



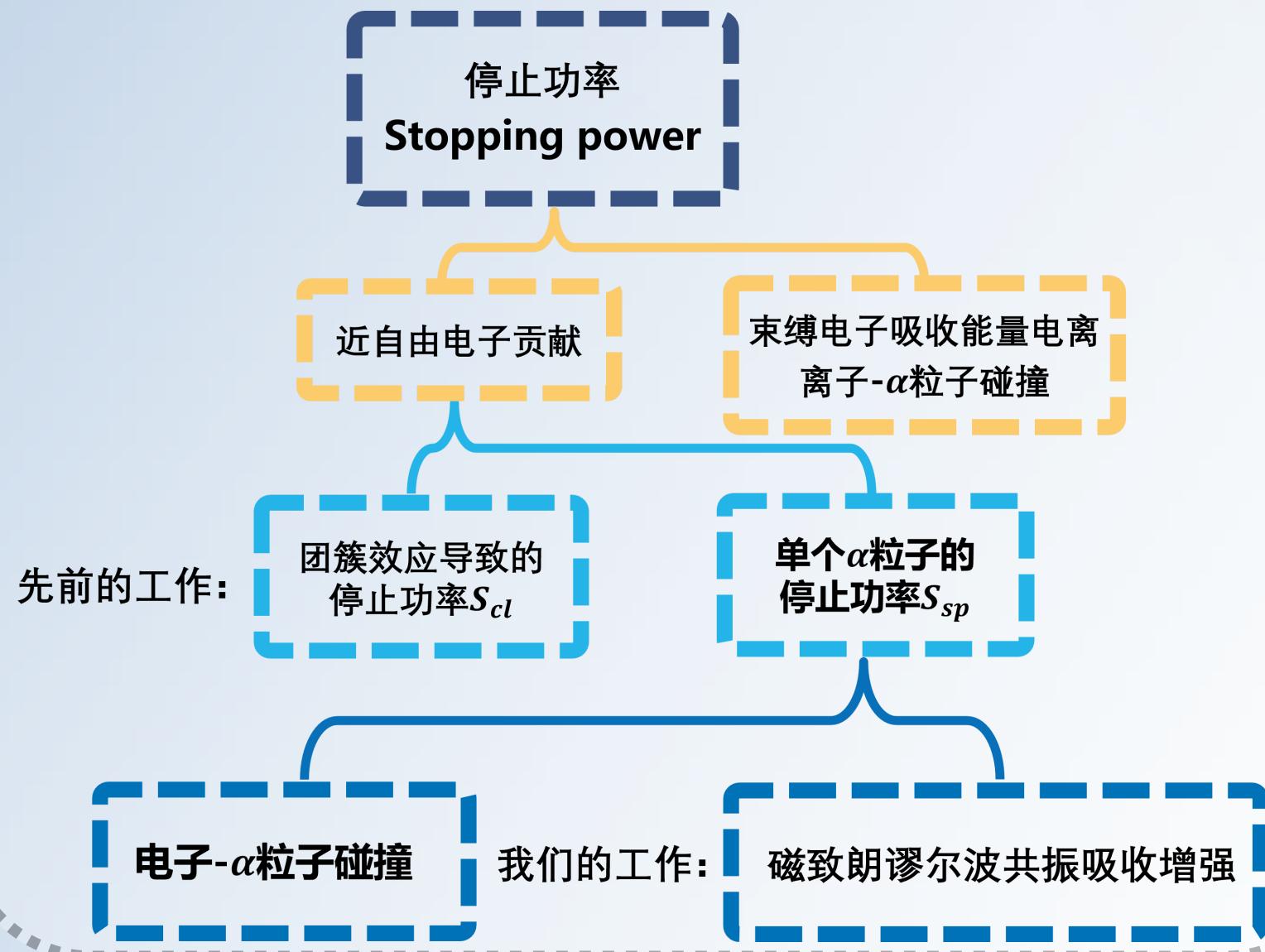
磁化量子简并等离子体 α 粒子的制动功率

ICF物理研讨班 (ICF Seminar)

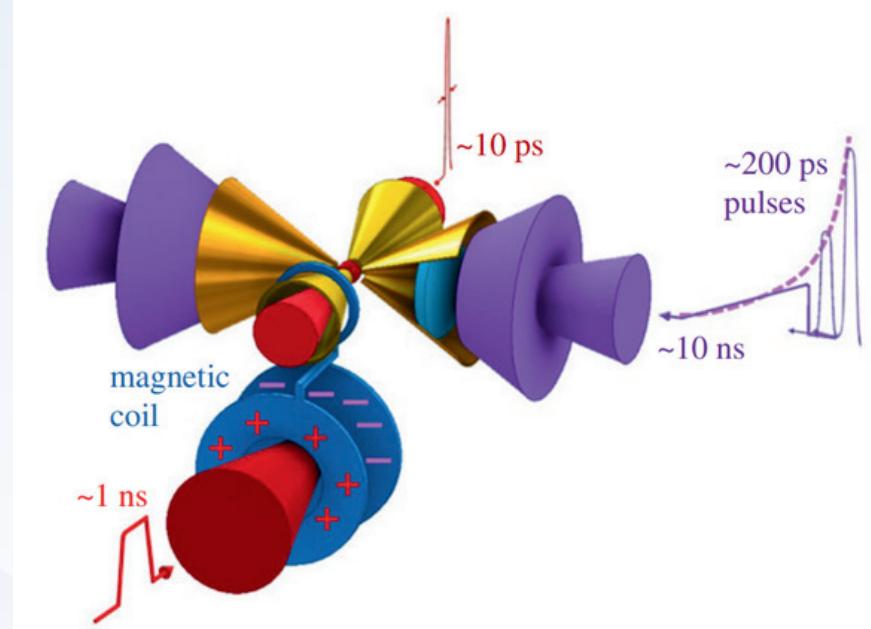
1

研究背景

制动功率 (stopping power) 是指粒子在等离子体中运动时失去能量的速率，它将影响DT燃料中 α 粒子的范围，进而影响燃烧波的传播和燃料的燃烧效率[1]，因此，精确的制动功率是ICF建模的关键组成部分。研究DCI方案中燃烧条件下 α 粒子在磁化等离子体中的能量沉积过程对于预测燃烧波传播到高密度DT燃料中具有重要意义，而高密度DT燃料是ICF方法中高能量增益所必需的。先前的工作已研究了高密度 α 粒子中的团簇效应的影响[2]，我们将探究在DCI方案中磁场对 α 粒子能量沉积过程的影响。



DCI双锥对撞点火方案



- 1. 近等熵压缩
- 2. 烧蚀冲击混合加速
- 3. 对撞预热
- 4. 强磁场引导的点火和燃烧

双锥对撞点火方案中形成磁化的量子简并等离子体，这是独特的。

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = F_0 e^{i\omega t}$$

$$x = \frac{F_0 e^{i\omega t}}{(\omega_0^2 - \omega^2) + 2\beta\omega i}$$

$$P = \left\langle F(t) \frac{dx(t)}{dt} \right\rangle = \frac{F_0^2 \beta \omega^2}{[\omega^2 - \omega_0^2]^2 + [2\beta\omega]^2} = \frac{F_0^2 \omega}{2} \text{Im} \left[\frac{1}{(\omega^2 - \omega_0^2) - i2\beta\omega} \right]$$

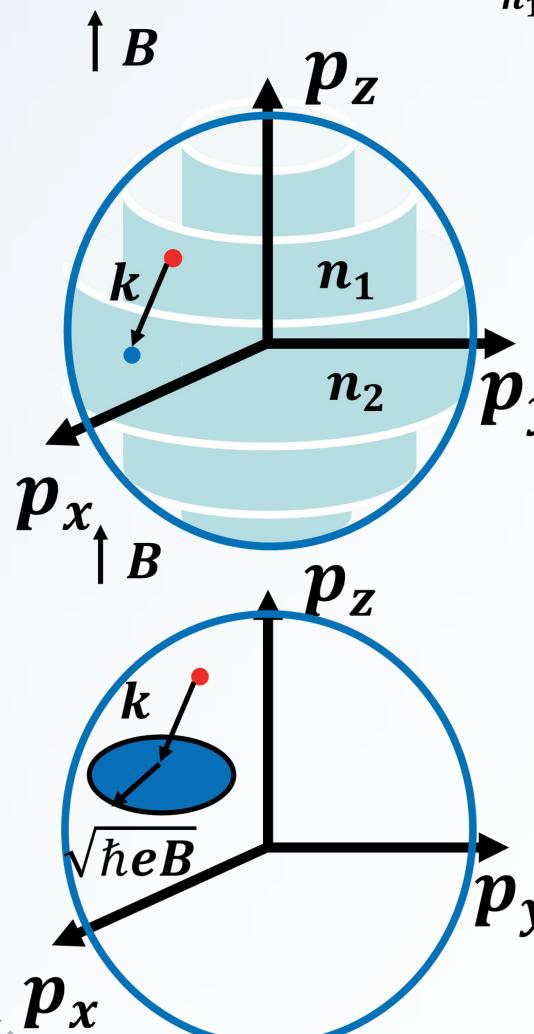
$$\text{Re}(\epsilon_R(\omega)) \quad \text{Im}(\epsilon_R(\omega))$$

在振子的受迫阻尼振荡中，振子需要输入功率维持同样的振幅。在阻尼较小的情况下，外力做功与阻尼呈正相关！

$$\text{粒子的制动功率(线性响应+RPA近似)[3]}: S_i(T, v) = \frac{2Z^2 e^2}{\pi v^2} \int_0^\infty \frac{dq}{q} \int_0^{qv} d\omega \omega \text{Im} \left[\frac{-1}{\epsilon(q, \omega, T)} \right]$$

$$\text{有限温体系磁场中的相对介电系数: } \epsilon(k_\perp, k_z, \omega, T, B) = 1 - \frac{2e^2}{(2\pi)^2 l^2 \epsilon_0} L^0(k_\perp, k_z, \omega, T, B)$$

$$L^0(k_\perp, k_z, \omega, T, B) = \sum_{n_1, n_2} H_{n_1, n_2} \left(\frac{2p_\perp}{\sqrt{\omega_B}} \right) \int dp_z \frac{F(p_z, n_1) - F(p_z + k_z, n_2)}{\omega + p^2 - (k_z + p_z)^2 + \omega_B(n_1 - n_2) + i\eta}$$



绿色部分：能量为 ω 动量为 k 的粒子与电子碰撞，并使得电子从朗道能级 n_1 跃迁到 n_2 的情形下的能量守恒方程：

$$\omega + (k_z + p_z)^2 + \omega_B n_2 = p_z^2 + \omega_B n_1$$

红色部分：电子从朗道能级 n_1 跃迁到 n_2 ，并且与外来粒子交换动量 k 的概率。加入磁场后动量守恒被破坏，使跃迁概率上升。(左图)

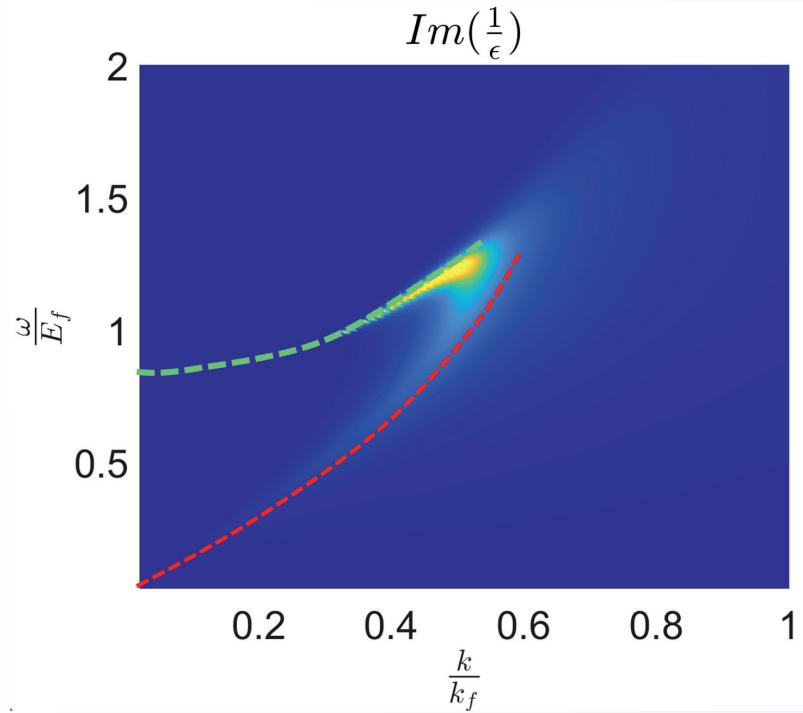
蓝色部分：费米子在该能级的占据概率，体现泡利不相容原理。

在磁场为0的极限下，朗道能级间隔极小，函数 $H_{n_1, n_2} \left(\frac{2p_\perp}{\sqrt{\omega_B}} \right)$ 退化并且要求不同的能量态之间水平动量守恒。

同时，从S的表达式也可以看出制动功率对粒子速度比较敏感

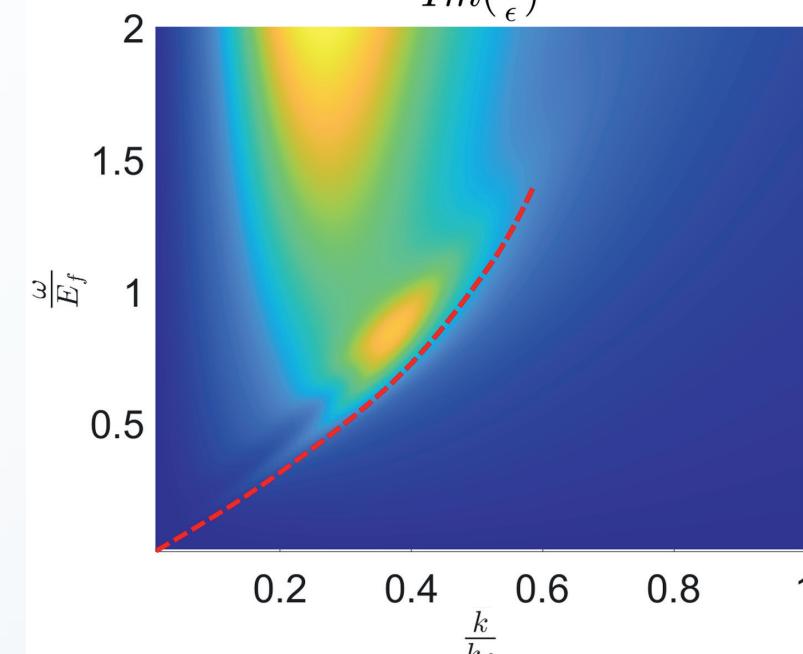
理论模型&数值结果 2

无磁场结果：(虚线为理论曲线) $\text{Im}(\frac{1}{\epsilon})$



近自由电子和 α 粒子碰撞(红)
 α 粒子驱动下朗谬尔波的阻尼震荡(绿)

加入磁场结果：(虚线为理论曲线) $\text{Im}(\frac{1}{\epsilon})$



在加入磁场后，电子碰撞收到的影响不明显，但是朗谬尔波阻尼震荡的贡献明显增强，符合理论预言

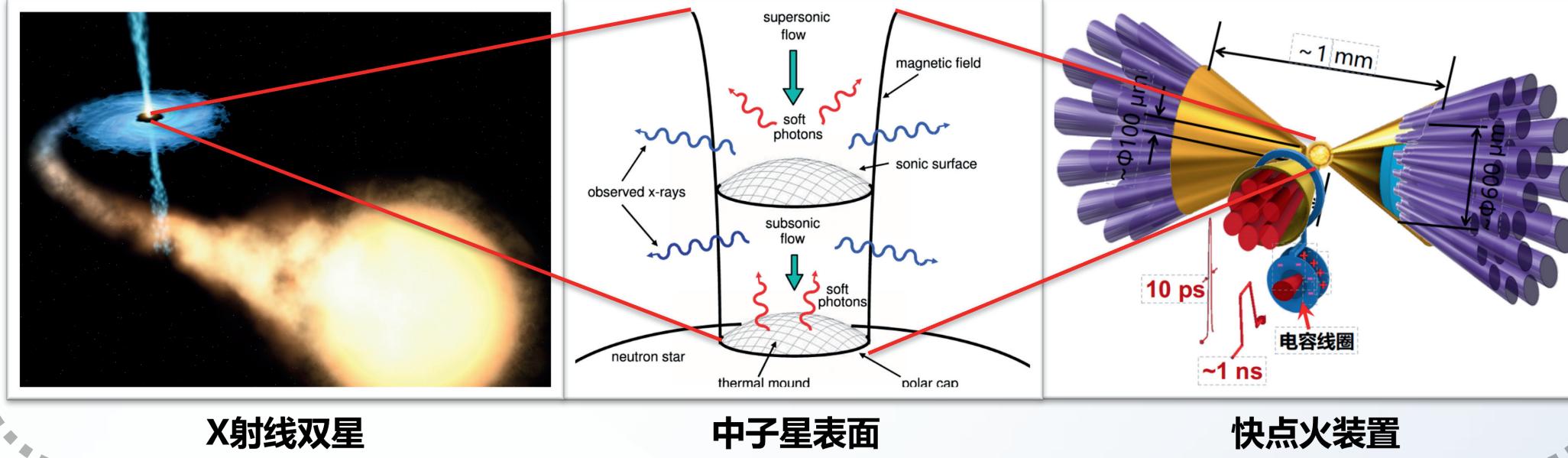
总结与展望 3

- 1. 讨论在磁场下温稠密物质对 α 粒子的响应机理，指出 α 粒子的制动功率主要由 α 粒子与电子的散射以及 α 粒子驱动下朗谬尔波的阻尼震荡贡献。磁场增强了朗谬尔波的阻尼，从而总体提高了 α 粒子的制动功率。其量级为 $O(\frac{\hbar\omega_B}{E_f})$ 。
- 2. 理论计算说明磁场下温稠密物质的存在量子效应，但是在磁场对应的朗道能级远小于费米能级的情况下，也就在DCI方案的情形中，是可以忽略的。
- 3. 强磁化等离子体在天体物理中也相当重要，同样的处理方法亦可应用于致密星的吸积过程研究。

天体物理中的对应：星际等离子体中的宇宙射线、致密星大气、致密星表面

观测的佐证：吸积X射线脉冲星(accreting x-ray pulsars)

在中子星中，磁场可以达到 10^8 T，高能粒子加速后入射，速度 $v \sim 0.5c$ 特征温度 10^7 K[4]。



References

- [1] S. Atzeni and J. Meyer-ter-Vehn, The Physics of Inertial Fusion (Oxford Science Press, Oxford, 2004).
- [2] Fu, Z. P., Zhang, Z. W., Lin, K., Wu, D., & Zhang, J. (2023). Stopping power of high-density alpha-particle clusters in partially degenerated deuterium-tritium fuels. *Physics of Plasmas*, 30(7), 072708.
- [3] Arista, N. R. (1978). Energy loss of correlated charges in an electron gas. *Physical Review B*, 18(1), 1.
- [4] Becker, P. A., & Wolff, M. T. (2007). Thermal and Bulk Comptonization in Accretion - powered X - Ray Pulsars. *The Astrophysical Journal*, 654(1), 435–457.