

球对称激光等离子体中的快离子膨胀

沈文达

(上海科学技术大学物理系)

朱蔚通

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

激光等离子体的快离子发射是激光聚变中具有特殊意义的研究课题之一。本文研究了球对称激光等离子体的快离子等温膨胀。对于 $u|_{\tau=0} = \frac{u_0 r}{r_0}$ 和 $\ln n|_{\tau=0} = -r^2/r_0^2 l^2$ 的初始条件, 导出了快离子密度和速度的解析表达式:

$$\ln n = -\frac{r^2}{r_0^2 l^2 y^2} - 3 \ln y \quad (1)$$

$$u = \frac{r \sqrt{u_0^2 + 4 \ln y / l^2}}{r_0 y} \quad (2)$$

$$\tau = l r_0 y \sqrt{\frac{l^2 u_0^2}{4} + \ln y} \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{\left[-\left(\frac{l^2 u_0^2}{2} + 2 \ln y \right) \right]^{\nu-1}}{(2\nu-1)!!} - \frac{l^2 r_0 u_0}{2} \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{\left(-\frac{l^2 u_0^2}{2} \right)^{\nu-1}}{(2\nu-1)!!} \quad (3)$$

其中 $u = u_r/c_0$, $n = N/N_0$, $\tau = c_0 t/\lambda$, $r = R/\lambda$, $l = R_L/\lambda$, $r_0 = R_0/\lambda$; 而 N_0 —恒定的电子密度, u_r —离子的径向速度, R —径向坐标, R_L —等离子体标度长度, R_0 —表征靶球尺寸的参数, λ —激光波长, $c_0 = (ZT_e/M)^{1/2}$ —声速。

从(3)式可知, 快离子的密度随 r 单调下降, 其密度分布随着时间的增长而渐趋平坦。快离子的速度正比于 r , 但它随 τ 的变化比较复杂。在早期, 即在 $y \sim 1$ 时, 速度 u 与 τ 成正比, 这与平面靶的结果相类似。然后, u 缓慢地增大, 并在 $\ln y = \left(\frac{2}{l^2} - u_0^2 \right) \frac{l^2}{4}$ 时达到极大值 u_{\max} 。

$$u_{\max} = r \sqrt{u_0^2 + 4 \ln y_{u_{\max}} / l^2} / r_0 y_{u_{\max}}$$

每个离子的能量 E 在 $u_0 = 0$ 和 $2 \ln y < 1$ 时为 $E \propto Z^2/M$, 这个能量定标律与实验结果一致。由此可见, 球靶与平面靶遵从同样的能量定标律, 所不同的是, 对于平面靶, 能量 E 正比于 R_L^{-2} , 对于球靶, E 正比于 R_L^{-4} 。此外, 对于后者, 能量还依赖于 R_0/λ 。这种差异主要是由两者的初始分布和靶的几何结构不同引起的。总的能量通量 I_E 和相应的峰值能量 E_{peak} 与等离子体的标度长度和离子的种类有关。因此, 可以用此理论结果解释实验中所观察到的快离子发射的行为。快离子信号的强烈调制是由同样的等离子体标度长度的离子不同电荷态引起的, 而能谱的多峰结构与同种离子电荷态的不同等离子体标度长度有关。