

等离子体物理基础笔记

Slide 1: 物质的三种状态和等离子体

1. 物质的常见状态

我们通常熟悉物质的三种状态：

- **固体 (Solid)**: 粒子排列紧密, 如冰块 ($\text{H}_2\text{O}(\text{s})$)。
- **液体 (Liquid)**: 粒子可以流动, 如水 ($\text{H}_2\text{O}(\text{l})$)。
- **气体 (Gas)**: 粒子自由运动, 间距大, 如水蒸气 ($\text{H}_2\text{O}(\text{g})$)。

2. 物质的第四态: 等离子体 (Plasma)

- **来源**: 当气体被加热到极高温时 (例如 $\approx 10000^\circ\text{C}$) , 原子或分子会发生**电离 (Ionization)**。
- **组成**: 由大量自由移动的**带正电的离子 (Ions)** 和**带负电的电子 (Electrons)** 混合组成。
- **特性**:
 - 宏观上呈**电中性 (Quasi-neutral)**。
 - 由于存在自由电荷, 具有良好的**导电性 (Conductivity)**。
 - 通常会**发光 (Emits light)** (释放电磁波 电磁波) 。
- **实例**: 宇宙中的恒星 (恒星, 如太阳)、闪电 (闪电)、极光 (极光)。

3. 更广泛的定义

- **重点**: 一个系统, 只要包含足够多的、可以**自由移动的带电粒子 (带电粒子)**, 且这些粒子通过**电磁力 (电磁力)** 发生强烈的**集体相互作用 (Collective interaction)**, 就可以称为等离子体。
- 系统中也可能同时存在中性气体或粒子。

4. 总结

- **重点**: 等离子体常被称为**物质的第四种状态 (物质的第四种状态)**。
- 状态转变主要由**温度升高**驱动:
 - 0°C : 冰 \rightarrow 水
 - 100°C : 水 \rightarrow 水蒸气
 - $\approx 10000^\circ\text{C}$: 气体 \rightarrow 等离子体 (原子核/离子与电子分离)
- 简单说: 等离子体是物质在极高温下, 原子“散架”(原子“散架”)变成自由带电粒子的状态。

Slide 2: 火是等离子体吗？

1. 火焰的本质

- 火焰是物质形态变化的**过渡过程**。
- 释放**热量 (热量)** 和**光 (光)**。
- **重点：** 火焰是否为等离子体，取决于其**具体状态**，特别是**温度 (温度)** 和**电离程度 (电离程度)**。
火焰中确实有**少量**气体被电离 (**少量电离**)。

2. 蜡烛火焰示例

- 最高温度约 $\approx 1500^{\circ}\text{C}$ 。
- 不同区域：
 - **外焰 (外焰)**: 温度较高，充分燃烧 (氧化反应) 。
 - **内焰 (内焰)**: 温度中等，不完全燃烧，产生热辐射。
 - **焰心 (焰心)**: 未燃烧的可燃气体 (蜡烛蒸气) ， 温度最低。

3. 产生等离子体的条件

- 需要足够能量使气体原子/分子电离，即克服**电离能 (电离能)**。
- 通常需要达到**几个电子伏特 (eV)** 以上。
- **重点：** 能量换算关系： $1\text{ eV} \approx 11600^{\circ}\text{C}$ 的能量水平。

4. 结论

- 蜡烛火焰最高温度 ($\approx 1500^{\circ}\text{C}$) 远低于产生显著电离所需的温度 (等效于上万 $^{\circ}\text{C}$ 或几个 eV) 。
- **重点：** 因此，普通火焰 (如蜡烛、打火机) **通常不被认为是真正的等离子体 (通常不被认为是真正的等离子体)**。虽然可能有微量电离，但其主要成分是高温的、正在发生化学反应的气体分子。
- 存在特殊的高温火焰，如**等离子体炬 (等离子体炬)**，可以达到等离子体状态。

Slide 3: 各种各样的等离子体

1. 分类依据 (温度-密度图)

- **横轴 (X-axis):** 粒子数密度 (粒子数密度, n), 单位 m^{-3} 。表示等离子体的“拥挤”程度。
- **纵轴 (Y-axis):** 温度 (温度, T), 单位 K (开尔文)。表示等离子体的“热”度。
- **重点:** 通常使用**对数坐标 (Logarithmic scale)**, 以显示极大的参数范围。

2. 等离子体的普遍性

- **重点:** 宇宙中可观测物质的 **> 99%** 处于等离子体状态 (Ref: F. F. Chen)。

3. 等离子体实例

- **自然界:**
 - 星云 (Nebula)
 - 太阳 (太阳): 日冕 (日冕)、太阳核心 (太阳核心)
 - 太阳风 (太阳风)
 - 极光 (极光)
 - 闪电 (闪电)
- **实验室/人造:**
 - 受控核聚变 (受控核聚变):
 - 磁约束聚变 (磁约束聚变, 如 Tokamak)
 - 惯性约束聚变 (惯性约束聚变, 如 Laser Fusion)
 - 放电现象:
 - 电弧放电 (Arc discharge)
 - 辉光放电 (Glow discharge)
 - 霓虹灯 (Neon sign)、荧光灯 (Fluorescent light)

4. 图表解读

- 图表将各种等离子体按其温度 T 和密度 n 定位。
- **左下角 (低 T , 低 n):** 星际空间 (星际空间), 极光 (极光)
- **中间区域:** 太阳风 (太阳风), 星云 (星云), 火焰 (火焰), 气体放电灯
- **向右/上 (更高 T/n):** 闪电 (闪电), 日冕 (日冕) (高 T , 相对低 n)
- **右上角 (高 T , 高 n):** 太阳核心 (太阳核心), 核聚变实验 (核聚变实验)
- **右下角:** 固体、液体、气体区域, 通常“太冷且太密集”, 不满足经典等离子体条件。

5. 总结

等离子体形态多样，遍布宇宙和实验室，跨越极大的温度和密度范围。 T 和 n 是分类和研究等离子体的关键参数。

Slide 4: 例1：太阳等离子体的内部

1. 核心信息

- **重点：** 太阳是一个由自身巨大**引力 (引力)** 束缚的**等离子体球**。

2. 内部结构分层 (从内到外)

1. 核心区 (Core, 核):

- 半径 $\approx 0.2R_{\odot}$ (R_{\odot} 为太阳半径)。
- **重点：** 通过**核聚变反应 (核聚变反应)**，主要是**质子-质子链反应 (pp-chain, 质子-质子链反应)**，将氢 (H) 聚变成氦 (He)，产生巨大**能量 (能量)**。
- 温度和压力极高。

2. 辐射层 (Radiative Zone, 辐射层):

- 核心外部。
- 能量主要通过**辐射 (辐射)** (光子 光子 的吸收和再发射) 向外传递。
- **重点：** 能量传递极其缓慢，需**数十万年 (数十万年)**。

3. 差旋层 / 快变层 (Tachocline, 差旋层 / 快变层):

- 辐射层与对流层之间的**薄剪切层 (Shear layer)**。
- 太阳内部自转速率发生剧烈变化。
- 对太阳**磁场 (磁场)** 的产生可能起重要作用。

4. 对流层 (Convective Zone, 对流层):

- 辐射层外部，接近可见表面。
- 能量主要通过**对流 (对流)** (类似沸水翻滚) 传递。热等离子体上升，冷却后下降，形成对流元胞 (如**贝纳尔对流 贝纳尔对流**)。
- 能量传递相对快速。

5. 光球 (Photosphere, 光球):

- 我们能看到的**太阳可见表面**。
- 温度 $\approx 6000\text{ K}$ 。
- 太阳黑子 (太阳黑子)、米粒组织 (米粒组织) 等现象发生在此层。

3. 总结

太阳是一个巨大的等离子体系统，其内部结构复杂。能量在核心通过核聚变产生，并通过辐射和对流方式缓慢传递到表面。

Slide 5: 例1 续：pp链（太阳内部的热核聚变）

1. 质子-质子 (pp) 链式反应

- 太阳等质量恒星的主要能量来源。
- **基本原理：**
 - 两个质子 (p) 聚变。
 - **重点：** 聚变产物的总质量小于反应物总质量，发生**质量亏损** (质量亏损, Δm)。
 - 根据爱因斯坦质能方程 $E = \Delta mc^2$ ，亏损的质量转化为巨大**能量** (能量) (主要为光子 γ 和中微子 ν 的能量)。

2. 关键步骤

- **图解说明 (主要分支 pp-I):**
 - 第一步 (发生两次):**
$$p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e$$
(两个质子聚变成一个氘核 D ，释放一个正电子 e^+ 和一个电子中微子 ν_e)。
(注: e^+ 会迅速与电子 e^- 湮灭产生伽马射线 $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$)
 - 第二步 (发生两次):**
$$D + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$$
(氘核 D 与一个质子 p 聚变成一个氦-3核 ${}^3\text{He}$ ，释放一个伽马光子 γ)。
 - 第三步:**
$${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p + p$$
(两个氦-3核 ${}^3\text{He}$ 聚变成一个氦-4核 ${}^4\text{He}$ ，并释放出两个质子 p)。
(注: 图中提及了一个中间步骤 ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^6\text{Be}^* \rightarrow {}^4\text{He} + p + p$ ，其中 ${}^6\text{Be}^*$ 是不稳定的铍-6)。
- **净效果:** $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + \text{Energy}$ 。释放的两个质子可继续参与反应。

3. 其他核聚变过程

- 在质量更大或演化后期的恒星中，还存在**CNO循环** (CNO循环) 等更复杂的聚变反应，利用碳 (C)、氮(N)、氧(O)作为催化剂。

4. 总结

pp链是通过多步核反应，将4个氢核（质子）转化为1个氦核，并将质量亏损转化为能量的过程，是太阳能量的主要来源。

Slide 6: 例1 续：太阳表面的等离子体

1. 太阳外部大气层 (从内向外)

- **彩层 (Chromosphere, 彩层):**
 - 光球之上。
 - 温度 $\approx 5000\text{ K}$ 。
 - 日食时可见其彩色边缘。
- **日冕 (Corona, 日冕):**
 - 最外层，极其稀薄的等离子体大气。
 - 温度极高，可达 $\approx 10^6\text{ K}$ (百万开尔文)。
 - **重点：日冕异常高温之谜 (日冕加热机制)** 是太阳物理学前沿问题。为什么日冕比其下方的光球/彩层热得多？
- **太阳风 (Solar wind, 太阳风):**
 - 从高温日冕持续流出的带电粒子流（等离子体）。
 - 充斥太阳系，对行星环境（如**地球环境** 地球环境）产生影响（如极光、地磁暴）。

2. 阿尔芬波与日冕加热

- **观测图像:** 显示太阳边缘动态的等离子体结构（日珥），尺度 $\sim 10^4\text{ km}$ 。
- **阿尔芬波 (Alfvén waves):** 图像标题指出观测到太阳边缘的阿尔芬波（一种沿磁力线传播的等离子体波）。
- **研究关联 (引文: Science, Okamoto et al., 2007):**
 - **重点：** 等离子体特有的**磁流体 (MHD) 不稳定性/波动 (磁流体不稳定性/波动)**，如阿尔芬波，被认为是**日冕加热的候选机制 (日冕加热的候选机制)** 之一。这些波动可能将能量从太阳内部/表面输运并耗散到日冕中。

3. 总结

太阳外部大气（彩层、日冕）及太阳风也是活跃的等离子体区域。日冕的百万度高温是一个待解难题，可能与阿尔芬波等MHD现象有关。

Slide 7: 例2: 受控热核聚变等离子体

1. 目标与动机

- 在地球上**模拟恒星内部的热核聚变反应** (恒星内部热核聚变反应)。
- 目的是**应用于发电** (发电), 获取清洁、可持续能源 (“人造小太阳” 人造小太阳) 。

2. 聚变燃料的选择

- **重点: 氘-氚 (Deuterium-Tritium, D-T) 反应** (D-T反应) 是目前最有希望的第一代聚变反应堆候选方案。
 - 氘 (D) 和氚 (T) 是氢 (H) 的**同位素** (同位素)。
 - $D = {}^2\text{H}$ (1质子, 1中子), $T = {}^3\text{H}$ (1质子, 2中子)。
- **原因:** 在可行温度下 (约 $10^8 - 10^9$ K) , D-T聚变的**反应率** (反应率, $\langle\sigma v\rangle$) 远高于其他轻核聚变反应 (如太阳中的 p-p 反应) 。(见左下角 **Fusion Rate Coefficients** 图表对比)。

3. D-T 聚变反应过程

- **反应式:** $D + T \rightarrow {}^4\text{He} (3.5 \text{ MeV}) + n (14.1 \text{ MeV})$
- **过程:**
 - i. 将氘核 (D) 和氚核 (T) 加热到极高温 (如离子平均能量 $\approx 20 \text{ keV}$, 对应 $\approx 2 \times 10^8 \text{ K}$), 形成 D-T 等离子体。
 - ii. 高温使得 D 和 T 克服库仑斥力发生聚变。
 - iii. 产生一个氦-4核 (${}^4\text{He}$, 也称 α 粒子) 和一个高能中子 (n)。
 - iv. **重点:** 释放的巨大能量 ($\approx 17.6 \text{ MeV}$) 主要体现为产物的高动能。发电需要捕获这些能量 (特别是中子的能量) 。

4. 能量单位

- $1 \text{ eV} \approx 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
- $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$
- $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$
- 平均动能 1 eV 对应温度 $\approx 11600 \text{ K}$ 。

5. 总结

受控核聚变旨在利用 D-T 反应在地球上发电。选择 D-T 是因为其在可行温度下反应率最高。反应产生 α 粒子和高能中子，释放大量能量。

Slide 8: 例2 续：核聚变发电的机制/构造 (能量平衡)

1. 核心概念：功率平衡 (Power Balance)

- 要实现净能量输出，必须仔细考虑能量的输入与输出。

2. 关键功率项

- P_H : **加热功率 (Heating Power, 加热功率)** - 输入到等离子体以维持高温的功率。
- P_L : **功率损失 (Power Loss, 功率损失)** - 等离子体通过各种途径（如辐射 韧致辐射、热传导、对流等）损失能量的功率。
- P_{fus} : **核聚变输出功率 (Thermonuclear Power, 核聚变输出功率)** - 由聚变反应本身产生的功率。
- P_{out} : **总输出热功率 (Total Output Power, 总输出功率)** - 离开等离子体的总热功率。
 $P_{\text{out}} = P_{\text{fus}} + P_L$ 。这部分热量可用于驱动发电机。
- η : **发电效率 (Generation Efficiency, 发电效率)** - 将热功率 P_{out} 转化为电能的效率 ($\eta < 1$, 通常 $\approx 0.3 - 0.4$)。
- ηP_{out} : **最终发电功率 (Generated Power, 发电功率)** - 实际输出的可用电功率。

3. 核聚变发电炉的成立条件

- 重点：** 只有当最终产生的**电功率** (ηP_{out}) 大于为了维持等离子体而**输入的加热功率** (P_H) 时，该装置才能实现净能量增益，成为真正的发电炉。
- 数学条件:** $P_H < \eta P_{\text{out}}$
- 能量流程图 (右侧):** 清晰展示了能量从 P_H 输入，等离子体产生 P_{fus} 并损失 P_L ，总热功率 P_{out} 输出到发电机，最终条件是 $P_H < \eta P_{\text{out}}$ 。

4. 总结

核聚变发电的关键在于实现**净能量增益**，即输出的电能必须大于维持反应所需的输入能量，这要求满足 $P_H < \eta P_{\text{out}}$ 的功率平衡条件。

Slide 9: 例2 续：核聚变发电的条件 (劳伦斯判据)

1. 推导能量增益条件

- 将具体的物理表达式代入功率平衡条件 $P_H < \eta P_{\text{out}}$ 。
- 假设维持稳态需 $P_H \approx P_L$ 。
- 功率损失 P_L 包括：
 - 轫致辐射损失: $\propto n^2 T^{1/2}$
 - 能量约束损失: $\propto \frac{n k_B T}{\tau_E}$ (其中 k_B 是玻尔兹曼常数)
 - **重点:** τ_E 是**能量约束时间 (Energy Confinement Time, 能量约束时间)**, 表示能量在等离子体中保持的特征时间, 越长越好。
- 聚变功率 $P_{\text{fus}} \propto n^2 \langle \sigma v \rangle (T)$, 其中 $\langle \sigma v \rangle$ 是聚变反应率参数 (Reactivity), 强烈依赖于温度 T 。
- 代入并整理, 得到关于等离子体参数 n (密度), τ_E (能量约束时间), T (温度) 的不等式。

2. 劳伦斯判据 (Lawson Criterion)

- **重点:** 上述不等式最终形式通常表示为**劳伦斯判据 (劳伦斯判据)**。它给出了实现能量增益所需的条件。
- 常见形式是要求**聚变三重积 (Fusion Triple Product) $n\tau_E T$** 达到某个阈值, 或者更基本地, 要求劳伦斯参数 $n\tau_E$ 在给定温度 T 和效率 η 下超过一个阈值:
$$n\tau_E > f(T, \eta)$$
- **物理意义:** 必须同时达到足够高的**密度 n** 、足够长的**能量约束时间 τ_E** 和足够高的**温度 T** , 它们的某种组合 (如 $n\tau_E$ 或 $n\tau_E T$) 必须超过一个临界值, 才能实现净能量输出。

3. 劳伦斯图 (Lawson Plot)

- **坐标轴:** 纵轴 $n\tau_E$ (单位 m^{-3}s), 横轴 T (单位 keV), 均为对数坐标。
- **曲线:** 表示达到某个目标 (如能量收支平衡或点火) 所需的 $n\tau_E$ 阈值随温度 T 的变化。
 - 曲线呈 "U" 形, 表明存在**最佳工作温度范围** (对 D-T 约 10 – 20 keV), 此时所需的 $n\tau_E$ 最小。
- **数据点:** 显示不同实验装置 (▲ 惯性约束, ● 磁约束) 达到的参数。
- **目标:** 推动实验点向图的**右上方向移动**, 最终**超越**目标曲线, 进入净能量增益区域。

4. 总结

劳伦斯判据 ($n\tau_E > \text{阈值}$) 是衡量聚变研究进展和判断能否实现发电的关键量化标准, 需要同时优化温度 T 、密度 n 和能量约束时间 τ_E 。

Slide 10: 例2 续：能量约束时间 (Energy Confinement Time)

1. 物理模型与推导

- 考虑等离子体系统总能量 W ，持续输入加热功率 P_H (设为常数)，能量损失功率 P_L 。
- 简化假设：** P_L 与 W 成正比， $P_L = AW$ ，其中 A 为常数。（暂时忽略辐射损失）
- 能量平衡微分方程：**
$$\frac{dW}{dt} = P_H - P_L = P_H - AW$$
- 初始条件：** $W(t=0) = 0$ 。
- 求解方程：**
$$W(t) = \frac{P_H}{A}(1 - e^{-At}) = P_H \tau_E (1 - e^{-t/\tau_E})$$
其中定义了时间常数 $\tau_E = 1/A$ 。

2. 稳态分析

- 当 $t \rightarrow \infty$ (达到稳态), $e^{-t/\tau_E} \rightarrow 0$ 。
- 稳态能量 $W_{\text{steady}} = P_H \tau_E$ 。
- 在稳态下, $dW/dt = 0$, 因此 $P_H = P_L = AW_{\text{steady}}$ 。
- 代入 W_{steady} , 得到 $P_H = P_L = \frac{W_{\text{steady}}}{\tau_E}$ 。

3. 能量约束时间的定义与意义

- 重点：** 上述推导中出现的时间常数 τ_E 被称为**能量约束时间 (Energy Confinement Time, 能量约束时间)**。
- 物理定义：** 在稳态下, $\tau_E = \frac{W}{P_L}$ (W 为稳态总能量)。
- 物理意义：**
 - 它是等离子体中储存的总能量 W 与能量损失速率 P_L 的比值。
 - 可以理解为：如果停止加热，等离子体以当前速率 P_L 损失能量，大约需要 τ_E 的时间损失掉其全部能量 W 。
 - 重点：** τ_E 是衡量等离子体**约束性能好坏**的关键指标。 τ_E 越长，能量泄漏越慢，约束效果越好（类似保温瓶的保温时间）。

4. 总结

能量约束时间 τ_E 量化了等离子体维持其能量（热量）的能力，是劳伦斯判据 (n, T, τ_E) 中的关键参数之一。提高 τ_E 是实现聚变能的主要挑战。

Slide 11: 磁约束聚变：托卡马克与ITER

1. 基本原理：磁约束 (Magnetic Confinement)

- 利用强大的**磁场 (磁场)** 来约束高温 ($\sim 10^8$ K) 等离子体。
- 原理：带电粒子在磁场中会沿着**磁力线 (磁力线)** 螺旋运动。
- 目的：将等离子体限制在真空室中心，避免接触器壁而冷却，实现长时间约束。形成“**磁笼子 (磁笼子)**”。

2. 托卡马克 (Tokamak, 托卡马克)

- 目前最有希望实现磁约束聚变的装置构型。
- 核心是一个**环形 (Toroidal, 环形)** 真空室。
- 通过外部线圈产生强大的**环向磁场 (Toroidal field)** 和 等离子体自身电流产生的**极向磁场 (Poloidal field)**，共同形成螺旋状的磁力线来约束等离子体。

3. ITER (国际热核聚变实验堆)

- **重点：世界上最大的托卡马克 (世界上最大的托卡马克) 实验装置。**
- 由中、欧、印、日、韩、俄、美等七方合作，在**法国卡达拉舍 (法国卡达拉舍)** 建造。
- **目标：**验证大规模、长脉冲、可控核聚变的科学和工程**可行性 (可行性)**，特别是实现 $Q \geq 10$ (聚变输出功率 P_{fus} 是输入加热功率 P_H 的10倍)。**ITER本身不是发电站**，而是为未来的商业聚变电站 (DEMO) 铺路。
- **在劳伦斯图上的位置：****重点：** ITER 的目标参数 (n, T, τ_E) 远超以往任何装置，旨在达到**接近或满足商业反应堆条件的水平** (见右下角图表红色区域)。

4. 总结

磁约束利用强磁场控制等离子体。托卡马克是主流设计。ITER是关键的国际合作项目，旨在验证托卡马克实现聚变能的技术可行性，代表了该领域的前沿。

Slide 12: 惯性约束聚变：激光与NIF

1. 基本原理：惯性约束 (Inertial Confinement Fusion, ICF)

- 利用**强大的能量束** (通常是**激光 激光束**，或粒子束) 瞬间轰击一个微小的**燃料靶丸 (靶丸)**。

- 能量束使靶丸表面物质**烧蚀 (Ablation)** 并向外喷射。
- 根据动量守恒 (“火箭效应”)，产生巨大的向内压力，将靶丸**极速压缩 (极速压缩)** 到极高**密度 (密度)** ($\sim 1000 \times$ 固体密度) 和**温度 (温度)** ($\sim 10^8$ K)。
- 在靶丸因自身压力而“爆炸”飞散之前 (持续时间仅**纳秒 纳秒** 量级)，利用燃料自身的**惯性 (惯性)** 将其约束住足够长的时间，以完成聚变反应。

2. 主要驱动方式

- (a) **直接驱动 (Direct Drive, 直接驱动)**: 激光束直接、均匀地照射在靶丸表面进行压缩。(图a)
- (b) **间接驱动 (Indirect Drive, 间接驱动)**: 激光束照射在一个称为**腔靶 (Hohlraum, 腔靶)** 的小金属 (如金 Au) 圆柱内壁。内壁被加热产生强烈的**X射线 (X射线)**。这些X射线再均匀地照射并压缩位于腔靶中心的燃料靶丸。(图b及右侧大图) 压缩更均匀。

3. NIF (国家点火装置)

- **重点**: 美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的 NIF (National Ignition Facility) 是**世界上最大的激光核聚变装置**。
- 采用**间接驱动**方式。
- **靶标结构**: 192束激光从两端注入金制**腔靶 (Au hohlraum)**。中心悬挂直径约 2 mm 的燃料靶丸，内层是**氘-氚 (D-T) 冰层 (D-T冰层)**，外层是烧蚀层 (如CH)。
- **重大突破 重点**: NIF 在 2021-2022 年的实验中首次实现了**点火 (Ignition, 点火)**，即**核聚变产生的能量 (E_{out}) 超过了注入到靶丸上的激光能量 ($E_{laser-to-capsule}$)** ($Q_{capsule} > 1$)。这是ICF研究的里程碑。

4. 总结

惯性约束利用激光等能量束瞬间压缩燃料靶丸实现聚变。主要有直接和间接驱动两种方式。美国的NIF装置已利用间接驱动率先实现了实验室“点火”。

Slide 13: 等离子体湍流与带状流

1. 问题：湍流 (Turbulence, 乱流)

- 聚变等离子体中普遍存在类似流体漩涡的混乱、随机运动，称为**湍流 (乱流)**。
- **危害**: 湍流会导致热量和粒子从等离子体核心区域快速向边缘**输运 (Transport)**，造成能量损失，降低**能量约束时间 (τ_E)**，阻碍聚变实现。

2. 现象：带状流 (Zonal Flow, 带状流)

- 等离子体中可以自发产生的一种**大尺度的、空间结构规则的**（通常是环向或极向对称的）、**缓慢变化的流动结构**。
- 可以看作是在湍流背景下产生的有序流动层或剪切层。

3. 作用：抑制湍流

- **重点：**带状流可以通过其**剪切效应 (Shearing effect)** 与小尺度的**湍流涡旋 (Turbulent eddies)** 相互作用。
- **机制：**带状流能够有效地**拉伸和撕裂 (Stretch and tear)** 较大的、输运效率高的湍流涡旋，将它们打碎成**尺度更小、输运效率更低的涡旋**。
- **结果：**抑制了由湍流引起的**能量和粒子输运**，有助于提高等离子体的约束性能。

4. 模拟对比 (图A vs 图B)

- **图 (A) 有带状流：**湍流结构显得**尺度小、破碎**。
- **图 (B) 无带状流：**湍流结构显得**尺度大、连贯**。
- 直观展示了带状流对湍流结构的抑制作用。

5. 总结

湍流是影响聚变等离子体约束的主要障碍之一。等离子体中自发产生的带状流结构能够有效抑制湍流，改善能量约束，是提高聚变装置性能的关键物理机制。

Slide 14: 带状流产生的实验观测

1. 研究目标

- 通过**实验观测**揭示**带状流的产生机制**。
- 确定**湍流与带状流**之间如何通过**非线性相互作用 (非线性相互作用)** 进行**能量传递 (Energy transfer)**。

2. 实验技术与分析

- **测量：**在托卡马克等装置中测量等离子体参数的波动（如电势、密度）。
- **频谱分析 (Spectral Analysis)：**

- **自功率谱 (Autopower):** 显示不同频率波动的强度。可以识别出代表湍流的**漂移波 (Drift wave, DW)** (通常频率较高) 和代表**带状流的测地声模 (Geodesic Acoustic Mode, GAM)** (频率较低)。
- **重点: 高阶谱分析 (Higher-order Spectral Analysis):**
 - **拜协谱/双相干谱 (Bicoherence):** 用于检测不同频率成分之间的**三波耦合 (Three-wave coupling)**, 即非线性相互作用。图中亮斑表示频率 f_1 (如DW) 和 f_2 (如DW) 的波动相互作用产生了频率 $f_3 = f_1 \pm f_2$ (如GAM) 的波动。这是**非线性相互作用的直接证据**。
- **能量传递函数 (Energy Transfer Function):**
 - 通过分析实验数据计算得到。
 - **重点:** 显示了**能量在不同类型波动 (如湍流和带状流) 之间传递的方向和速率**。
 - 实验结果 (左图) 显示, 在特定区域, 能量主要是从**漂移波 (DW) 流向 带状流 (ZV/GAM)** (Positive: DW --> ZV)。

3. 结论

- 实验**直接观测**到了湍流 (DW) 和带状流 (GAM) 的共存。
- **重点:** 通过拜协谱和能量传递函数分析, 实验**证实了湍流可以通过非线性相互作用将能量传递给带状流, 从而驱动带状流的产生**。
- 这为理解等离子体自组织行为和发展湍流控制策略提供了关键依据。

4. 总结

实验研究利用先进的信号处理技术, 成功观测并证实了等离子体中湍流产生带状流的非线性过程, 揭示了这种自发抑制湍流机制的来源。

Slide 15 & 16: 等离子体基本参数 (德拜长度与等离子体振荡)

1. 等离子体的特征参数 (Slide 15)

介绍几个描述等离子体基本行为的关键物理量:

- **德拜长度 (Debye Length, λ_D):**
 - **重点:** 描述等离子体中**电荷屏蔽效应 (屏蔽效应)** 的特征**距离尺度**。
 - 一个带电粒子产生的电场在等离子体中只能影响约 λ_D 的范围, 之外就被周围反号电荷屏蔽了。
 - 反映等离子体维持宏观**准中性 (准中性)** 的能力。

- **等离子体振荡 (Plasma Oscillation):**

- **重点:** 等离子体最基本的**集体行为** (集体行为)。
- 当电子相对于离子发生位移时, 产生的恢复力导致电子以特定频率**等离子体频率 (ω_p)** 进行集体振荡。

- **碰撞 (Collisions, 碰撞):**

- 粒子间的相互作用。
- **碰撞时间 (τ_c):** 平均两次碰撞间隔的时间。
- **平均自由程 (λ_{mfp}):** 平均两次碰撞间自由运动的距离。
- 影响电阻、扩散、热导等输运过程。

2. 电势的屏蔽效果: 德拜屏蔽 (Debye Shielding) (Slide 16)

详细解释德拜长度关联的现象:

- **场景:** 在准中性等离子体中, 放入一个正离子 (电荷 $+Ze$)。
- **关键:** 电子质量远小于离子 ($m_e \ll m_i$), 即使温度相当 ($T_e \approx T_i$), 电子热速度远大于离子 ($v_{th,e} \gg v_{th,i}$)。电子快速运动, 离子近似静止。
- **机制:** 处于热平衡 (热平衡) 的快速电子感受到正离子的吸引电场。
- **结果:**
 - **重点:** 从统计上看, 更多电子会**聚集 (Accumulate)** 在正离子周围, 形成一个**负电荷云 (Electron cloud)**。
 - 这个电子云部分**抵消 (Cancel out)** 了中心正离子的电场。
 - **重点:** 导致中心离子的电势被**屏蔽 (Screened)**。其影响范围被限制在**德拜长度 λ_D** 左右, 变成**短程力 (Short-range force)**, 而不再是长程的库仑力。

3. 总结

德拜长度 λ_D 是等离子体中电荷屏蔽的特征距离。等离子体振荡 (ω_p) 是其基本集体行为。碰撞 (τ_c, λ_{mfp}) 影响输运。德拜屏蔽是由于自由电子重新分布以屏蔽外加电荷而产生的效应。

Slide 17: 德拜长度的推导 (λ_D)

1. 问题设定

- 计算位于原点、电荷为 Ze 的离子周围的**电势分布 (Φ)**。

2. 电子响应：麦克斯韦-玻尔兹曼分布

- 假设电子处于热平衡，遵循**麦克斯韦-玻尔兹曼分布** (麦克斯韦-玻尔兹曼分布)。
- 在电势为 Φ 处，电子密度 n_e 为：

$$n_e = n_{e0} \exp\left(\frac{-q_e \Phi}{k_B T_e}\right) = n_{e0} \exp\left(\frac{e \Phi}{k_B T_e}\right)$$

(n_{e0} 是背景电子密度, $q_e = -e$ 是电子电荷, k_B 是玻尔兹曼常数, T_e 是电子温度)。

- 重点：线性化近似 (Linearization):** 假设电势能远小于热能 ($|e \Phi| \ll k_B T_e$), 则 $\exp(x) \approx 1 + x$ 。

$$n_e \approx n_{e0} \left(1 + \frac{e \Phi}{k_B T_e}\right)$$

3. 泊松方程 (Poisson's Equation)

- 电势 Φ 与电荷密度 ρ 的关系: $\nabla^2 \Phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$ (ϵ_0 是真空介电常数)。

- 总电荷密度 $\rho = (\text{离子电荷}) + (\text{电子电荷})$

$$\rho = Ze\delta(\mathbf{r}) + q_e n_e = Ze\delta(\mathbf{r}) - en_e$$

($\delta(\mathbf{r})$ 是狄拉克函数, 表示离子在原点)。

- 代入近似的 n_e :

$$\rho \approx Ze\delta(\mathbf{r}) - en_{e0} \left(1 + \frac{e \Phi}{k_B T_e}\right)$$

- 由于背景是准中性的 (背景离子电荷 $+en_{e0}$ 被 $-en_{e0}$ 抵消), 我们只关心扰动:

$$\nabla^2 \Phi \approx -\frac{Ze\delta(\mathbf{r})}{\epsilon_0} + \frac{n_{e0}e^2}{\epsilon_0 k_B T_e} \Phi$$

4. 屏蔽泊松方程与德拜长度

- 整理方程得到**屏蔽泊松方程 (Screened Poisson Equation)**:

$$\nabla^2 \Phi - \left(\frac{n_{e0}e^2}{\epsilon_0 k_B T_e}\right) \Phi = -\frac{Ze\delta(\mathbf{r})}{\epsilon_0}$$

- 重点：定义德拜长度 λ_D :**

$$\frac{1}{\lambda_D^2} \equiv \frac{n_{e0}e^2}{\epsilon_0 k_B T_e}$$

- 方程写为: $\nabla^2 \Phi - \frac{1}{\lambda_D^2} \Phi = -\frac{Ze\delta(\mathbf{r})}{\epsilon_0}$

- 重点：德拜长度公式:**

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_{e0} e^2}}$$

- 依赖关系:**

- $\lambda_D \propto \sqrt{T_e}$ (温度越高, 屏蔽越弱, λ_D 越长)

- $\lambda_D \propto 1/\sqrt{n_{e0}}$ (密度越高, 屏蔽越强, λ_D 越短)

5. 总结

通过结合电子热平衡分布和泊松方程，并进行线性化处理，推导出了德拜长度 λ_D 的表达式，它是等离子体温度和密度的函数。

Slide 18: 屏蔽泊松方程的解 (汤川势)

1. 方程求解

- 求解屏蔽泊松方程： $\nabla^2 \Phi - \frac{1}{\lambda_D^2} \Phi = -\frac{Ze\delta(\mathbf{r})}{\epsilon_0}$
- 考虑边界条件：
 - 当 $r \rightarrow \infty$ 时， $\Phi \rightarrow 0$ 。
 - 当 $r \rightarrow 0$ 时， Φ 应接近库仑势 $Ze/(4\pi\epsilon_0 r)$ 。

2. 解的形式：汤川势 (Yukawa Potential)

- 重点：** 方程的解为：

$$\Phi(r) = \frac{Ze}{4\pi\epsilon_0 r} e^{-r/\lambda_D}$$

- 这个势被称为**汤川势** (汤川势) 或 **屏蔽库仑势** (Screened Coulomb Potential)。

3. 势的特点

- 它由两部分组成：
 - $\frac{Ze}{4\pi\epsilon_0 r}$: **库仑势 (Coulomb Potential)**，随距离按 $1/r$ 缓慢衰减（长程力）。
 - e^{-r/λ_D} : **指数衰减因子 (Exponential decay factor)**，随距离按指数形式快速衰减。
- 结果：** 由于指数衰减因子的存在，汤川势是一个**短程势 (Short-range potential)**，其有效作用范围约为**德拜长度 λ_D** 。

4. 图示解释

- 图示对比了库仑势 ($1/r$) 和汤川势 ($e^{-r/\lambda_D}/r$)。
- 在 $r \ll \lambda_D$ 时，两者接近。
- 在 $r \gtrsim \lambda_D$ 时，汤川势迅速减小到零，而库仑势仍然显著。
- 这直观地展示了**德拜屏蔽效应**：等离子体中的电场作用被限制在 λ_D 范围内。

5. 总结

等离子体中单个电荷产生的电势不再是长程的库仑势，而是短程的汤川势，其特征衰减长度为德拜长度 λ_D 。这定量描述了德拜屏蔽现象。

Slide 19: 等离子体参数：屏蔽的条件

1. 德拜屏蔽的适用条件

- 德拜屏蔽是一种**集体效应 (Collective effect)**，需要足够多的粒子参与。
- 考虑一个半径为 λ_D 的球（**德拜球 Debye Sphere**），其体积约为 $\frac{4}{3}\pi\lambda_D^3$ 。
- 重点：**德拜屏蔽的图像成立的条件是，**德拜球内的粒子数 N_D 必须远大于 1**。
$$N_D = n_e \times (\text{Debye Sphere Volume}) \approx n_e \lambda_D^3 \gg 1$$

(这里的 n_e 是电子密度，通常电子起主要屏蔽作用)。
- 如果 $N_D < 1$ ，则统计平均的屏蔽云无法形成。

2. 等离子体参数 (Plasma Parameter)

- 重点：定义等离子体参数 g ：**
$$g = \frac{1}{N_D} \approx \frac{1}{n_e \lambda_D^3}$$
- 则德拜屏蔽条件 $N_D \gg 1$ 等价于 $g \ll 1$ 。
- 物理意义：** g 大致是**相邻粒子间的平均库仑相互作用能与粒子平均热动能之比**。
$$g \sim \frac{\text{Potential Energy}}{\text{Kinetic Energy}} \sim \frac{e^2 / (\epsilon_0 \langle r \rangle)}{k_B T_e}$$

($\langle r \rangle \sim n_e^{-1/3}$ 是平均粒子间距)。
- $g \ll 1$ 定义了**弱耦合等离子体 (Weakly coupled plasma, 弱耦合等离子体)**。在这种等离子体中，粒子动能远大于相互作用能，粒子行为接近自由运动，碰撞效应相对较弱，集体行为占主导。
德拜屏蔽理论适用于弱耦合等离子体。
- $g \gtrsim 1$ 则对应**强耦合等离子体 (Strongly coupled plasma)**，粒子间相互作用强，行为复杂，德拜屏蔽理论不再适用。

3. 参数命名

- 重点：** g 或 $\Lambda_c = 4\pi N_D = 4\pi n_e \lambda_D^3$ (注意与库仑对数中的 Λ 不同) 等都被称为**等离子体参数 (等离子体参数)**。具体定义可能因文献而异。

4. 总结

德拜屏蔽的有效性取决于等离子体参数 $g \ll 1$ (或 $N_D \gg 1$)，这定义了弱耦合等离子体，是大多数实验室和空间等离子体的状态。

Slide 20: 等离子体频率、德拜长度穿越时间

1. 电子穿越德拜长度的时间 τ

- 电子的特征热速度 $v_{th,e} \approx \sqrt{k_B T_e / m_e}$ 。
- 电子穿越距离 λ_D 所需时间 τ :
$$\tau = \frac{\lambda_D}{v_{th,e}} = \lambda_D \sqrt{\frac{m_e}{k_B T_e}}$$
- 这个时间 τ 可视为电子响应电场扰动、建立起德拜屏蔽所需的**特征响应时间**。

2. 响应时间与等离子体频率 ω_{pe} 的关系

- 一个物理过程的特征频率 ω 通常与特征时间 τ 成反比: $\omega \sim 1/\tau$ 。
- 计算 $\omega = 1/\tau = v_{th,e}/\lambda_D$:

$$\omega = \sqrt{\frac{k_B T_e}{m_e}} / \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_e e^2}}$$

- **重点:** 化简得到:

$$\omega = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}$$

- 这恰好就是**电子等离子体频率 (Electron Plasma Frequency)**，记作 ω_{pe} 。
- **深刻联系:** 电子等离子体振荡频率 ω_{pe} 正是电子集体响应电场、建立德拜屏蔽这一基本过程的特征频率。

3. ω_{pe} 的物理意义: 截止频率 (Cutoff Frequency)

- **重点:** 电磁波在等离子体中传播时, ω_{pe} 扮演着**截止频率 (截止频率)**的角色。
 - 当电磁波频率 $\omega < \omega_{pe}$ 时, 等离子体中的电子有足够时间响应并**屏蔽**掉电磁波的电场, 导致电磁波**无法传播** (被反射或吸收)。
 - 当电磁波频率 $\omega > \omega_{pe}$ 时, 电子响应跟不上电场变化, 屏蔽不完全, 电磁波可以**穿透**等离子体传播。
- **实例:** 地球电离层反射短波无线电信号。

4. 离子等离子体频率 ω_{pi}

- 类似地，可以定义**离子等离子体频率 (Ion Plasma Frequency)**:

$$\omega_{pi} = \sqrt{\frac{n_i(Ze)^2}{\epsilon_0 m_i}}$$

(n_i, Z, m_i 分别为离子密度、电荷数、质量)。

- 由于 $m_i \gg m_e$, 通常 $\omega_{pi} \ll \omega_{pe}$ 。离子响应比电子慢得多。

5. 总结

电子穿越德拜长度的时间的倒数即为电子等离子体频率 ω_{pe} ，它既是电子集体振荡的固有频率，也是电磁波传播的截止频率。

Slide 21: 等离子体振荡 (流体推导)

1. 出发点：流体方程组 (Fluid Equations)

- 使用**流体模型**描述电子行为（忽略离子运动，无磁场，冷等离子体近似）。
- 考虑小的扰动量（下标 1）。
- 方程组：
 - 动量方程 (Momentum Eq.)**: $m_e \frac{\partial v_{1x}}{\partial t} = -eE_{1x}$ (牛顿第二定律)
 - 泊松方程 (Poisson Eq.)**: $\epsilon_0 \frac{\partial E_{1x}}{\partial x} = -en_{e1}$ (电场由电荷产生)
 - 连续性方程 (Continuity Eq.)**: $\frac{\partial n_{e1}}{\partial t} + n_{e0} \frac{\partial v_{1x}}{\partial x} = 0$ (粒子数守恒)

2. 求解方法：傅里叶分析 (Fourier Analysis)

- 假设所有扰动量具有平面波形式: $f_1(x, t) = \tilde{f}_1 e^{i(kx - \omega t)}$ 。
- 微分运算转化为代数运算: $\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow -i\omega$, $\frac{\partial}{\partial x} \rightarrow ik$ 。
- 代入方程组，得到关于扰动幅值 \tilde{v}_{1x} , \tilde{E}_{1x} , \tilde{n}_{e1} 的代数方程组。

3. 求解结果：色散关系 (Dispersion Relation)

- 求解该代数方程组，寻找非零解的条件，得到频率 ω 和波数 k 之间的关系，即**色散关系**。
- 重点**: 对于这种静电电子振荡，得到的色散关系为:

$$\omega^2 = \frac{n_{e0} e^2}{\epsilon_0 m_e}$$

- **结果:** $\omega = \sqrt{\frac{n_{e0}e^2}{\epsilon_0 m_e}} = \omega_{pe}$ 。
- **结论:** 通过流体方程严格推导出的振荡频率正是**电子等离子体频率** ω_{pe} 。
- **注意:** ω 与波数 k **无关**。这意味着这种振荡本身不传播 (群速度 $v_g = d\omega/dk = 0$) 。

4. 总结

使用流体方程和傅里叶分析方法，可以严格推导出电子等离子体振荡的频率 ω_{pe} ，与基于物理图像的推导结果一致。

Slide 22: 碰撞①：卢瑟福散射

1. 背景：等离子体中的碰撞

- 考虑最基本的**电子-离子二体散射** (electron-ion binary scattering)。
- 作用力是**库仑力** (Coulomb force)。
- 散射过程遵循**卢瑟福散射** (Rutherford Scattering) 定律。

2. 碰撞参数与散射角

- **碰撞参数** (b): 电子初始路径与离子核的垂直距离。
- **散射角** (χ): 电子最终运动方向相对初始方向的偏转角度。
- b 越小，库仑力越强， χ 越大。

3. 强碰撞：90度散射参数 b_0

- 定义**90度散射参数** (b_0) 为导致散射角 $\chi = 90^\circ$ 的碰撞参数。
- $b_0 = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0(m_e v^2/2)} \approx \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 k_B T_e}$ (假设电子动能 $\sim k_B T_e$, 离子电荷为 Ze)。
- b_0 代表了发生**强碰撞** (Strong collision) 的特征距离尺度。

4. 关键比较： b_0 vs λ_D

- **重点:** 在典型的弱耦合等离子体中 ($N_D \gg 1$ 或 $g \ll 1$)，可以证明：
 $b_0 \ll \lambda_D$
- **物理意义:** 导致**大角度散射**的强碰撞，发生在**极近的距离**上，这个距离**远小于**德拜屏蔽长度 λ_D 。

5. 对碰撞计算的意义

- **重点：** 由于强碰撞发生在 $r \approx b_0 \ll \lambda_D$ 的区域，**德拜屏蔽效应可以忽略**。
- 在此区域，电子感受到的是离子**未被屏蔽的 (bare) 纯粹库仑势** ($\propto 1/r$)。
- 因此，计算大角度散射的**碰撞截面 (σ)** 时，可以直接使用基于裸库仑势的**卢瑟福散射公式**。

6. 总结

电子-离子碰撞是卢瑟福散射。强碰撞（大角度）发生在极近距离 b_0 ，远小于德拜长度 λ_D ，因此计算强碰撞截面时可忽略屏蔽，使用标准卢瑟福公式。

Slide 23: 碰撞②：库仑对数

1. 等离子体碰撞的复杂性

- 实际等离子体中，一个粒子（如电子）同时与**德拜球 (Debye Sphere)** 内的**大量**粒子发生相互作用（碰撞）。
- **二体碰撞模型**（如上一页）只描述了单次强碰撞，但忽略了大量弱碰撞的累积效应。

2. 大量弱碰撞的重要性

- 虽然单次远距离碰撞（大 b ）导致的偏转角 χ 很小，但由于粒子数量众多，这些**小角度散射的累积效应 (Cumulative effect)** 可能非常显著。
- 计算表明，粒子动量的改变（等效于碰撞效应）主要来自于**大量远距离、小角度的弱碰撞**，而不是少数几次近距离、大角度的强碰撞。

3. 引入库仑对数 ($\ln \Lambda$)

- 为了计入大量弱碰撞的累积效应，需要对碰撞截面或碰撞率进行修正。
- 在计算总碰撞效应（如动量损失率 dp/dt 或碰撞频率 ν_c ）时，需要对所有可能的碰撞参数 b 进行积分。
- **重点：积分上下限：**
 - 下限 $b_{min} \approx b_0$ (90度散射参数，避免库仑势在 $r = 0$ 的发散)。
 - 上限 $b_{max} \approx \lambda_D$ (德拜长度，距离更远的粒子相互作用被屏蔽)。
- 积分结果中会出现一个对数项： $\ln(b_{max}/b_{min}) = \ln(\lambda_D/b_0)$ 。

- **重点：定义库仑对数 (Coulomb Logarithm):**

$$\ln \Lambda \equiv \ln \left(\frac{\lambda_D}{b_0} \right)$$

其中 $\Lambda = \lambda_D / b_0$ 。

- 由于 $\lambda_D \gg b_0$, Λ 通常是一个很大的数 (e.g., $10^6 - 10^9$), 所以 $\ln \Lambda$ 是一个中等大小的数 (典型值 $\approx 10 - 20$) 。

4. 物理意义

- **重点：** 最终的**有效碰撞频率** ν_{eff} 或 **有效碰撞截面** σ_{eff} 大致正比于强碰撞截面 $\sigma_0 \propto b_0^2$ 乘以 库仑对数 $\ln \Lambda$ 。

$$\nu_{eff} \propto n \sigma_0 v_{th} \ln \Lambda$$
- $\ln \Lambda$ 这个因子代表了**大量弱碰撞对总碰撞效应的贡献**, 使得等离子体中的实际碰撞效应远大于仅考虑强碰撞的估算。

5. 总结

库仑对数 $\ln \Lambda = \ln(\lambda_D / b_0)$ 是一个重要的修正因子, 用于描述等离子体中大量弱碰撞 (小角度散射) 的累积效应对总碰撞率的显著增强。

Slide 24: 碰撞③：碰撞率与平均自由程

1. 电子-离子碰撞时间 (τ_{ei})

- 考虑了库仑对数修正后, 电子与离子发生一次显著动量交换所需的平均时间 (碰撞频率 ν_{ei} 的倒数) 。
- **公式:**

$$\tau_{ei} = \frac{1}{\nu_{ei}} \approx \frac{4\pi\epsilon_0^2 m_e^{1/2} (k_B T_e)^{3/2}}{n_i Z^2 e^4 \ln \Lambda}$$

(这里 n_i 是离子密度, Z 是离子电荷数) 。

- **重点：依赖关系:**
 - $\tau_{ei} \propto T_e^{3/2}$ (温度越高, 碰撞越困难, 时间越长)
 - $\tau_{ei} \propto 1/n_i$ (密度越高, 碰撞越频繁, 时间越短)
 - $\tau_{ei} \propto 1/Z^2$ (离子电荷越高, 库仑力越强, 时间越短)
 - $\tau_{ei} \propto 1/\ln \Lambda$ (弱碰撞效应越强, 时间越短)

- **实用公式** (常用电子密度 $n_e \approx Z n_i$):

$$\tau_{ei}[s] \approx 3.44 \times 10^{11} \frac{(T_e[\text{eV}])^{3/2}}{n_e[\text{m}^{-3}] Z \ln \Lambda} \quad (\text{注意这里分母是 } n_e Z)$$

2. 电子平均自由程 (λ_e)

- 电子在两次连续碰撞之间平均自由运动的距离。
- $\lambda_e = (\text{平均速度}) \times (\text{平均碰撞时间}) = v_{th,e} \times \tau_{ei}$
- 由于 $v_{th,e} \propto T_e^{1/2}$ 。
- **重点：依赖关系：**
 - $\lambda_e \propto T_e^{1/2} \times T_e^{3/2} = T_e^2$ (对温度的依赖性极强!)
 - $\lambda_e \propto 1/n_e$
 - $\lambda_e \propto 1/Z$
 - $\lambda_e \propto 1/\ln \Lambda$
- **实用公式：**

$$\lambda_e[\text{m}] \approx 1.44 \times 10^{17} \frac{(T_e[\text{eV}])^2}{n_e[\text{m}^{-3}] Z \ln \Lambda}$$

3. Fokker-Planck 方程修正

- 更精确的动理学理论（如 Fokker-Planck 方程）可能会对碰撞频率的数值因子进行修正（如引入 2π 等）。实际应用中常使用基于这些理论的标准公式（如 Spitzer 碰撞频率）。

4. 总结

碰撞时间和平均自由程是描述等离子体碰撞性质的关键参数，它们强烈依赖于等离子体的温度和密度，并包含库仑对数 $\ln \Lambda$ 。在高温稀薄等离子体（如聚变等离子体）中，碰撞可能相对不频繁，平均自由程很长。