

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0011-03

HL-1M 托卡马克的激光散射测量电子温度的相对论修正

冯洁¹, 黄渊², 施佩兰², 邓中朝²

(¹ 复旦大学应用离子束物理实验室, 上海 200433; ² 核工业部西南物理研究院, 四川 成都 610041)

摘要 简要介绍了 HL-1M 托卡马克上用激光汤姆逊散射测量等离子体电子温度的方法, 阐述了相对论蓝移的原理和数据处理的方法, 给出了 HL-1M 托卡马克上电子温度相对论修正的估算公式。散射谱中心频率蓝移量近似和电子温度成正比, 在电子温度只有几百 eV 的情况下, 散射谱中心蓝移较小, 当电子温度达几千 eV 的情况下, 散射谱中心蓝移较大。电子温度的误差与电子温度的 4 次方成正比, 在电子温度较高即 1 keV 以上时, 不考虑相对论效应会造成测量的结果有较大的误差, 误差有时达到 100~200 eV。而在电子温度较低即只有几百 eV 时, 不考虑相对论效应只对结果造成较小误差, 一般只有 5~60 eV。

关键词 精密工程测量; 相对论蓝移; 电子温度; 汤姆逊散射

中图分类号 TL65.3

文献标识码 A

Relativistic Modification of the Measurement of Electron Temperature in HL-1M Tokamak by Laser Scattering

FENG Jie¹, HUANG Yuan², SHI Pei-lan², DENG Zhong-chao²

(¹ Applied Ion Beam Physics Lab., Fudan University, Shanghai 200433, China)
(² Southwestern Institute of Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract This article briefly describes the measurement of electron temperature in HL-1M Tokamak plasma and the way of relativistic modification due to blue shift in the case of higher electron temperature. A simple formula to calculate electron temperature is given under the condition that relativistic modification is taken into account on HL-1M Tokamak. The blueshift is approximately proportional to the electron temperature. When electron temperature is hundreds of eV, the blueshift is small, when electron temperature is thousands of eV, the blueshift is great. The error of electron temperature is proportional to electron temperature to the fourth power. When electron temperature is higher than 1 keV, the error is great than that of not taking into account relativistic effect, it is about 100~200 eV. When electron temperature is below 1 keV, the error is smaller than that of not taking into account relativistic effect, it is about 5~60 eV.

Key words precision engineering measurement; relativistic blueshift; electron temperature; Thomson scattering

1 引言

激光非相干散射是测量托卡马克等离子体电子温度的一种标准方法^[1]。对汤姆逊散射诊断而言, 在诸多影响测量精度的因素中, 相对论效应在高温等离子体中起着很大作用, 若不考虑频率的相对论蓝移, 会造成较大的测量误差。本文从电磁场散射理论出发对汤姆逊散射法测量电子温度的相对论修正进行了研究, 并运用于 HL-1M 托卡马克等离子体的电子温度。

2 原理

在等离子体电子温度只有几百电子伏时, 高斯

分布的汤姆逊散射谱形状因子 $S(\Delta\lambda)$ 为^[2]

$$S(\Delta\lambda) = \frac{\lambda_0 \exp[-m_e c^2 \Delta\lambda / 8\lambda_0^2 k T_e \sin^2(\theta/2)]}{4\pi^{3/2} (2kT_e / m_e)^{1/2} \sin(\theta/2)} \quad (1)$$

式中 λ_0 为入射激光的波长 (nm), 散射角 $\theta=90^\circ$, kT_e , $m_e c^2$ 的单位为 eV, $\Delta\lambda$ 为散射波长与入射波长之差。谱强度 e^{-1} 处的波长差为^[2]

$$\Delta\lambda = 2\lambda_0 (2kT_e / m_e c^2)^{1/2} \sin(\theta/2) \quad (2)$$

在 HL-1M 托卡马克汤姆逊散射实验中, 由于散射谱为高斯对称分布, 通常测量在长波方向上五个点的光谱强度, 然后拟合出汤姆逊散射谱形状因子 $S(\Delta\lambda)$, 求出 e^{-1} 处的波长差 $\Delta\lambda$, 再用 (2) 式求出电子温度。

当 HL-1M 托卡马克产生的等离子体电子温度

高于 1 keV 时,用(2)式求出的电子温度有一定误差,测量出的电子温度偏低,需要进行相对论修正。经过相对论修正后,汤姆逊散射谱形状因子 $S(\Delta\lambda)$ 变为^[3,4]:

$$S'(x) = \frac{An_e}{\sin(\theta/2)\sqrt{T_e}} [1 - 3.5x + 7.6x^2 - 13.3x^3] \times \exp\left[-x^2 \frac{B}{\sin^2(\theta/2)T_e} (1-x)\right] \quad (3)$$

其中,对于一定的散射角 θ , A 和 B 都是常数,且对于 $\theta=90^\circ$ 时, $A=2.43 \times 10^{-2}$, $B=6.4 \times 10^4$, $x=(\lambda_s-\lambda_0)/\lambda_0$ 。

3 蓝移原因及计算

在静止坐标系中,以相对论速度运动电子在它运动的方向优先辐射,这意味着接收到朝接收器方

向运动电子的散射强度大于反接收器方向运动电子的散射强度,朝接收器方向运动电子的散射,由于多普勒效应频率蓝移,散射谱的最大值与原高斯分布极值相比朝短波方向频移,即产生蓝移。特别对于只测量入射频率谱的高频一侧,如果不考虑相对论蓝移,则过高地估计光谱的宽度以及电子温度;反之,单侧红谱的测量将会过低地估计光谱的宽度以及电子温度。对于电子温度超过 1 keV 的等离子体来说,蓝移很重要,必须进行相对论修正。在不同的电子温度时,考虑了相对论修正的汤姆逊散射谱形状因子如图 1 所示。从图 1 可以看出,随温度的升高,谱形状畸变越来越大,在不同电子温度时散射谱极大值蓝移的具体数值可如下计算。对(3)求导,令 $dS'/dx=0$, 并整理得如下方程

$$\frac{2.56 \times 10^6 x - 1.28 \times 10^6 x^2 + 3.29 \times 10^6 x^3 - 6.32 \times 10^6 x^4 + 5.1 \times 10^5 x^5}{T_e} = -39.9x^2 - 15.2x + 3.5 \quad (4)$$

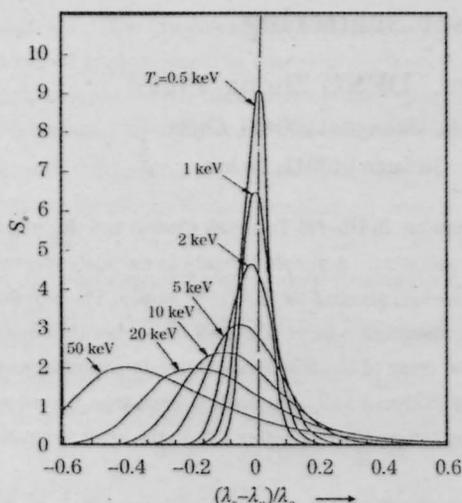


图 1 不同电子温度时电子的汤姆逊散射谱
Fig.1 Thomson scattered spectrum at different electron temperature

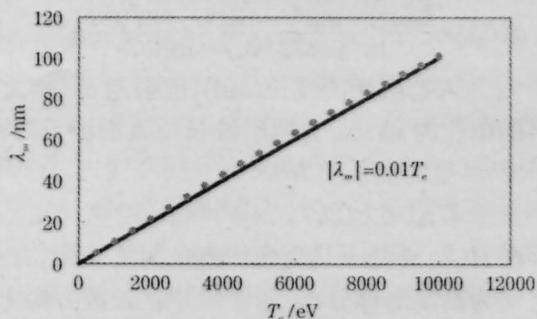


图 2 不同温度时的蓝移量
Fig.2 Quantity of blue shift at different temperature

可得到不同温度时波峰朝短波方向移动的距离

$$\Delta\lambda_m \approx -0.01T_e - 2.9 \times 10^{-5} T_e^{3/2} + 2.8 \times 10^{-7} T_e^2 \quad (5)$$

这里 $\Delta\lambda_m$ 的单位是 nm, T_e 的单位是 eV, 结果如图 2 所示, $\Delta\lambda_m$ 与 T_e 近似成正比关系。

表 1 考虑蓝移和不考虑蓝移两种情况下的电子温度比较
Table 1 Comparison of electron temperature under blue shift is taken into account or not

No.	not consider	consider	$(T'_e - T_e) / eV$	$(T'_e - T_e) / T_e / \%$
	relativity T_e / eV	relativity T'_e / eV		
1#	517	525	8	1.5
2#	613	618	5	0.8
3#	702	724	22	3.0
4#	852	912	60	6.6
5#	920	991	71	7.2
6#	1029	1143	114	9.97
7#	1130	1325	195	14.7

4 实验布局

HL1-M 上的激光散射诊断系统构造如图 3 所示^[5,6],有激光光源、入射与出射光路及真空部分,多道谱仪,散射信号接收系统,数据采集及控制线路。激光器是波长为 1064 nm 的钕玻璃激光器,入射激光波长是其倍频光(530 nm),散射角为 90° ,散射光由谱仪分光,光电倍增管接收,谱通道为五道,可测五个空间点。

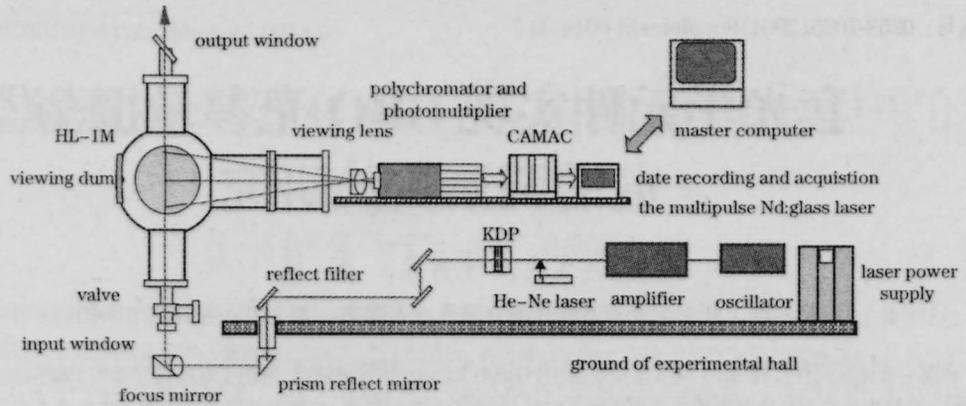


图3 HL-1M 装置多脉冲钕玻璃激光散射光路系统布局

Fig.3 Schematic diagram of multi-pulse Thomson scattering system with Nd glass laser on the HL-1M tokamak

5 测量结果

在 HL-1M 装置上的汤姆逊散射实验中, 在考虑蓝移和不考虑蓝移两种情况下, 对同一次放电所得的电子温度进行了比较, 表 1 给出 7 次放电的结果。图 4 可以直观地看出在不同温度下, 相对论效应导致的电子温度测量的误差。

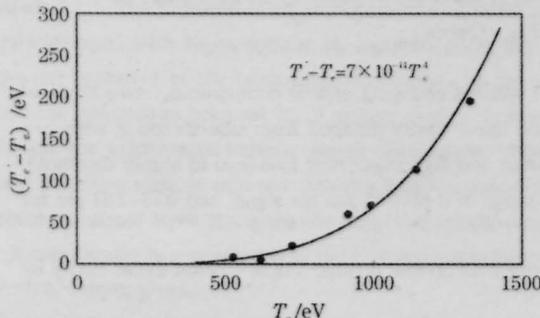


图4 相对论效应导致的电子温度测量误差随电子温度的变化曲线

Fig.4 Curve of error of measured electron temperature induced by relativistic effect

6 讨论

在不考虑相对论修正的情况下, 用激光汤姆逊散射法测量等离子体电子温度时, 单侧蓝谱的测量所估计的光谱宽度偏大, 最终计算出的电子温度偏高; 反之, 单侧红谱的测量所估计的光谱宽度偏小, 最终计算出的电子温度偏低; 从图 2 可以看出, 在托卡马克等离子体电子温度的范围内, 散射谱中心蓝移大小和电子温度接近正比关系, 在电子温度只有几百电子伏的情况下, 散射谱中心蓝移较小, 当

电子温度达到几千电子伏的情况下, 散射谱中心蓝移较大。但是从图 4 和表 1 可以看出, 虽然随着电子温度的增大, 考虑蓝移和不考虑蓝移两种情况下测量的电子温度的误差有越来越大的趋势, $T_e' - T_e$ 可用函数

$$T_e' - T_e \cong 7 \times 10^{-11} T_e^4 \quad (6)$$

来表示, T_e' 的单位为 eV, 在 $T_e = 900$ eV 时, 相对误差是 5%。在电子温度较高即 1 keV 以上时, 不考虑相对论效应会造成测量的结果有较大的误差, 误差有时达到 100~200 eV。而在电子温度较低即只有几百电子伏时, 不考虑相对论效应只对结果造成较小误差, 一般只有 5~60 eV。

参考文献

- 1 Equipe TFR Nucl[J]. *Fusion*, 1978, 18:647
- 2 Feng Jie. *Laser Thomson Scattering Theory and Multi-Pulse Nd Glass Laser Scattering System on the HL-1M Tokamak* [D]. Chengdu: Southwest Institute of Physics, 2002
冯 洁. 激光汤姆逊散射及 HL-1M 装置多道倍频激光散射系统[D]. 成都: 核工业西南物理研究院, 2002
- 3 G. Brederlow et al. *Lidar Thomson Scattering Final Report*. IPP I/299, IPF 84/3, 1984
- 4 B. F. M. Potz, J. J. H. Coumans, D. C. Schram. *Phys. Fluids.*, 1981, 24(3):517
- 5 Deng Zhongchao, Shi Peilan, Liu Zetian et al. *Multi-pulse thomson scattering system with Nd glass laser on the HL-1M tokamak*[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2002, 22(1):37
邓中朝等. 装置多脉冲钕玻璃激光汤姆逊散射系统[J]. 核聚变与等离子体物理, 2002, 22(1):37
- 6 Feng Jie et al. *Laser Apparatus for Diagnosing Electron Temperature*[P]. Chinese Patent: ZL 00 2 29554 7, 2001-02-07
冯 洁等. 激光测温装置[P]. 中国专利: ZL00 2 29554 7, 2001-02-07