数学与系统科学研究院

计算数学所学术报告

报告人：　王晓钢 教授

（ 哈尔滨工业大学 ）

报告题目：

燃烧等离子体的多流体模型

邀请人：　郑伟英 研究员

报告时间：**2015** 年 **6** 月 **30** 日（周二）

上午 **10:00~11:00**

报告地点：　数学院南楼二层

205 会议室

摘要：

包括燃烧（氘氚“热核”聚变反应）过程的等离子体多流体稳态过程研究：发展有关模型和 code——含有氘、氚离子的“loss”项（聚变）和“source”项（加料）、alpha 粒子和聚变中子的源项（氘、氚聚变的结果）和损失项（alpha 粒子输运损失等）

基本方程：

$$\frac{\partial n_\alpha}{\partial t}+\nabla\cdot(n_\alpha\mathbf{u}_\alpha)=C_\alpha-D_\alpha\ ,$$

$$n_\alpha m_\alpha\left(\frac{\partial\mathbf{u}_\alpha}{\partial t}+\mathbf{u}_\alpha\cdot\nabla\mathbf{u}_\alpha\right)=\mathbf{F}_\alpha+\mathbf{R}_\alpha+\mathbf{M}_\alpha-\mathbf{L}_\alpha\ ,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(K_\alpha)=\mathbf{u}_\alpha\cdot(\mathbf{F}_{\alpha,EM}+\mathbf{R}_\alpha)+Q_\alpha-\nabla\cdot\mathbf{q}_\alpha+X_\alpha\ ;$$

这里：

$$K_\alpha\equiv\frac{3}{2}n_\alpha T_\alpha+\frac{1}{2}n_\alpha m_\alpha u_\alpha^2\ ,\qquad Q_j\equiv\frac{3}{2}n_\alpha\sum_\beta\nu_{\alpha\beta}(T_\beta-T_\alpha)\ ,$$

$$\mathbf{q}_\alpha=-\kappa_\alpha\nabla T_\alpha+\frac{1}{2}n_\alpha m_\alpha u_\alpha^2\mathbf{u}_\alpha+\frac{1}{2}n_\alpha T_\alpha\mathbf{u}_\alpha+\mathbf{P}_\alpha\cdot\mathbf{u}_\alpha\ ,$$

$$\mathbf{F}_\alpha=-\nabla\cdot\mathbf{P}_\alpha+n_\alpha q_\alpha\left[\mathbf{E}+\frac{\mathbf{u}_\alpha\times\mathbf{B}}{c}\right]\equiv-\nabla\cdot\mathbf{P}_\alpha+\mathbf{F}_{\alpha,EM}\ ;$$

其中，$n_\alpha=n_\alpha(\mathbf{x},t)$是第$\alpha$种粒子的数密度，$\mathbf{u}_\alpha=\mathbf{u}_\alpha(\mathbf{x},t)$是第$\alpha$种粒子的流体速度，$\mathbf{P}_\alpha=\mathbf{P}_\alpha(\mathbf{x},t)$ 是 Reynolds 协强张量（对角项为压强$p_\alpha=n_\alpha T_\alpha$，）；$D_\alpha$=$D_\alpha(\mathbf{x},t)$是第$\alpha$种粒子的数密度输运（扩散）损失，$\mathbf{L}_\alpha$=$\mathbf{L}_\alpha(\mathbf{x},t)$是第$\alpha$种粒子的动量输运（扩散）损失，$\kappa_\alpha=\kappa_\alpha(\mathbf{x},t)$是第$\alpha$种粒子的热扩散系数（；以及$\nu_{\alpha\beta}=\nu_{\alpha\beta}(\mathbf{x},t)$是

第α种粒子与第β种粒子之间的碰撞频率（正比于第β种粒子的数密度n_β）等。

此外，粒子种类$\alpha = AD, AT, D, T, He, e$，分别为氘原子、氚原子、氘离子、氚离子、氦离子（包括 alpha 粒子）、电子，有：$q_{AD} = q_{AT} = 0$，$q_D = q_T = e$，$q_{He} = 2e$，$q_e = -e$；$m_{AD} \approx m_D = 2m_p$，$m_{AT} \approx m_T = 3m_p$，$m_{He} = 4m_p$，$m_e / m_p = 1/1836$。

未确定的函数：

（1）D_α，κ_α，$\mathbf{L}_\alpha$：这些扩散过程的计算对原子可以用经典模型，带电粒子的输运过程可能是新经典输运或者反常输运散；

（2）$\mathbf{P}_\alpha$的非对角项：也有不同的模型，牵涉到粘滞等动量输运过程；

这些可以借鉴其它模型或者 codes。

其它函数：C_α，$\mathbf{R}_\alpha$，$\mathbf{M}_\alpha$，X_α，：

（1）氘原子：

$$C_{AD} = S_{AD} - \gamma_{DI} n_{AD},$$

$$\mathbf{R}_{AD} \equiv \gamma_{DI} n_{AD} m_D (\mathbf{u}_D - \mathbf{u}_{AD}) + \sum_\alpha \nu_{AD,\alpha} n_{AD} m_D (\mathbf{u}_\alpha - \mathbf{u}_{AD}),$$

$$\mathbf{M}_{AD} = S_{AD} m_D \mathbf{V}_{SAD},$$

$$X_{AD} = \frac{1}{2} S_{AD0} m_D V_{SAD}^2,$$

其中，$S_{AD}(\mathbf{x},t)$是给定的 NBI、SMBI、PI 等加料方式提供的<u>氘原子</u>“源”，而$\mathbf{V}_{SAD}$是这些“源”已经给定的速度时空分布，$\gamma_{DI}(\mathbf{x},t;n_e,T_e)$是氘原子的电离率（与电

子密度成正比），$m_D \approx m_{AD}$ 是氘原子（离子）的质量；

（2）氚原子：

$$C_{AT} = S_{AT} - \gamma_{TI} n_{AT} ,$$

$$\mathbf{R}_{AT} \equiv \gamma_{TI} n_{AT} m_T (\mathbf{u}_T - \mathbf{u}_{AT}) + \sum_{\alpha} \nu_{AT,\alpha} n_{AT} m_T (\mathbf{u}_\alpha - \mathbf{u}_{AT}) ,$$

$$\mathbf{M}_{AT} = S_{AT} m_T \mathbf{V}_{SAT} ,$$

$$X_T = \frac{1}{2} S_{AT0} m_T V_{SAT}^2$$

其中，$S_{AT}(\mathbf{x},t)$ 是给定的 NBI、SMBI、PI 等加料方式提供的<u>氚原子</u>“源”，而 $\mathbf{V}_{SAT}$ 是这些“源”已经给定的速度时空分布，$\gamma_{TI}(\mathbf{x},t;n_e,T_e)$ 是氚原子的电离率（与电子密度成正比），$m_T \approx m_{AT}$ 是氚原子（离子）的质量；

（3）氘离子：

$$C_D = \gamma_{DI} n_{AD} - \sigma_{DT} | \mathbf{u}_T - \mathbf{u}_D | n_T n_D ,$$

$$\mathbf{R}_D = \gamma_{DI} n_{AD} m_D (\mathbf{u}_{AD} - \mathbf{u}_D) - \sigma_{DT} | \mathbf{u}_T - \mathbf{u}_D | n_T n_D m_D \mathbf{u}_D + \sum_{\alpha} \nu_{D\alpha} n_D m_D (\mathbf{u}_\alpha - \mathbf{u}_D) ,$$

$$\mathbf{M}_D = 0 ,$$

$$X_D = 0 ,$$

其中，$\sigma_{DT} = \sigma_{DT}(\mathbf{x},t)$ 是氘氚聚变反应截面；

（4）氚离子：

$$C_T = \gamma_{TI} n_{AT} - \sigma_{DT} | \mathbf{u}_T - \mathbf{u}_D | n_T n_D ,$$

$$\mathbf{R}_T = \gamma_{TI} n_{AT} m_T (\mathbf{u}_{AT} - \mathbf{u}_T) - \sigma_{DT} | \mathbf{u}_T - \mathbf{u}_D | n_T n_D m_T \mathbf{u}_T + \sum_{\alpha} \nu_{T\alpha} n_T m_T (\mathbf{u}_\alpha - \mathbf{u}_T)$$

$$\mathbf{M}_T = 0 ,$$

$X_T = 0$；

（5）氦（4）离子（包括 alpha 粒子）：

$$C_{He} = \sigma_{DT} \, | \mathbf{u}_T - \mathbf{u}_D | \, n_T n_D,$$

$$\mathbf{R}_{He} = \sum_{\alpha} \nu_{He,\alpha} n_{He} m_{He} (\mathbf{u}_\alpha - \mathbf{u}_{He}),$$

$$\mathbf{M}_{He} = \sigma_{DT} \, | \mathbf{u}_T - \mathbf{u}_D | \, n_T n_D \langle \mathbf{V}_0 \rangle,$$

$$X_{He} = \sigma_{DT} \, | \mathbf{u}_T - \mathbf{u}_D | \, n_T n_D \varepsilon_0;$$

这里的 $\varepsilon_0 = 3.5$ MeV 是 alpha 粒子的能量，$\langle \mathbf{V}_0 \rangle$ 是当地 alpha 粒子生成后随机“发射”的平均动量。

（6）电子：

$$C_e = \gamma_{DI} n_{AD} + \gamma_{TI} n_{AT},$$

$$\mathbf{R}_e = \gamma_{DI} n_{AD} m_e (\mathbf{u}_{AD} - \mathbf{u}_e) + \gamma_{TI} n_{AT} m_e (\mathbf{u}_{AT} - \mathbf{u}_e) + \sum_{\alpha} \nu_{e\alpha} n_e m_e (\mathbf{u}_\alpha - \mathbf{u}_e),$$

$$\mathbf{M}_e = 0,$$

$$X_e = 0$$

欢迎大家参加！