# Z箍缩Al等离子体X辐射谱线的分离及 电子温度的提取<sup>\*</sup>

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>

(电子科技大学物理电子学院,成都 610054)
 (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.

<sup>\*</sup> 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.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: fbc1980@163.com

<sup>© 2014</sup> 中国物理学会 Chinese Physical Society

#### 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<sup>1</sup>2p<sup>2</sup>  $\rightarrow$  1s<sup>2</sup>2p<sup>1</sup>跃迁 (峰值位于 1.577 keV) 和类 Li 1s<sup>1</sup>2p<sup>2</sup>  $\rightarrow$  1s<sup>2</sup>2p<sup>1</sup>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<sup>2</sup>  $\rightarrow$  1s<sup>1</sup>2p<sup>1</sup> 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v光子能量)可以写 成<sup>[13,14]</sup>

$$\varepsilon(v) = n_{e} n_{i} Z^{2} \left(\frac{e^{2}}{4\pi\varepsilon_{0}}\right)^{3} \frac{8\pi}{3\sqrt{3}m_{e}^{2}c^{3}} \times \left(\frac{2m}{\pi T_{e}}\right) e^{\frac{-hv}{T_{e}}} \overline{g}_{\rm ff}, \qquad (1)$$

其中,  $n_e$  为等离子体电子数密度,  $n_i$  为i阶离化态 离子数密度, 参数 $\bar{g}_{\rm ff}$ 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>

$$\varepsilon(v) = n_{\rm e} n_i Z^2 \left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)^3 \frac{8\pi}{3\sqrt{3}m_{\rm e}^2 c^3} \left(\frac{2m_{\rm e}}{\pi T_{\rm e}}\right) \\ \times e^{\frac{-hv}{T_{\rm e}}} \left[\frac{Z^2 R_y}{T_{\rm e}} \frac{2}{n^3} G_n e^{\frac{Z^2 R_y}{n^2 T_{\rm e}}}\right], \qquad (2)$$

其中,  $R_y = \frac{m_e}{2} \left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar}\right)^2 = 13.6 \text{ eV}, 为 \text{Rydberg}$ 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  $\frac{Z^2R_y}{n^2}$ .此时,总的连续辐射能量可以写成<sup>[13,14]</sup>

$$\varepsilon(v) = n_{e}n_{i}Z^{2} \left(\frac{e^{2}}{4\pi\varepsilon_{0}}\right)^{3} \frac{8\pi}{3\sqrt{3}m_{e}^{2}c^{3}} \left(\frac{2m}{\pi T_{e}}\right)$$
$$\times e^{\frac{-hv}{T_{e}}} \left[\overline{g}_{ff} + G_{n}\frac{\xi}{n^{3}}\frac{\chi_{i}}{T_{e}}e^{\frac{\chi_{i}}{T_{e}}}\right]$$
$$+ \sum_{v=n+1}^{\infty}G_{v}\frac{Z^{2}R_{y}}{T_{e}}\frac{2}{n^{3}}G_{n}e^{\frac{Z^{2}R_{y}}{n^{2}T_{e}}}, \qquad (3)$$

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  $hv \ge Z^2 R_y/n^2, G_n = 1; hv < Z^2 R_y/n^2, G_n = 0.$  对上式两边同时取自然对数,显然有

$$\ln\left(\varepsilon\left(v\right)\right) \propto -\frac{hv}{T_{\rm e}}.\tag{4}$$

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1s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 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 率只与等离子体电子温度有关. 3.2 实验测量结果 特征辐射线谱与连续谱的分离过程实际就是利用 这一关系进行数据拟合,逐步扣除连续谱的影响, 从而得到单纯的线谱的过程.利用连续谱提取等 离子体电子温度的过程和分离过程完全相同,这 里不再赘述,只列出最终得到的电子温度结果,如 表1所示.

表1 连续谱诊断结果

能量范围/keV	等离子体电子温度/eV
1.4—2.0	$95.3\pm8.3$
2.0 - 2.8	$290.7 \pm 1.2$

从拟合结果来看,实验测量得到的连续谱线反映了等离子体中心高温区域和壳层较低温度等离子体状态信息.低能区域等离子体主要反映了处于外围壳层、电子温度较低的等离子体连续谱辐射,高能区域则主要是等离子体中心高温区域辐射的贡献.分离后,得到高温区域等离子体平均电子温度为290.7 eV ± 1.2 eV,壳层等离子体平均电子温度为95.3 eV ± 8.3 eV.

#### 4.2 从特征线谱提取等离子体电子温度

实验测量谱比较强的特征谱线已在图1中进 行了标注.其中Ly  $\alpha$ 和其伴线的包络分的比较清 楚,而He  $\alpha$ 与其伴线则混合在在一起,要进行区 分,有一定的难度.因此,在提取特征谱线跃迁相 对强度比时,将He  $\alpha$ 及其伴线作为一个整体,Ly  $\alpha$ 可以单独提取.根据理论计算结果提取相对强度 比时,采用同样的方法处理.根据实验谱提取的 Ly  $\alpha/(\text{He }\alpha + \text{IC}) = 0.23 \pm 0.01$ ,其他的特征谱线 较弱,诊断结果误差可能比较大,因此没有提取相 关跃迁相对强度比.

根据在"强光一号"装置上的测量结果和文献 [15,16]分析讨论结果. 在箍缩产生的高温稠密等 离子体直径约2 mm,但电子温度梯度和电子密度 梯度非常大,以至于大体上可以将等离子体区域分 成沿径向中心部分具有极高温度和密度的"core" 层和外部温度密度较低的"shell"层两部分."core" 层等离子体的尺寸远小于"shell"层等离子体,在百 微米量级<sup>[16]</sup>. Z箍缩产生K壳层类H,类He的线 辐射主要集中在在滞止状态的"core"层等离子体 区域.

基于此,本文理论计算采用基于细致能级的 非局域平衡模型,等离子体的有效厚度取为200 μm<sup>[15,16]</sup>. 所需原子结构和过程参数采用FAC程 序<sup>[17]</sup> 计算.

图 5 是理论计算的跃迁强度比随等离子体电子温度和电子密度变化曲线,等离子体电子密度 由叶凡等根据箍缩前后体积的变化估算,约为  $2.0 \times 10^{21}$  cm<sup>-3</sup>.以此为参考,取电子密度区间为  $1.0 \times 10^{21}$  cm<sup>-3</sup>— $5.0 \times 10^{21}$  cm<sup>-3</sup>,则对应的电子 温度范围约为299—313 eV;对应于 $2.0 \times 10^{21}$  cm<sup>-3</sup> 的电子密度,得等离子体电子温度约为310 eV,与 连续谱诊断结果基本符合.



图5 (网刊彩色) Ly  $\alpha$ /(He  $\alpha$  + IC) 跃迁相对强度比

### 5 结 论

本文利用"强光一号"10174 发次光谱诊断实验 结果,从实验测量谱中提取了不同组分连续辐射谱 和特征辐射线谱,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及状态信息.结果显 示:等离子体连续谱主要由等离子体中心的高温 区域 ( $T_e = 290.7 \text{ eV} \pm 1.2 \text{ eV}$ )和温度较低的壳层 区域 ( $T_e = 95.3 \text{ eV} \pm 8.3 \text{ eV}$ )两部分辐射叠加而 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 NLTE 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.

#### 参考文献

- Keane C J, Lee R W, Hammel B A, Osterheld A L, Suter L J, Calisti A, Khelfaoui F, Stamm R, Talin B 1990 *Rev. Sci. Instrum.* 61 2780
- [2] Liang G Y, Bian X, Zhao G 2004 Chin. Phys. 13 891
- [3] Li Y Q, Yuan J M, Wu J H 2008 Chin. Phys. Lett. 25 3627
- [4] Yuan J M 2002 Chin. Phys. Lett. 19 1459
- [5] Liu S B, Hu Q L 2006 Chin. Phys. 15 2357

- [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, Zang 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<sup>\*</sup>

Gao  $Qi^{1}$ <sup>†</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

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

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: fbc1980@163.com