

2014 Autumn Semester, course for graduate student

Lecture notes: Physics of Laser-Plasma Interaction

VI. Parametric instabilities in underdense plasma (次临界密度等离子体中的参量不稳定性)

Bin Qiao

School of Physics

Peking University, Beijing, P. R. China

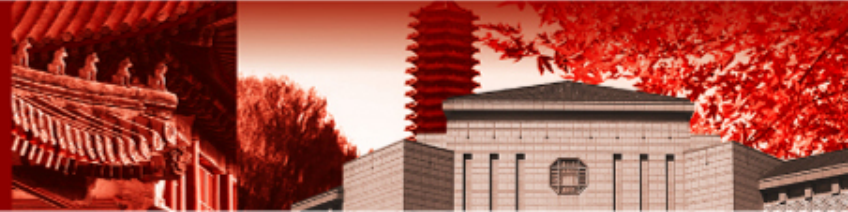
Email: bqiao@pku.edu.cn

Office: Room 544 (South), Physics Building

Tel: 62745005



北京大学



Coupling between laser and the plasma oscillators

表-1 激光等离子体中的主要相互作用过程

不稳定过程	能量守恒	发生区域	后果
共振吸收	$\omega_0 = \omega_{epw}$	$\sim n_{cr}$	超热电子
受激 Brillouin 散射	$\omega_0 = \omega_s + \omega_{isw}$	$< n_{cr}$	减少激光能量沉积
受激 Raman 散射	$\omega_0 = \omega_s + \omega_{epw}$	$\leq n_{cr} / 4$	超热电子, 减少激光能量沉积
双等离子体衰变	$\omega_0 = \omega_{epw} + \omega_{epw}$	$\sim n_{cr} / 4$	超热电子
离子声衰变	$\omega_0 = \omega_{isw} + \omega_{epw}$	$\sim n_{cr}$	超热电子

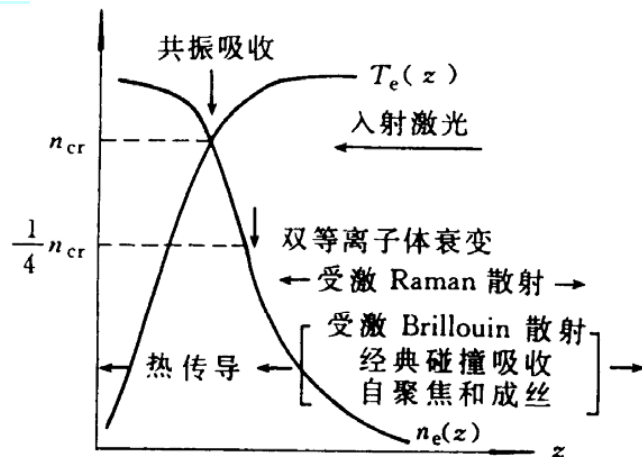


图 2.3 激光等离子体主要耦合过程发生的温度密度区

为了实现高增益靶丸内爆，必须最大限度地限制超热电子的产生。

$$\begin{aligned} \omega_l &= \omega_1 + \omega_2 \\ k_l &= k_1 + k_2 \end{aligned} \quad \text{Manley-Rowe 关系式}$$

激光强度: 10^{14} - 10^{16} W/cm²

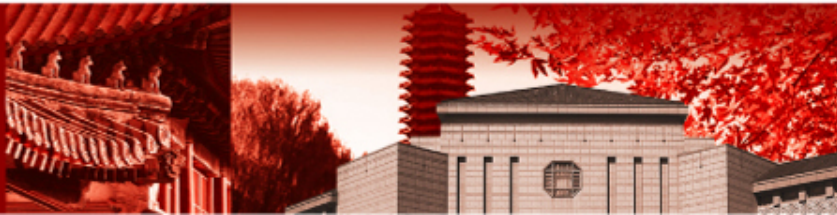
$$\omega_{ek}^2 = \omega_{pe}^2 + 3k_{ek}^2 v_e^2$$

$$\omega_0^2 = \omega_{pe}^2 + k_0^2 c^2$$

$$\omega_{is}^2 = k_{is}^2 C_s^2$$



北京大学



Outline

VI. 1 受激Raman散射

(Stimulated Raman Scattering)

VI. 2 双等离子体衰变

(Two Plasma Decay)

VI. 3 受激Brillouin散射

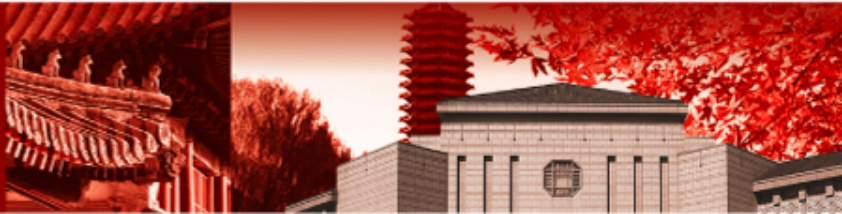
(Stimulated Brillouin Scattering)

VI. 4 激光的自聚焦与成丝不稳定性

(Self-focusing and filamentation instability)



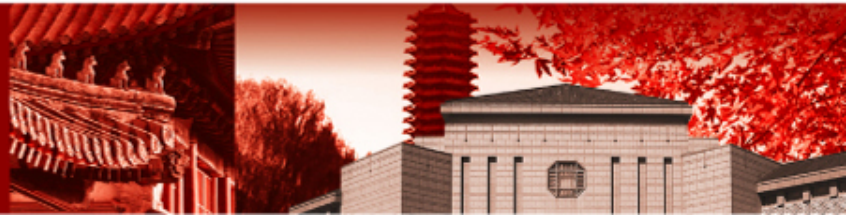
北京大学



VI.4 激光的自聚焦与成丝不稳定性 (Self-focusing and filamentation instability of laser)



北京大学



(1) 基本概念

激光自聚焦与成丝不稳定： 由于等离子体密度的扰动或激光非均匀性导致等离子体的折射率产生变化，等离子体密度低的地方折射率较高，激光波阵面弯曲，光束向折射率高的地方汇集，进一步使激光强度增高，等离子体密度降低。此正反馈过程将导致光束破裂、成丝。

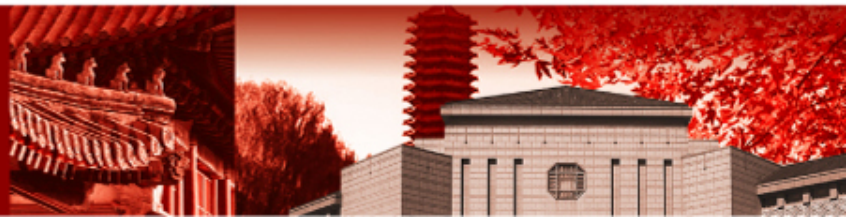
由于激光自聚焦，使得原本空间性质较好的激光束波长带有丝状结果的，强度高低的激光束。

激光在传播过程中，由于激光本身的空间不均匀性，或者由于等离子体具有空间不均匀性，结果都会导致激光强度在空间集中的现象：某些地方的激光强度大大高于它的平均值，产生激光的聚焦，相应地，这些地方的等离子体密度较低，等离子体被排除到激光强度偏低的地方。如果是整束激光聚焦称为自聚焦；更经常发生的是激光会被等离子体分割成一条一条的丝，称为成丝现象。

光束强度有一个小的热斑--→(有质动力, 碰撞吸收热扩散)--→密度变小--→折射指数变大--→激光传播的相速度减小--→激光波阵面扭曲--→激光强度增高--→密度进一步减小--》正反馈过程. 随着这种不稳定性的发展, 扰动的振幅不断增加, 最终引起光束破裂成丝。



北京大学



(1) 基本概念

后果： 某些局部激光强度的大大增强后

- 引入或增强等离子体其它不稳定性，影响激光能量在等离子体中的沉积；
- 将影响辐照均匀性，破坏内爆对称性；
- 增强自生磁场，影响电子能量传输。

波在等离子体中传播时都会有阻尼，电磁波具有电子碰撞引起的阻尼，Langmuir波除碰撞阻尼外还有无碰撞阻尼（Landau阻尼），离子声波也有类似的阻尼等。

一种不稳定性的发生必然要求激光强度高于相应的阈值，此时不稳定性发展的增长率才能大于几个子波耗散速率的乘积

$$\gamma_0^2 > \gamma_1 \gamma_2$$

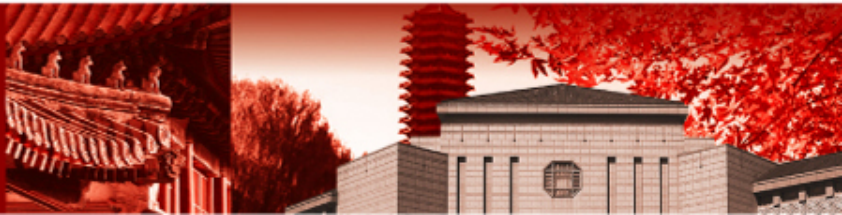
，即增长大于耗散。

激光发生自聚焦的功率阈值？？？（期中考试！）

$$P_{cr} = 16.2 \frac{n_c}{n_e} 10^9 \text{ W},$$



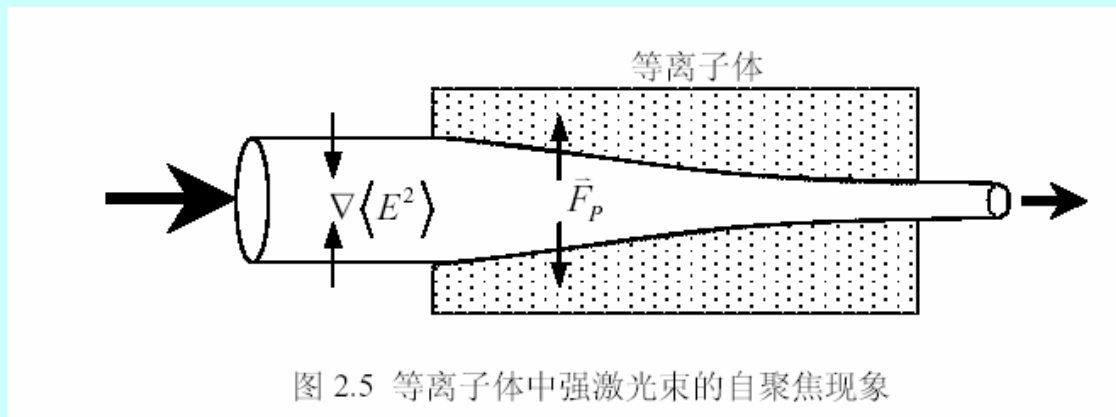
北京大学



(1) 基本概念

有质动力成丝:

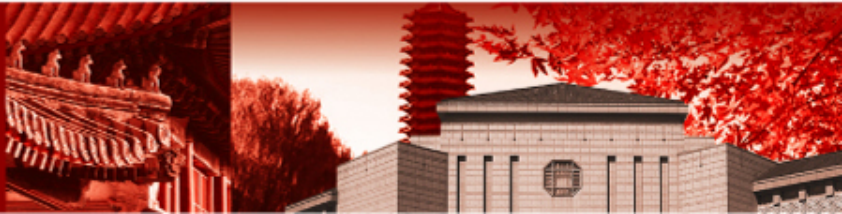
$$\vec{F}_p = -\frac{1}{4} \frac{e^2}{m_e \omega^2} \nabla \langle E^2 \rangle(\vec{x})$$



有质动力就是光压，正比于激光强度的空间梯度。激光强度的空间不均匀导致有质动力将等离子体向激光强度低的地方排除，而这又引起激光向低密度地方更多的折射从而形成正反馈的过程，不稳定性得到发展。



北京大学



(1) 基本概念

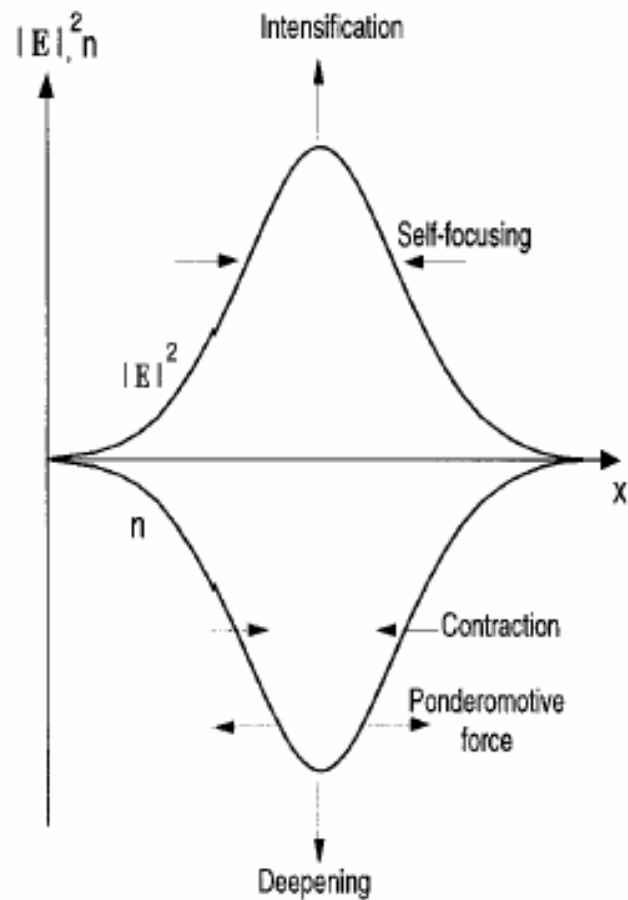
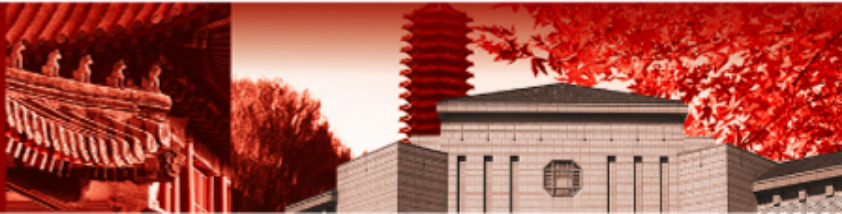


FIG. 9. Schematic of a collapsing Langmuir wave packet and its associated density well, indicating the self-focusing and intensification of the packet and the deepening and contraction of the density well caused by the ponderomotive force.



(1) 基本概念

相对论效应：

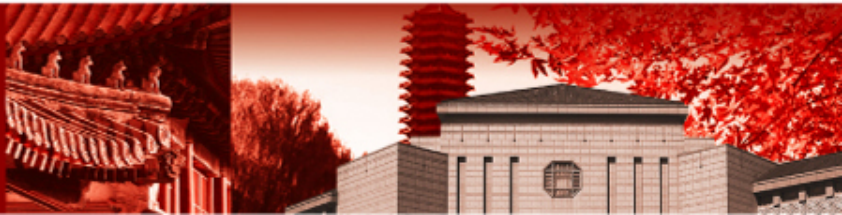
$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_{pe}^{rel2}}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\gamma \omega^2}, \quad \omega_{pe}^{rel2} = \frac{\omega_{pe}^2}{\gamma}$$

$$\gamma = (1 + I\lambda^2 / 1.37 \times 10^{18})^{1/2}$$

在激光强度很高的情况下，例如， $> 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 此时，由于电子在激光场中的振荡速度已进入相对论领域，电子质量增大而使等离子体的振荡频率降低 $\omega_p^2 = 4\pi n_e e^2 / m_0 \gamma$ 。结果，激光强度高的地方， γ 大，折射指数 $\sqrt{1 - (\omega_p^2 / \omega^2)}$ 也大，于是引起激光的折射集中，导致更高的激光强度而生成正反馈过程。



北京大学



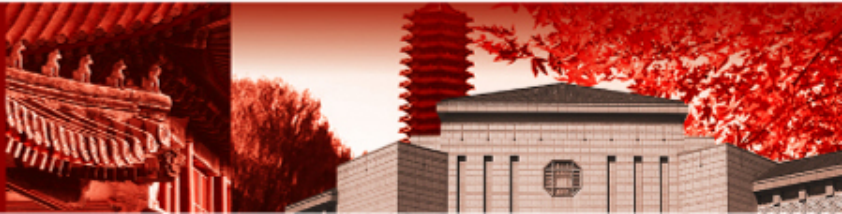
(1) 基本概念

热成丝：

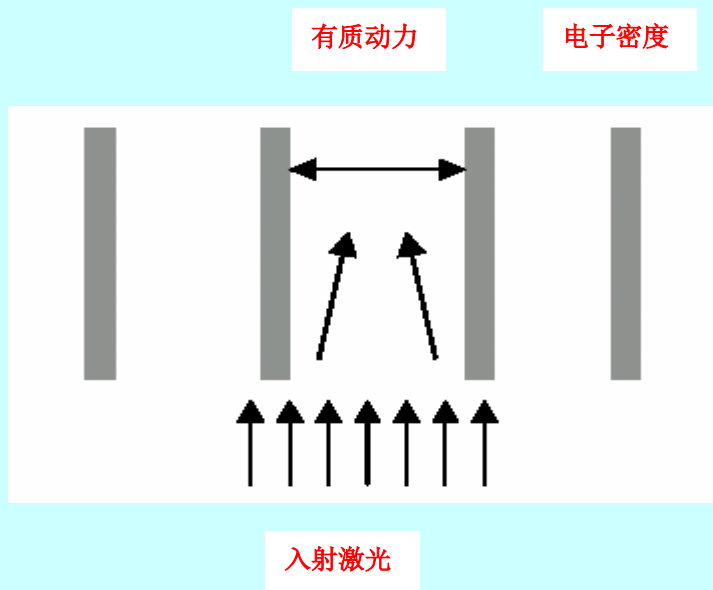
激光强度高的地方等离子体吸收的能量也多，温度就会升高，如果热传导不是足够快的话，就会形成压力差，等离子体膨胀，产生密度凹坑，引起激光能量的进一步聚集，导致等离子体运动向激光强度低的地方，又引起正反馈过程。



北京大学



(2) 有质动力成丝

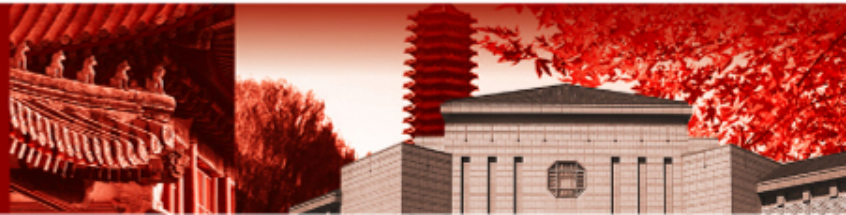


有质动力是一个准静态力，由它驱动的成丝不稳定是一慢变过程。事实上，如果成丝是一个快过程，有质动力将电子排开，离子因为质量大，无法响应，必然产生大的电荷分离，将电子重新拉回来。正因为有质动力成丝是一个慢过程，我们可以采用讨论**SBS**的色散关系分析成丝不稳定的增长率。

有质动力成丝示意图



北京大学



(2) 有质动力成丝

Brillouin散射不稳定性的色散关系

$$\omega^2 - k^2 C_s^2 = \frac{k^2 v_{os}^2}{4} \omega_{pi}^2 \left[\frac{1}{D(k - k_0, \omega - \omega_0)} + \frac{1}{D(k + k_0, \omega + \omega_0)} \right].$$

假设

$$\omega = i\gamma \ll \omega_0 \text{ 和 } \vec{k} \cdot \vec{k}_0 = 0$$

$$D(k \pm k_0, \omega \pm \omega_0) \cong \pm 2i\omega_0\gamma - k^2 c^2$$

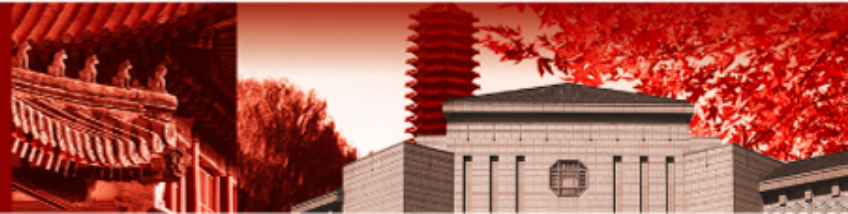
$$(\gamma^2 + k^2 C_s^2) \left(\gamma^2 + \frac{k^4 c^4}{4\omega_0^2} \right) = \frac{k^2 v_{os}^2 c^2}{8} \frac{\omega_{pi}^2}{\omega_0^2}$$

在 $\gamma \ll kC_s$ 情况下可导出极大增长率。

$$\frac{\partial \gamma}{\partial k} = 0 \Rightarrow k \quad k^2 = \frac{v_{os}^2}{4C_s^2 c^2} \omega_{pi}^2$$



北京大学



(2) 有质动力成丝

在
得

$\gamma \ll kC_s$ 情况下，注意

$$\frac{\omega_{pi}^2}{C_s^2} = \frac{\omega_{pe}^2}{v_e^2}$$

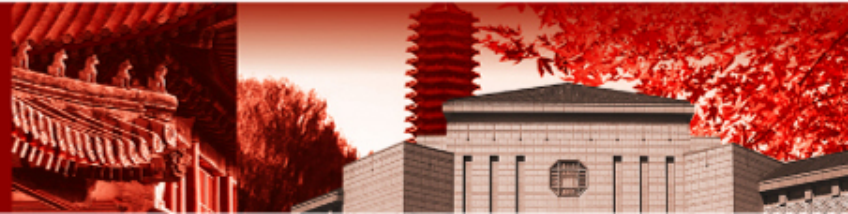
并忽略离子温度

$$\gamma = \frac{1}{8} \frac{v_{os}^2}{C_s^2} \frac{\omega_{pi}^2}{\omega_0} = \frac{1}{8} \frac{v_{os}^2}{v_e^2} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0}, k = \frac{\omega_{pe}}{2c} \left(\frac{v_{os}}{v_e} \right)$$

注意 $\gamma > 0$ ，密度涨落是纯增长。



北京大学



(2) 有质动力成丝

成丝不稳定往往由空间增长率来表征。

讨论波矢垂直于传播方向的零频率涨落的空间最大增长率，假设

$$\omega = 0, k = k_r + ik_i,$$

$$\vec{k}_r \cdot \vec{k}_0 = 0, \vec{k}_i \parallel \vec{k}_0$$

$$D(k \pm k_0, \omega \pm \omega_0) \cong -k^2 c^2 \mp 2k_i k_0 c^2$$

假设 $k_r \gg k_i$, 有 $k^4 \approx k_r^4, k^2 \approx k_r^2$

代入色散关系

$$4k_i^2 k_0^2 + k_r^4 - k_r^2 \frac{\omega_{pe}^2 v_{os}^2}{2c^2 v_e^2} = 0.$$

$$D(\omega, k) = \omega^2 - k^2 c^2 - \omega_{pe}^2 \omega^2 - k^2 C_s^2 = \frac{k^2 v_{os}^2}{4} \omega_{pi}^2 \left[\frac{1}{D(k - k_0, \omega - \omega_0)} + \frac{1}{D(k + k_0, \omega + \omega_0)} \right].$$

(2) 有质动力成丝

由前面的讨论，当 k_r 满足

$$k_r = \frac{\omega_{pe}}{2c} \left(\frac{v_{os}}{v_e} \right)$$

$$\gamma = \frac{1}{8} \frac{v_{os}^2}{C_s^2} \frac{\omega_{pi}^2}{\omega_0} = \frac{1}{8} \frac{v_{os}^2}{v_e^2} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0}$$

可得到最大增长率

$$k_{i,\max} = \frac{1}{8} \frac{v_{os}^2}{v_e^2} \frac{\omega_{pe}^2}{k_0 c^2}$$

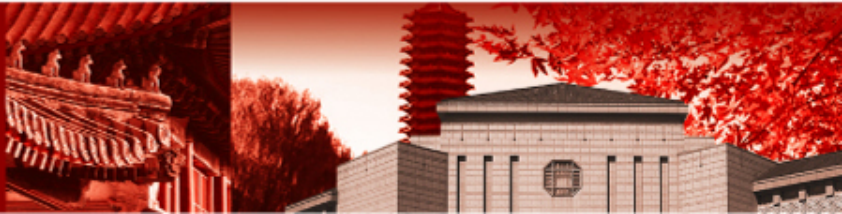
可以看出，有质动力占主导地位，需要满足

$$v_{os}^2 > v_e^2, \quad \text{即} \quad I_L \lambda_L^2 [W \cdot \mu m^2 / cm^2] > 3 \times 10^{15} T_e [keV]$$

入射激光强度越高，成丝越容易发生；初始等离子体温度越高，越不利于成丝。



北京大学



(2) 有质动力成丝

从另一方面来看，空间增长率是时间增长率除以光波的群速度

$$k_i = \frac{\gamma}{v_g}$$

$$\gamma = \frac{1}{8} \frac{v_{os}^2}{C_s^2} \frac{\omega_{pi}^2}{\omega_0} = \frac{1}{8} \frac{v_{os}^2}{v_e^2} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0}, k = \frac{\omega_{pe}}{2c} \left(\frac{v_{os}}{v_e} \right)$$

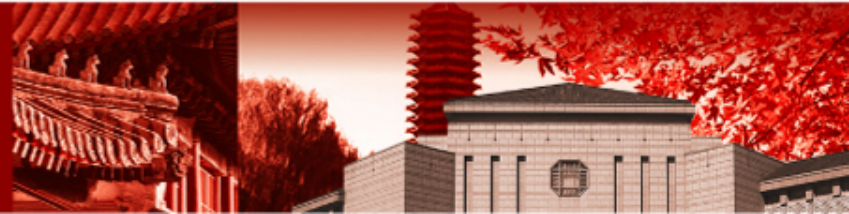
在 $\gamma \ll kC_s$ 情况下，

$$k_{i,\max} \approx \frac{\frac{1}{8} \frac{v_{os}^2}{v_e^2} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0}}{\frac{c^2 k_0}{\omega_0}} = \frac{1}{8} \frac{v_{os}^2}{v_e^2} \frac{\omega_{pe}^2}{c^2 k_0} = \frac{1}{8} \frac{v_{os}^2}{v_e^2} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0^2} \frac{\omega_0}{c}$$

与前面一致。



北京大学



(2) 有质动力成丝

用一个简单的处理来说明成丝的实质性特点。

考虑强度为 I 的平面光波，沿着均匀等离子体的 z 方向传播。

$$I = \frac{E^2 c}{8\pi}$$

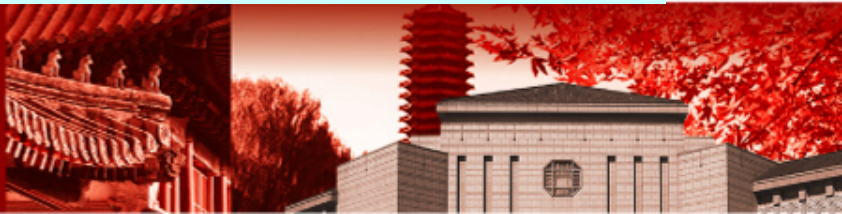
激光强度变化 $I = I_L(1 + \alpha \cos ky)$ ，引起密度变化。

有质动力成丝要发生，必须要求激光有一定的强度使得有质动力能平衡等离子体热压产生的力。

对于有质动力成丝，假定电子压力的变化和光波压力的变化平衡

$$\begin{aligned}\vec{F}_p &= -\frac{1}{4} \frac{e^2}{m_e \omega_0^2} \nabla |E^2| \\ &= -\nabla \frac{\omega_{pe}^2}{16\pi n_e \omega_0^2} |E^2| \\ &= -\nabla \frac{n}{16\pi n_e n_{cr}} |E^2| \\ &= -\nabla \frac{n}{2n_e n_{cr}} \frac{I}{c}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\nabla P_e &= \nabla P_R \\ \nabla(nT_e) &= -\frac{n}{2n_{cr}} \nabla \frac{I}{c} \\ \frac{\nabla n}{n} &= -\nabla \frac{I}{2n_{cr} T_e c}, \\ \Rightarrow n &= n_0 \exp\left(-\frac{I}{2n_{cr} T_e c}\right)\end{aligned}$$



(2) 有质动力成丝

如果 $I \ll 2n_{cr}T_e c$ ，对上式进行展开

$$\frac{n_0 + \delta n}{n_0} \approx 1 - \frac{I_L (1 + \alpha \cos ky)}{2n_{cr}T_e c},$$
$$\Rightarrow \frac{\delta n}{n_0} \approx -\frac{I_L \alpha \cos ky}{2n_{cr}T_e c}$$

可见，激发的密度涨落和激光的不均匀程度成正比，与电子温度成反比。

讨论： I_L

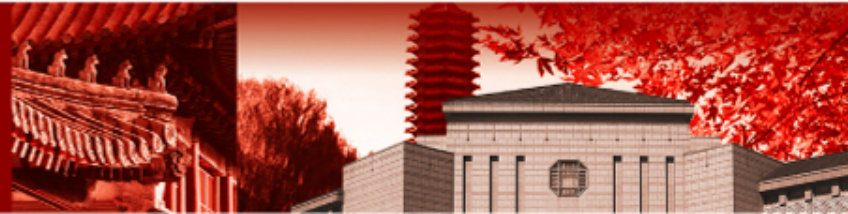
α

T_e

n_{cr}



北京大学



(2) 有质动力成丝

我们可以通过 E^2 指数增长1, 即 $2k_{i,\max}L \sim 1$ 的要求来定义一个阈值

$$2 \times \frac{1}{8} \left(\frac{v_{os}}{v_e} \right)^2 \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0^2} \frac{\omega_0}{c} L \sim 1 \quad \frac{\omega_0}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_L}$$

$$\left(\frac{v_{os}}{v_e} \right)^2 = \frac{I_L \lambda_L^2}{3 \times 10^{15} T_e}$$

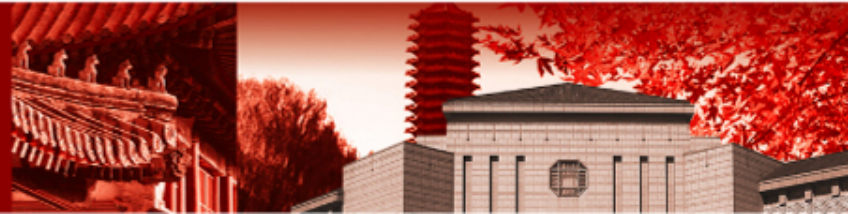
$$I_t = \frac{1}{\pi} \frac{6 \times 10^{15}}{L \lambda_L} \frac{n_{cr}}{n} T_e \approx \frac{2 \times 10^{15}}{L \lambda_L} \frac{n_{cr}}{n} T_e$$

这里,

$$n \ll n_{cr}, L, \lambda_L : \mu m, T_e : keV, I_t : W / cm^2$$



北京大学



(2) 有质动力成丝

同样可以由条件 $2k_{i,\max} L_{\text{col}} \sim 1$ 的给出碰撞阈值 ($\ln \Lambda \sim 7$)

$$v_g = c \sqrt{1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0^2}}$$

$$\left(\frac{v_{os}}{v_e}\right)^2 = \frac{I_L \lambda_L^2}{3 \times 10^{15} T_e}$$

$$k_i = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0^2} \frac{v_{ei}}{v_g} = \frac{n}{n_{cr}} \frac{v_{ei}}{c \sqrt{1 - \frac{n}{n_{cr}}}}$$

$$L_{\text{col}} \sim k_i^{-1}$$

$$I_{tc} \approx \frac{3 \times 10^{12}}{\lambda_L^3} \frac{Z}{T_e^{1/2}} \frac{n_{cr}}{n}$$



北京大学

$$v = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_r^2} v_{ei}$$

$$v_{ei} = \frac{4}{3} \frac{(2\pi)^{1/2} Z_i^2 e^4 n_i \ln \Lambda}{(kT_e)^{3/2} m_e^{1/2}} \approx 3 \times 10^{-6} \frac{Z_i^2 n_i \ln \Lambda}{T_e^{3/2}}$$

(3) 热成丝

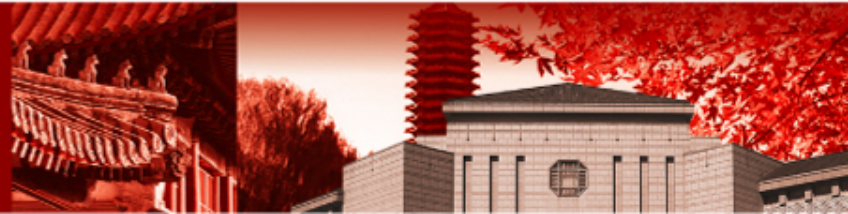
热成丝：局部等离子体温度比周围高，等离子体膨胀，产生密度凹坑，引起激光能量的进一步聚集，发生类似有质动力引起的成丝。

$$k_i = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0^2} \frac{v_{ei}}{v_g} = \frac{n}{n_{cr}} \frac{v_{ei}}{c \sqrt{1 - \frac{n}{n_{cr}}}}$$

$$v_{ei} = \frac{4}{3} \frac{(2\pi)^{1/2} Z_i^2 e^4 n_i \ln \Lambda}{(kT_e)^{3/2} m_e^{1/2}} \approx 3 \times 10^{-6} \frac{Z_i^2 n_i \ln \Lambda}{T_e^{3/2}}$$



北京大学



(3) 热成丝

在热成丝的情况下，假定吸收强度与电子热流平衡

$$\nabla \cdot (\kappa_t \nabla T_e) = -k_s I, \quad k_s: \text{碰撞吸收的空间衰减率}$$

激光强度扰动驱动电子温度扰动，因此引起电子密度扰动。压力和横向束平衡，即准静态极限

$$\begin{aligned} I &= I_L (1 + \alpha \cos ky), \\ T_e &= T_{e0} (1 + \beta \cos ky), \quad \nabla_{\perp} (n T_e) = 0 \\ n &= n_0 (1 - \beta \cos ky), \end{aligned}$$

电子热传导系数和温度扰动

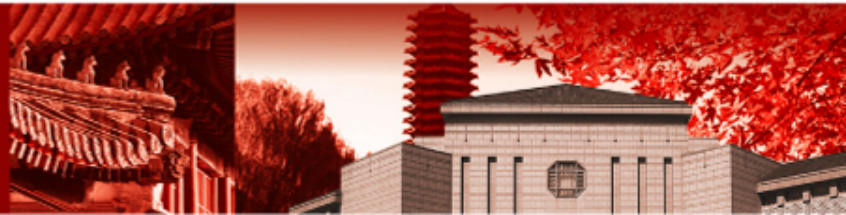
$$\begin{aligned} \kappa_t &= \kappa_{t0} \left(1 + \frac{5\beta}{2} \cos ky\right), \\ k_s &= k_{s0} \left(1 - \frac{7\beta}{2} \cos ky\right), \end{aligned}$$

$$\text{热传导系数: } \kappa_t = \frac{4T_e^{5/2}}{Ze^4 m^{1/2} \ln \Lambda} = C_1 T_e^{5/2}$$

$$\text{空间衰减率: } k_s = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0^2} \nu_{ei} = C_2 n^2 T_e^{-3/2}$$



北京大学



(3) 热成丝

代入

$$\frac{\partial}{\partial z} [\kappa_{t0} (1 + \frac{5}{2} \beta \cos ky) \frac{\partial}{\partial z} T_{e0} (1 + \beta \cos ky)] = -k_{s0} (1 - \frac{7}{2} \beta \cos ky) I_L (1 + \alpha \cos ky),$$

得到最低阶和次低阶

$$n = n_0 (1 - \beta \cos ky),$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (\kappa_{t0} \frac{\partial T_{e0}}{\partial z}) = -k_{s0} I_L,$$
$$\beta = \frac{k_{s0} I_L \alpha}{7k_{s0} I_L + k^2 \kappa_{t0} T_{e0}}.$$

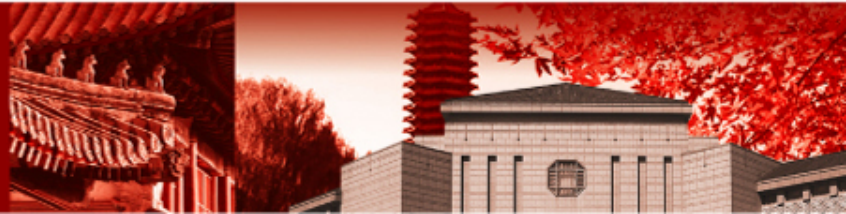
$$\frac{\delta n}{n_0} = -\beta \cos ky = -\frac{k_{s0} I_L \alpha}{7k_{s0} I_L + k^2 \kappa_{t0} T_{e0}} \cos ky.$$

假设 $k^2 \kappa_{t0} T_{e0} \gg \kappa_{s0} I_L$, 得到热成丝引起的密度涨落

$$\frac{\delta n}{n_0} \approx -\frac{\kappa_{s0} I_L \alpha \cos ky}{k^2 \kappa_{t0} T_{e0}},$$

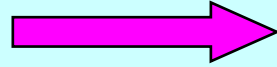


北京大学



(3) 热成丝

$$I = I_L(1 + \alpha \cos ky),$$
$$T_e = T_{e0}(1 + \beta \cos ky),$$



$$\left(\frac{\delta n}{n_0}\right)_{thermal} \approx -\frac{\kappa_{s0} I_L \alpha \cos ky}{k^2 \kappa_{t0} T_{e0}},$$

讨论: I_L

α

T_{e0}

κ_{t0}

$$\text{热传导系数: } \kappa_t = \frac{4T_e^{5/2}}{Ze^4 m^{1/2} \ln \Lambda} = C_1 T_e^{5/2}$$



北京大学



(3) 热成丝

已知有质动力成丝引起的密度涨落

$$I = I_L(1 + \alpha \cos ky),$$

$$\frac{\delta n}{n_0} \approx - \frac{I_L \alpha \cos ky}{2n_{cr} T_e c}$$

热成丝和有质动力成丝引起的密度涨落之比

$$\frac{\left(\frac{\delta n}{n_0}\right)_{thermal}}{\left(\frac{\delta n}{n_0}\right)_{ponderomotive}} = \frac{2n_{cr} \kappa_{s0} c}{k^2 \kappa_{t0}}$$

$$\kappa_t = \frac{4T_e^{5/2}}{Ze^4 m^{1/2} \ln \Lambda}$$

$$\kappa_s = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0^2} \nu_{ei}$$

对高Z等离子体,

$$\frac{2n_{cr} \kappa_{s0} c}{k^2 \kappa_{t0}} \approx \frac{1}{7} \frac{\gamma_{ei}^2}{k^2 v_e^2}, \lambda_{ei} = \frac{v_e}{\gamma_{ei}}$$

$$\nu_{ei} = \frac{4}{3} \frac{(2\pi)^{1/2} Z_i^2 e^4 n_i \ln \Lambda}{(kT_e)^{3/2} m_e^{1/2}} \approx 3 \times 10^{-6} \frac{Z_i^2 n_i \ln \Lambda}{T_e^{3/2}}$$

对于波长

$$\lambda \gg \lambda_{ei} = \frac{v_e}{\gamma_{ei}}$$

, 那么热成丝占统治地位。



北京大学



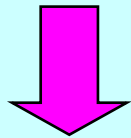
$$\left(\frac{\delta n}{n_0}\right)_{thermal} \approx - \frac{\kappa_{s0} I_L \alpha \cos ky}{k^2 \kappa_{t0} T_{e0}}$$

(4) 有质动力成丝与热成丝是竞争关系

有质动力成丝

$$\frac{\partial^2 n_e'}{\partial t^2} - C_s^2 \nabla^2 n_e' = \frac{n_0 Z e^2}{m_e m_i c^2} \nabla^2 (\vec{A}_L \cdot \vec{A}').$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 + \omega_{pe}^2 \right) \vec{A}' = -\frac{4\pi e^2}{m_e} n_e' \vec{A}_L.$$

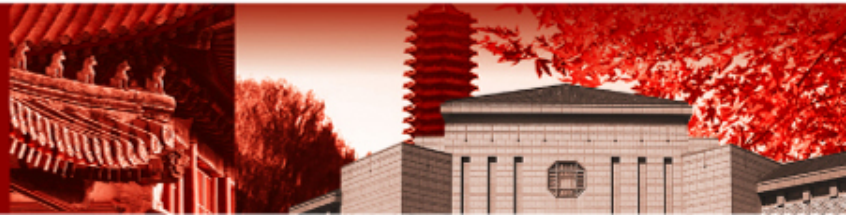


$$\omega^2 - k^2 C_s^2 = \frac{k^2 v_{os}^2}{4} \omega_{pi}^2 \left[\frac{1}{D(k - k_0, \omega - \omega_0)} + \frac{1}{D(k + k_0, \omega + \omega_0)} \right].$$

有质动力成丝色散关系



北京大学



(4) 有质动力成丝与热成丝是竞争关系

热成丝的色散关系可由有质动力成丝的色散关系乘以一个近似强度项的因子

$$\frac{\left(\frac{\delta n}{n_0}\right)_{thermal}}{\left(\frac{\delta n}{n_0}\right)_{ponderomotive}} = \frac{2n_{cr}}{k^2} \frac{\kappa_{s0}c}{\kappa_{t0}} \approx \frac{1}{7} \frac{1}{k^2 \lambda_{ei}^2}$$

考虑到长波，略去 k^4 项，可得到热成丝的色散关系

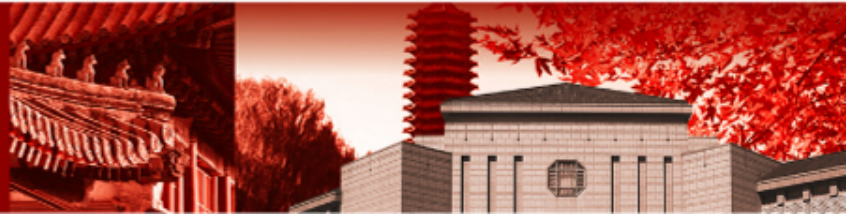
$$4k_i^2 k_0^2 + k_r^4 - \frac{\omega_{pe}^2 v_{os}^2}{14c^2 v_e^2 \lambda_{ei}^2} = 0.$$

$$k_r^4 \leq \frac{\omega_{pe}^2 v_{os}^2}{14c^2 v_e^2 \lambda_{ei}^2} \Rightarrow k_r \leq \left(\frac{\omega_{pe} v_{os}}{\sqrt{14} c v_e \lambda_{ei}} \right)^{1/2}$$

$$\sqrt{14} \approx 3.6$$



北京大学



(4) 有质动力成丝与热成丝是竞争关系

当

$$k_r \leq \left(\frac{\omega_{pe} v_{os}}{\sqrt{14} c v_e \lambda_{ei}} \right)^{1/2}$$

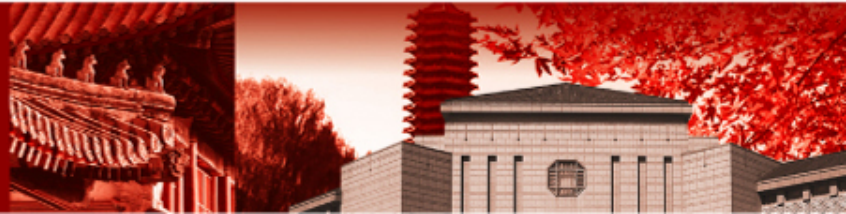
得到空间最大增长率

$$k_{i,\max} \approx \frac{\omega_{pe}}{\sqrt{56} k_0 c} \frac{v_{os}}{v_e} \frac{1}{\lambda_{ei}}$$

$$\sqrt{56} \approx 7.5$$



北京大学



(4) 有质动力成丝与热成丝是竞争关系

有质动力成丝

$$k_{i,\max} = \frac{1}{8} \frac{v_{os}^2}{v_e^2} \frac{\omega_{pe}^2}{k_0 c^2}$$

热成丝

$$k_{i,\max} \approx \frac{\omega_{pe}}{7.5 k_0 c} \frac{v_{os}}{v_e} \frac{1}{\lambda_{ei}}$$

$$\frac{(k_{i,\max})_{thermal}}{(k_{i,\max})_{ponderomotive}} \approx \frac{v_e c}{v_{os} \omega_{pe} \lambda_{ei}} = \frac{c}{v_{os} \omega_{pe} \gamma_{ei}}$$

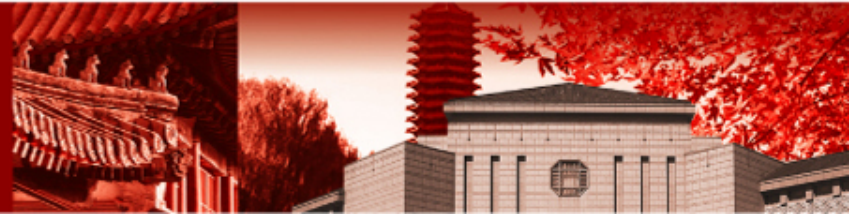
$$\lambda_{ei} = \frac{v_e}{\gamma_{ei}}$$

当 $(\gamma_{ei} \omega_{pe})^{-1} > \frac{v_{os}}{c}$ 时，热成丝的空间增益系数超过有质动力成丝。

在短波长激光产生的具有更强碰撞的较高密度等离子体中，热成丝机制具有潜在的竞争性。



北京大学



(4) 有质动力成丝与热成丝是竞争关系

同样可以得到热成丝($2k_{i,\max}L_{\text{col}}\sim 1$)的阈值和碰撞阈值($2k_{i,\max}L_{\text{col}}\sim 1$)

$$I_t \approx 2 \times 10^{19} \left(\frac{n_{cr}}{n}\right)^3 \frac{T_e^5 \lambda_L^2}{Z^2 L^2}$$

$$I_{tc} \approx 6 \times 10^{13} \left(\frac{n_{cr}}{n}\right)^3 \frac{T_e^2}{L^2}$$

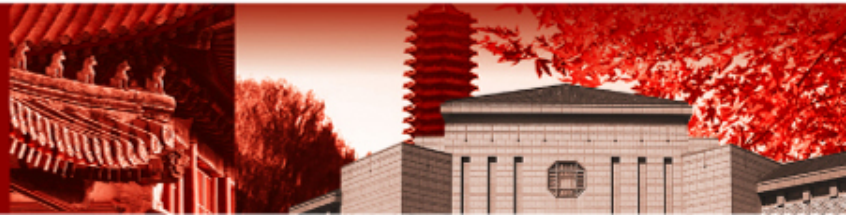
有质动力成丝

$$I_t \approx \frac{2 \times 10^{15}}{L \lambda_L} \frac{n_{cr}}{n} T_e$$

$$I_{tc} \approx \frac{3 \times 10^{12}}{\lambda_L^3} \frac{Z}{T_e^{1/2}} \frac{n_{cr}}{n}$$



北京大学



(5) 成丝的非线性效应

发生在underdense区域，与激光自聚焦相关

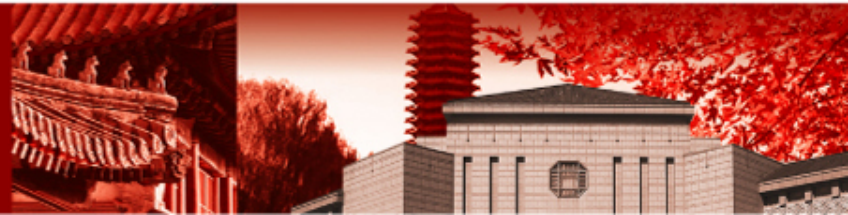
受到有质动力，热效应，相对论效应的影响

成丝不稳定性与其它过程（如SRS,SBS）相互竞争

- 在实际激光产生的等离子体中，由于存在着各种不可控制的扰动，要严格地控制、精确地预言成丝的形成和发展是比较困难的。
- 存在着一些抑制成丝的物理机制。如果在某种具体的等离子体条件下热传导足够地快，热成丝就会得到抑制。此外，成丝的发展趋势必然是丝越来越细，细到一定程度光的衍射效应就会抑制其继续发展。因此，丝存在一个横向阈值大小。



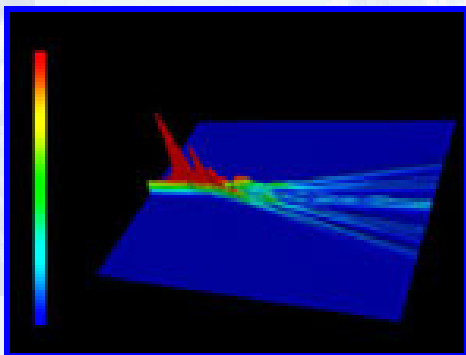
北京大学



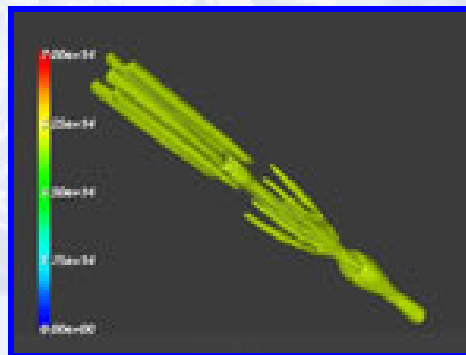
(5) 成丝的非线性效应

- 丝的发展一方面是横向变细，另一方面是纵向变长，因此也存在一个纵向的空间增长长度。

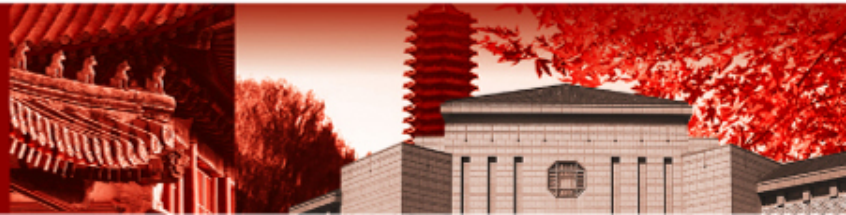
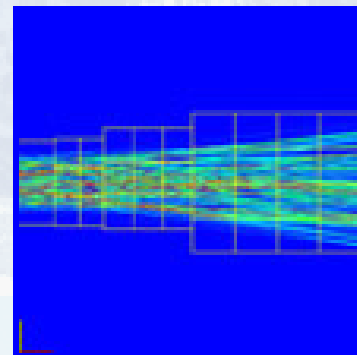
2D beam



3D beam



2D RPP beam



(5) 成丝的非线性效应

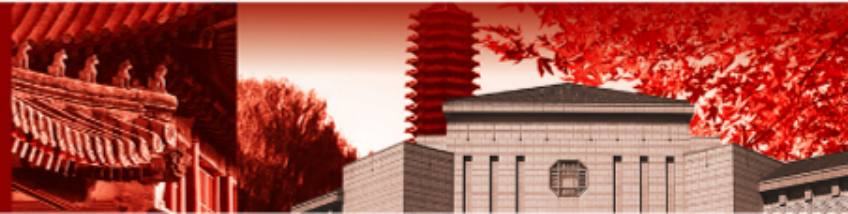
时间相干性：光源发光过程在时间上的断续性 谱线宽度

空间相干性：来源于扩展光源不同部分的发光的独立性 D

- 成丝是激光和离子声波相干相互作用的结果，而实际的激光存在着一定的相干长度和宽度。
- 如果控制激光的纵向（横向）相干长度，使之小于丝发展所需的空间长度（宽度），丝也就能抑制或被部分抑制。

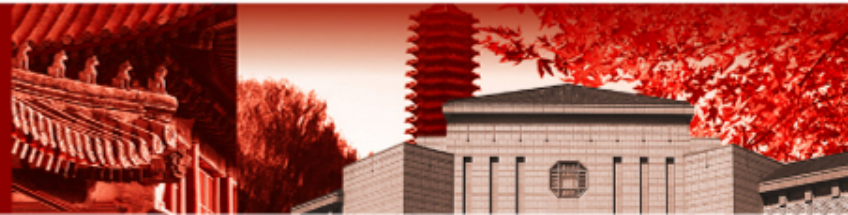


北京大学



(5) 成丝的非线性效应

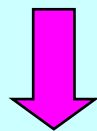
- 控制成丝的另一手段是激光束的光滑化，例如空间去相干技术改善激光辐照的空间均匀性（即消除大长度的不均匀性）。这样，一方面消除引起成丝的部分原因；另一方面，如果仍然存在的相干区小于成丝所需的大小，也同样能抑制成丝的发展。
- 降低时间相干性的手段之一是增加激光的频率宽度(例如 10^{-3} 激光频率)，不过频率宽度变宽会引起另一不利因素：使倍频效率降低。



(5) 成丝的非线性效应

两束光波叠加：

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{10}(\vec{r}, t) \exp(-i\omega_1 t + \vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varphi_1) \quad \vec{E}_2 = \vec{E}_{20}(\vec{r}, t) \exp(-i\omega_2 t + \vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \varphi_2)$$



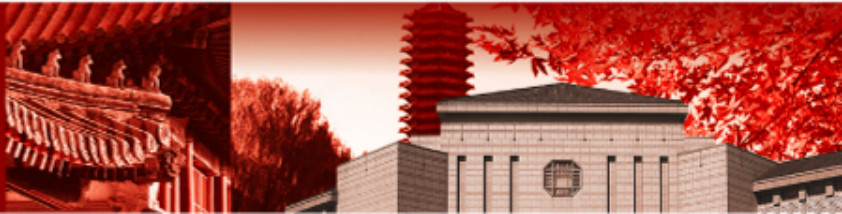
$$E^2 = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2\vec{E}_{10} \cdot \vec{E}_{20} \cos[(\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{r} - (\omega_1 - \omega_2)t + \varphi_1 - \varphi_2]$$

若产生干涉，在接收屏上形成稳定的干涉图样，必须满足如下条件：

- (1) $\omega_1 = \omega_2$ ，即两束光频率相等；
- (2) $\varphi_1 - \varphi_2 = \text{const}$ ，即相位差必须是常数；
- (3) $\vec{E}_{10} \cdot \vec{E}_{20} \neq 0$ ，即要求两束光有相同的偏振成分。有时为了是干涉同样具有大的反衬度，要求 $E_{10} \approx E_{20}$ 。



北京大学



(5) 成丝的非线性效应

反过来，如果不希望若产生干涉，可以破坏上面的条件：

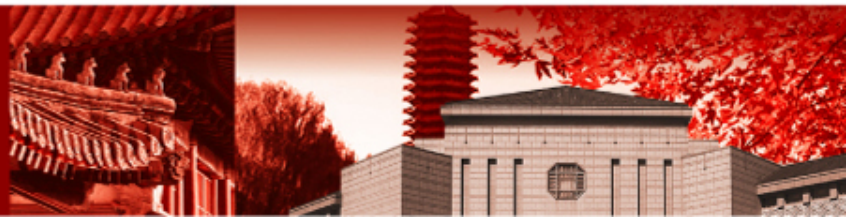
(1) $\omega_1 \neq \omega_2$ ，即两束光频率相等；

(2) $\varphi_1 - \varphi_2 \neq \text{const}$ ，即相位差随时间变化，如ISI；

(3) $\vec{E}_{10} \cdot \vec{E}_{20} = 0$ ，即使两束光有相同的偏振方向垂直，如PCP。



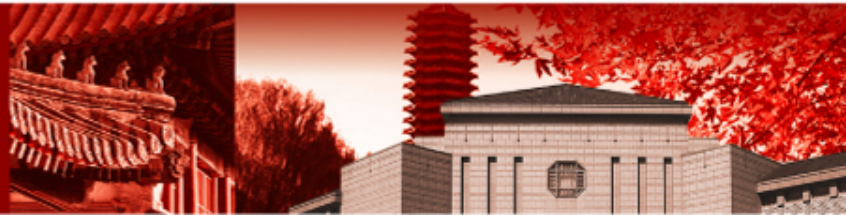
北京大学



(5) 成丝的非线性效应

激光直接驱动**ICF**对激光要进行以下三方面的处理

- (1) 光束的时间整形；
- (2) 光束的几何整形；
- (3) 光束的光滑化。



(5) 成丝的非线性效应

光束光滑化的途径

•空间域光滑化

绝对的光滑是难以实现的，而靶物理允许小尺度结构，从而基本途径是：

- (1) 采用小F数聚焦透镜，减少斑纹尺度；
- (2) 使空间低频成分最小；
- (3) 高空间频率可由等离子体热传导平滑。

例如，对NIF的黑腔等离子体：

$$f \leq 8 .$$

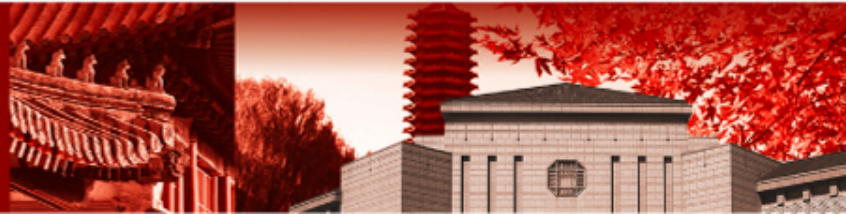
•时间域光滑化

当空间域方法不能完全达到要求时，可辅以时间域上的手段，做到时间平均意义的光滑

- (1) 产生宽频带激光，大的 $\Delta\lambda$ 导致迅速的光滑；
- (2) 光束扫描，大的 $\Delta\theta$ 造成许多不同的斑纹图



北京大学



(5) 成丝的非线性效应

空间域光滑化：

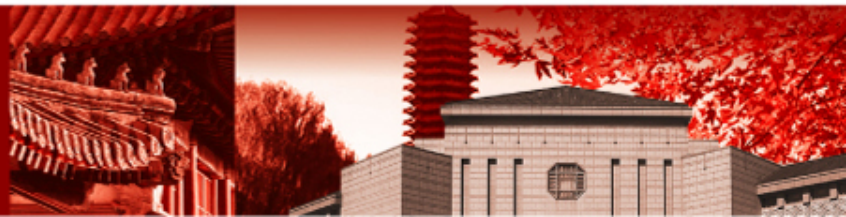
- (1) 随机相位板—RPP,分布相位板—DPP
- (2) 相息相位板—KPP, C—DPP
- (3) 列阵透镜—LA
- (4) 双相位板—PZP

时间域光滑化：

- (1) 诱导空间非相干—ISI
- (2) 谱色散光滑化—SSD, BRP
- (3) 自发射放大—ASE
- (4) 光学空间光滑化—OSS
- (5) 无梯镜诱导空间非相干EF—ISI



北京大学



谢谢!



北京大學