, electron temperature

**PACS:** 52.25.jm, 52.25.Os, 32.70.-n

**DOI:** 10.7498/aps.63.095201

\* Project supported financially by the NSAF Joint Foundation of China (Grant No. U1230124).

† Corresponding author. E-mail: fbc1980@163.com