

等离子体离子温度和角向旋转速度的测量

徐伟¹ 万宝年²

(1 广州师范学院物理系, 广州, 510400)

(2 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥1126信箱, 230031)

摘要 利用多道光学分析仪测量了HT-6M托卡马克CV227.1nm谱线线形分布, 通过选点拟合得到了等离子体离子温度和旋转速度。

关键词 弦平均的线形分布 高斯拟合 离子温度 旋转速度

中图分类号 O536; TL651

TL65

等离子体 托卡马克

一般的光电探测仪器测量的光谱信号是时间和空间的积分量, 信号必须通过特殊的处理才能得出局域的信息。对线积分的光谱信号处理方法主要有阿贝尔变换^[1]和环带拟合^[2], 前者要求具有足够的空间道数, 而且空间各道必须是具有足够精度的绝对测量; 本文采用一种类似环带拟合的方法, 从弦积分的线形分布中得到了等离子体离子温度和旋转速度。

1 实验安排

实验安排如图1所示。在光纤头D₁和D₂上沿竖直方向分别排列着五道石英光纤束, 通过透镜将限制器上半部表面附近的等离子体的像成于D₁和D₂上, D₁的观测方向几乎垂直于限制器的表面, D₂观测方向与限制器的表面的夹角在45°左右。光纤头D₀是单道光纤, 作标定用。D₀、D₁和D₂通过35m光纤有序地排列在光纤头D上, 再通过透镜将D的像成于可见光学多道分析仪(OSMA)的单色仪入射狭缝上。单色仪装配三块光栅, 实验中我们用的光栅是3600/mm的闪耀光栅, 对应的增强型面阵电荷藕合器件(578pixel×384pixel)谱分辨率为0.0057nm/pixel。

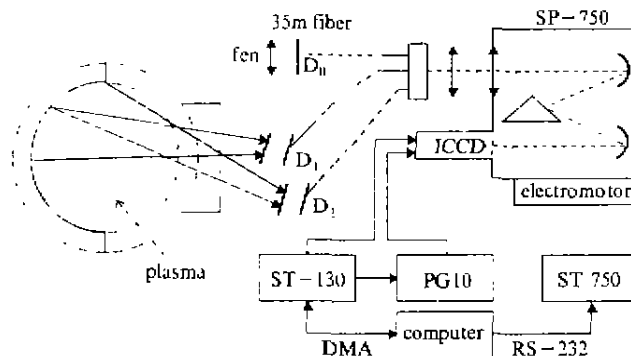


Fig. 1 Experiment arrangement

图1 实验安排

- 联合国世界实验室资助课题
1998年4月27日收到原稿, 1998年11月23日收到修改稿。
徐伟, 1964年7月出生, 博士, 副教授

2 弦平均的线形分布和高斯拟合

等离子体光谱线加宽主要有塞曼效应,斯塔克效应和多普勒效应,其中多普勒展宽占绝对优势,其它几种加宽可以忽略.仅考虑多普勒效应,测量出谱线弦积分的分布,由谱线的半高全宽得出辐射粒子的离子温度,由多普勒频移得出辐射粒子的旋转速度.但实际上辐射粒子的密度具有一定的径向分布,辐射分布也是随径向位置变化而变化的温度和速度的函数,因此沿某一方向测量的谱线分布是加权积分的结果,显然具有最强辐射和最高温度的那部分弦在积分中占的权重最大.

弦积分的强度分布 I 可表示为:

$$I(\lambda, r_T) = \int_0^l \frac{\epsilon(r)}{\sqrt{\pi} \Delta\lambda_D(r)} \exp\left\{-\frac{[\lambda - \lambda_c(1 - \frac{v(r)}{c} \cos\alpha(r, r_T))]^2}{\Delta\lambda_D^2(r)}\right\} dl \quad (1)$$

式中: l 是弦长, $\epsilon(r)$ 为谱线的发射系数, $v(r)$ 是 r 处辐射粒子的整体漂移速度(旋转速度), $\Delta\lambda_D(r) = (\lambda_0/c)[2kT(r)/m]^{1/2}$, $T(r)$ 是距等离子体中心 r 处的离子温度, r_T 是等离子体中心到弦的垂直距离. $\alpha(r, r_T)$ 是旋转速度方向与 r_T 之间的夹角. λ_c 是没有多普勒频移的谱线标准中心波长.对于圆形小截面的托卡马克:

$$\left. \begin{aligned} \alpha(r, r_T) &= \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{r_T}{r}\right) = \arccos\left(\frac{r_T}{r}\right) \\ r &= \sqrt{l^2 - r_T^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将上面的式子代入(1)式中:

$$I(\lambda, r_T) = \int_{-\sqrt{a^2-r_T^2}}^{\sqrt{a^2-r_T^2}} \frac{\epsilon(r)}{\sqrt{\pi} \Delta\lambda_D(r)} \exp\left\{-\frac{[\lambda - \lambda_c(1 - \frac{v(r)}{c} \cos\alpha(r, r_T))]^2}{\Delta\lambda_D^2(r)}\right\} dl \quad (3)$$

式中 a 为等离子体小半径.从(3)式可以看出,加权积分结果是由谱线的发射系数和多普勒展宽共同决定谱线的总亮度.谱线的线型分布则依赖于多普勒展宽、沿观测方向的发射粒子的旋转速度以及速度方向与观测方向之间的夹角 $\alpha(r, r_T)$.

对于用高斯拟合的谱线强度应是:

$$I(\lambda, r_T) = b(r_T) \exp\left\{-\frac{[\lambda - \lambda_c(r_T)]^2}{\Delta\lambda_D^2(r_T)}\right\} = b(r_T) \exp\left\{-\frac{[\lambda - \lambda_c(1 - \frac{\langle v(r_T) \rangle}{c})]^2}{\Delta\lambda_D^2(r_T)}\right\} \quad (4)$$

上式表明拟合结果是由弦的亮度分布 $b(r_T)$ 、相对的中心波长 $\Delta\lambda_c(r_T)$ 以及多普勒展宽 $\Delta\lambda_D(r_T)$ 共同决定,式中的旋转速度 $\langle v(r_T) \rangle = c(\lambda_c(r_T) - \lambda_c)/\lambda_D$, 辐射粒子的离子温度即可由 $\Delta\lambda_D(r_T)$ 求得.因此虽然(3)式和(4)式存在一定的差异,但并不要求具体求解,只需拟合出线型分布就能得出辐射粒子的旋转速度和温度,但问题是怎样得出空间某一点旋转速度和离子温度.

3 选点拟合

这种拟合方法基本思想与环带拟合类似.见图 2. T_i 为距等离子体中心为 r_i 处的离子温度, $\langle T_i \rangle$ ($i = 1, 2, 3$) 为由高斯拟合得出的离子温度.测量线平均的谱线分布,通过自己环带的那部分弦在积分中具有较大的权重,将构成谱线分布的两翼,而外面的环带由于温度较低,对谱线分布的贡献主要是峰部,因此我们可以通过选取一些点参与运算,舍弃一些点不参

与运算,以提高弦上自己环带部分的权重。处理上就是从谱线分布的峰部开始,有序地去点,当弃至高斯分布的三个基本参量谱线的半高全宽,谱线的中心波长和强度基本保持不变时,那么可以认为此时的离子温度和旋转速度就是该环带对应的等离子体离子温度和角向旋转速度。

这种拟合方法适合处理辐射分布峰值较靠近等离子体中心的谱线,而对于辐射峰靠边界的谱线则明显不能得出中心离子温度。这种拟合方法还要求,谱线的谱分辨率要高,否则任意一个点在积分中的权重都不能舍弃。

4 处理结果

图 3 中的 raw data 是利用光学多道分析仪(OSMA)系统测量的 CV227.1nm 谱线的线型分布。等离子体的基本参数:电子密度为 $1.3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$,中心电子温度为 500eV,放电电流 55kA。图中纵坐标为计数,从图中下半部分单高斯拟合的剩余量(residual)可以看出,两远翼有非随机的剩余量,几乎呈高斯型,这表明弦积分的线型分布确实包含不同“环带”的贡献。

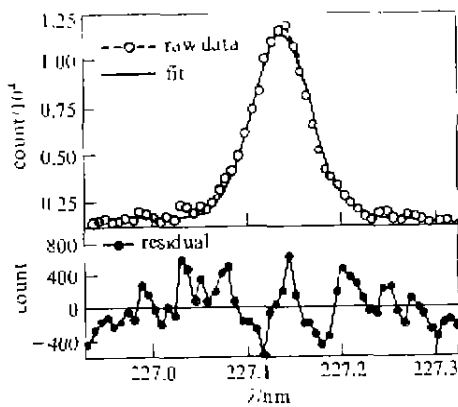


Fig. 3 Single Gaussian fitting of CV line
图 3 CV 谱线单高斯拟合

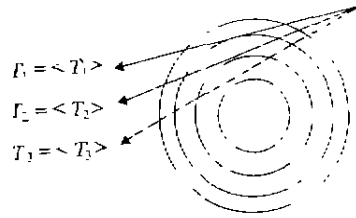


Fig. 2 Train of think of chosen-fitting
图 2 选点拟合思路

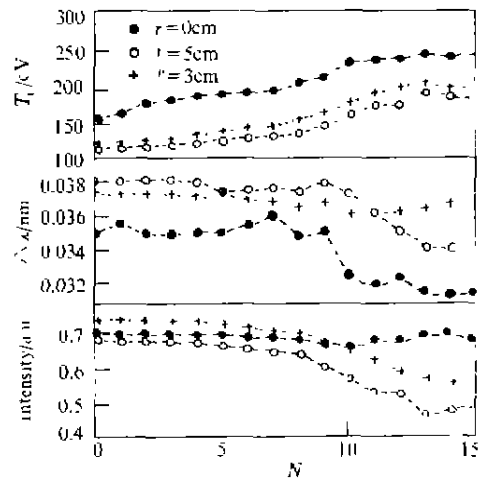


Fig. 4 Three-parameters of Gaussian fit
图 4 高斯分布的三个参数随去点数(N)的变化

下面利用选点拟合上面的线型。基本步骤是从高斯分布的顶端开始,有序地去点,每去一个点用高斯分布拟合一次,统计高斯分布的三个参量,谱线分布的半高全宽,多谱勒频移和线型分布的面积随去点数的变化。图 4 是由半高全宽得出的离子温度,中心波长和谱线面积随去点数(N)的变化。

当去掉 11 个点时,高斯分布的三个参量基本保持不变,这时的拟合结果见图 5。从剩余量的分布可以看出,远翼剩余量基本随机起伏,中部区域去掉的点,也就是剩余量也是一个非常好的高斯分布。这时中心弦得出的离子温度为 240eV, $r=3\text{cm}$ 和 $r=5\text{cm}$ 两条弦对应的离子温度分别为 200eV 和 180eV,假定 $r=0$ 处等离子体角向旋转速度为零,那么由多谱勒频移得 $r=5\text{cm}$ 处,等离子体旋转速度为 $2 \pm 0.5 \text{km/s}$ 。

5 讨论

选点拟合各条弦给出的结果不相互干扰,也不依赖于空间道数,拟合出的等离子体中心离子温度同中性粒子能谱测出的离子温度(230eV)相当,统计不同的实验结果误差不超过20%,这对托卡马克等离子体而言是有意义的,因为其他的测量手段精度一般为30%。

选点拟合给出的结果稍偏大。因为从高斯分布的顶端开始去点,这些点代表的是低能成份,去掉了低能成份对线型分布的贡献,相对而言增加了高能成份在弦积分中的权重,虽然这些点主要反映的是边界环带的信息,但或多或少也包含自己弦低能的成份,因此从理论上讲选点拟合得出的等离子体离子温度会偏高。

选点拟合还要求测量的谱线的辐射离子的空间分布的峰值位置越靠近等离子体中心越好,因为这样的分布才会随去点数的增加,自己的环带在弦积分中的权重才会增加。因此测量谱线要选高电离态的谱线。

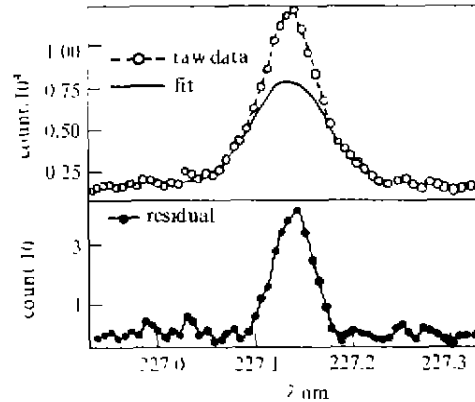


Fig. 5 The result of chosen-fitting

图5 选点拟合结果

参考文献

- 1 Ida K and Hidekuma S. *Rev Sci Instrum*, 1989, **60**:867
- 2 Meiges A G, Rowan W L, et al. *Rev Sci Instrum*, 1990, **61**:2952

MEASUREMENT OF PLASMA ION TEMPERATURE AND ROTATION VELOCITY

Xu Wei¹ Wan Baonian²

1. Department of Physics, Guang Zhou Normal University, Guang Zhou, 510400

2. Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei, 230031

ABSTRACT The CV (at 227.1nm) line has been measured with Optical Spectroscopy Multichannel Analysis. The local ion temperature and rotation velocity has been derived using a chosen-point fitting technique.

KEY WORDS chord-averaged line profile, Gaussian fitting, ion temperature, rotation velocity