

SUNIST 等离子体电子温度与密度的 原子发射光谱诊断

博士生：谢会乔
导 师：高 喆 教授

清华大学工程物理系

2014-06-11

提纲

- 1 引言
- 2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法
- 3 SUNIST 氮放电等离子体 T_e 与 N_e 的发射光谱诊断
- 4 总结、课题主要创新与不足之处
- 5 致谢

提纲

1 引言

- 课题背景与意义
- 课题研究思路与内容

2 SUNIST 参数范围内氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

3 SUNIST 氮放电等离子体 T_e 与 N_e 的发射光谱诊断

4 总结、课题主要创新与不足之处

5 致谢

提纲

1 引言

- 课题背景与意义
- 课题研究思路与内容

2 SUNIST 参数范围内氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

3 SUNIST 氮放电等离子体 T_e 与 N_e 的发射光谱诊断

4 总结、课题主要创新与不足之处

5 致谢

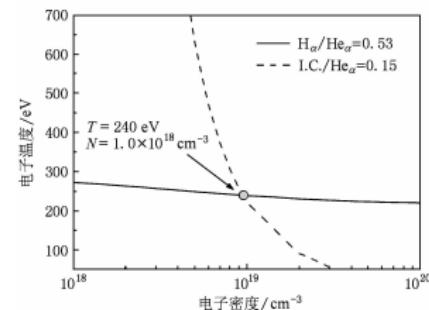
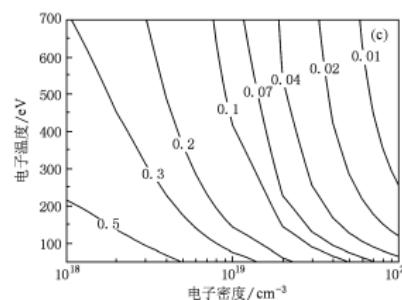
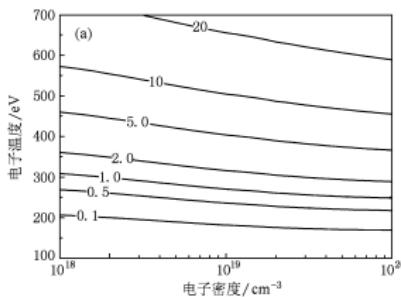
托卡马克等离子体的 T_e 与 N_e 诊断

- 托卡马克聚变研究已经取得重大进展
 - ◆ JT-60U 上获得等效 Q 值达 1.25 [Fujita T, NF(1999)]
 - ◆ JET 上获得最高 16.1 MW 瞬时功率输出 [Keilhacker M, NF(1999)]
- 由诊断技术和工具的进步所伴随
 - ◆ 越来越高的等离子体温度带来考验
- 非侵入 (noninvasive) 诊断手段受到重视
 - ◆ 辐射与粒子测量手段的兴起
 - ◆ 主动测量：射入探测粒子束或激光束
 - ◆ 被动测量：被动接收等离子体的光谱或粒子辐射

同时确定 T_e 与 N_e 的等离子体谱线辐射强度比法

- 通过对等离子体内的碰撞辐射过程进行建模，获得谱线强度比在 $T_e - N_e$ 空间内的分布
- 根据谱线比实验测量结果确定电子温度与密度

$$\frac{I_{\lambda_{ji}}}{I_{\lambda_{qp}}} = \frac{\epsilon_{ji} T_{\lambda_{ji}} \eta_{\lambda_{ji}}}{\epsilon_{qp} T_{\lambda_{qp}} \eta_{\lambda_{qp}}} = \frac{1}{F_R} \frac{T_{\lambda_{ji}} N_j A_{ji}}{T_{\lambda_{qp}} N_q A_{qp}}$$



[Li J. Act.Phys.Sin. (2010)]

氦原子发射光谱诊断

- 可见光波段发射光谱诊断
 - ◆ 测量设备简单、成熟
 - ◆ 不易受复杂电磁场干扰
 - ◆ 少维护/免维护
 - ◆ 容易扩展实现时空分辨测量
- 氦原子发射光谱对聚变等离子体研究具有特殊意义
 - ◆ 最高的第一电离能：束诊断穿透深度深
 - ◆ 聚变产物：不带来杂质污染
 - ◆ 两套自旋态能级系统：三条谱线的两个谱线比可以同时确定 T_e 和 N_e

氦原子光谱诊断 T_e 与 N_e 的研究概况

■ 主动：束发射光谱诊断

- ◆ 最早包含至 $n = 4$ 的碰撞辐射模型 [Brosda PhD Thesis (1993)]
- ◆ 发展到包含众多能级 $n = 500$ [Burgos PoP (2012)]
- ◆ 稳态解，不包含 He^+ 与 He^{2+}

■ 被动：氦等离子体光谱诊断

[Fujimoto JQSRT (1979), Goto JQSRT (2003)]

- ◆ 适用于低温和高温等离子体
- ◆ 包含的原子能级 $n = 20$
- ◆ 添加强磁场效应等

国内原子发射光谱诊断现状

■ 光谱相关的诊断工作

- ◆ CT-6B、HT-7、HL-2A、J-TEXT, EAST 上均有研究
- ◆ 研究内容：粒子旋转、杂质行为、粒子约束时间、输运循环等
- ◆ 未见谱线比法确定 T_e 和 N_e 的报道

■ 低温等离子体领域

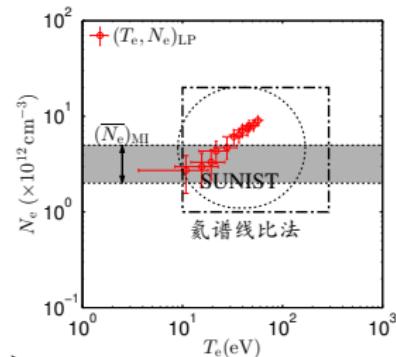
- ◆ 谱线比法应用广泛，进行了大量研究工作 [Zhu X M JPD(2010)]
- ◆ 主要观点：通过抓住最重要的反应过程对碰撞辐射模型进行简化
[朱悉铭博士论文(2009)]

前人研究中存在的问题与课题意义

- 以碰撞辐射模型在特定参数下对上能级粒子数密度的预测为基础
 - ◆ 影响精度的因素：能级与反应过程的选择，反应截面（速率系数）
 - ◆ 结合实验进行综合考虑
- 前人在碰撞辐射模型研究中存在的问题
 - ◆ 缺乏可以直接对截面数据精度提出要求的判断标准
 - ◆ 加入越来越多的激发态能级，并不能得到更高精度的结果（能级越高其原子反应截面数据精度越差）
- SUNIST 适合进行氦原子谱线诊断研究
 - ◆ SUNIST 等离子体 T_e 和 N_e 参数与氦原子谱线比法适用范围吻合
 - ◆ SUNIST 实验可以灵活安排，适合原理验证性研究
- 在 SUNIST 上开展氦原子发射谱线诊断研究的意义
 - ◆ 建立适用于小型托卡马克装置放电的碰撞辐射模型
 - ▶ 研究包含不同的能级数时对计算结果的影响
 - ▶ 对速率系数精度要求给出直接的判断标准
 - ◆ 为 SUNIST 建立起光谱诊断手段

前人研究中存在的问题与课题意义

- 以碰撞辐射模型在特定参数下对上能级粒子数密度的预测为基础
 - ◆ 影响精度的因素：能级与反应过程的选择，反应截面（速率系数）
 - ◆ 结合实验进行综合考虑
- 前人在碰撞辐射模型研究中存在的问题
 - ◆ 缺乏可以直接对截面数据精度提出要求的判断标准
 - ◆ 加入越来越多的激发态能级，并不能得到更高精度的结果（能级越高其原子反应截面数据精度越差）
- SUNIST 适合进行氦原子谱线诊断研究
 - ◆ SUNIST 等离子体 T_e 和 N_e 参数与氦原子谱线比法适用范围吻合
 - ◆ SUNIST 实验可以灵活安排，适合原理验证性研究
- 在 SUNIST 上开展氦原子发射谱线诊断研究的意义
 - ◆ 建立适用于小型托卡马克装置放电的碰撞辐射模型
 - ▶ 研究包含不同的能级数时对计算结果的影响
 - ▶ 对速率系数精度要求给出直接的判断标准
 - ◆ 为 SUNIST 建立起光谱诊断手段



提纲

1 引言

- 课题背景与意义
- 课题研究思路与内容

2 SUNIST 参数范围内氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

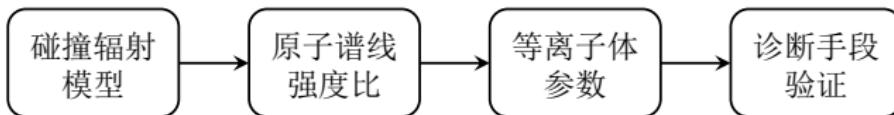
3 SUNIST 氮放电等离子体 T_e 与 N_e 的发射光谱诊断

4 总结、课题主要创新与不足之处

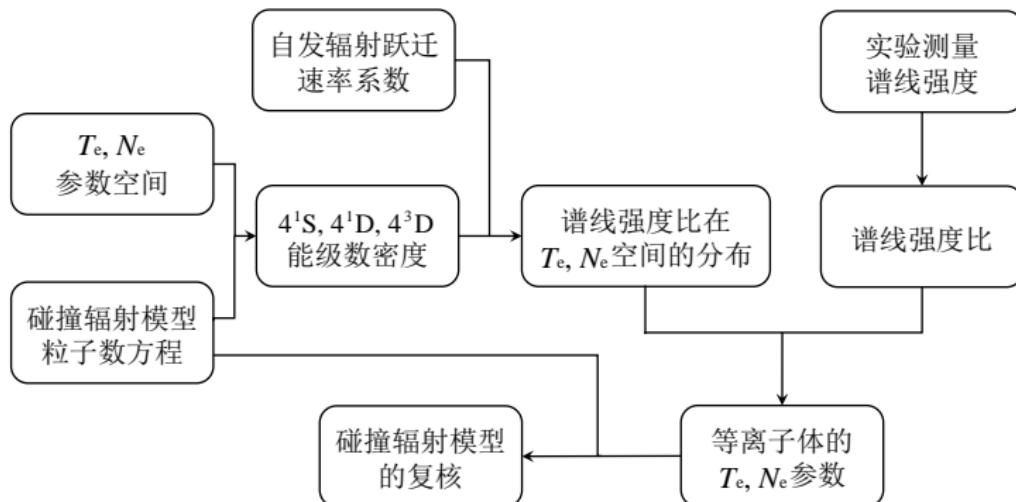
5 致谢

课题研究思路与各部分内容的关系

■ 研究思路与内容



■ 研究内容之间的详细关系



提纲

1 引言

2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

- 碰撞辐射模型的建立
- 碰撞辐射模型的研究
- 诊断 T_e 和 N_e 谱线比法的建立

3 SUNIST 氮放电等离子体 T_e 与 N_e 的发射光谱诊断

4 总结、课题主要创新与不足之处

5 致谢

提纲

1 引言

2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

- 碰撞辐射模型的建立
- 碰撞辐射模型的研究
- 诊断 T_e 和 N_e 谱线比法的建立

3 SUNIST 氮放电等离子体 T_e 与 N_e 的发射光谱诊断

4 总结、课题主要创新与不足之处

5 致谢

氦放电等离子体激发态数密度分布特点与能级结构

SUNIST 碰撞辐射模型 He 原子能级图

■ 临界能级主量子数

[H.R. Griem (1964)]

$$n_c = \left(\frac{8 \cdot 10^{17}}{N_e} \right)^{2/17} \left(\frac{kT_e}{\chi_H} \right)^{1/17}$$

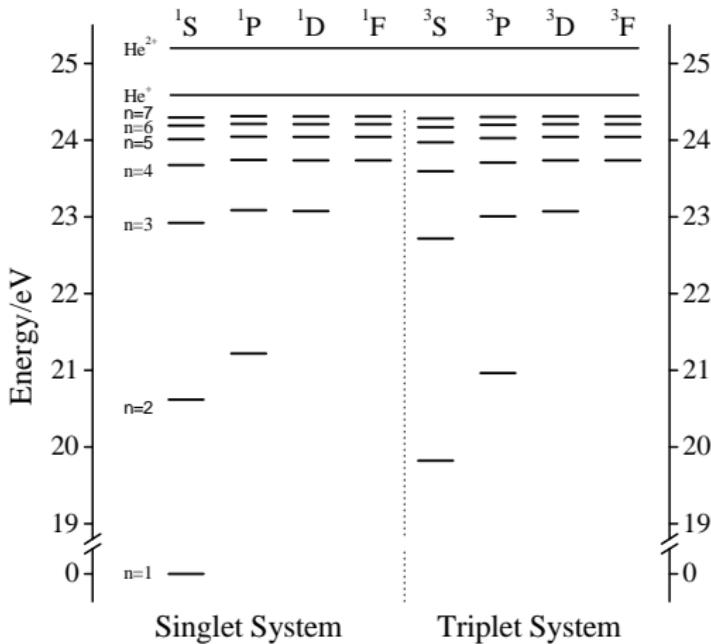
■ 氦激发态能级分布

[Fujimoto JQSRT (1979)]

- ◆ $N_p/g_p \propto n^{-0.5}$ ($n < n_c$)
- ◆ $N_p/g_p \propto n^{-6}$ ($n > n_c$)

■ SUNIST 等离子体

- ◆ 高温低密度: $n_c \simeq 6$
- ◆ 低温高密度: $n_c \simeq 4$



电子碰撞与重粒子碰撞过程的反应速率

$$\frac{dN_p}{dt} = -n_{e,X} \cdot N_p \cdot \langle v_{e,X} \cdot \sigma_{pq} \rangle$$

电子碰撞与重粒子碰撞激发过程的选择

反应过程	$n_{e,X}$	N_p	$v_{e,X}$	σ_{pq}	反应过程量级
e-基态	+6	0	0	0	+6
e-亚稳态	+6	-1	0	0	+5
e-普通激发态	+6	-4	0	0	+2
X-基态	+4	0	-3	-3	-2
X-亚稳态	+4	-1	-3	-3	-3
X-普通激发态	+4	-4	-3	-3	-6

电子碰撞与重粒子碰撞电离过程的选择

反应过程	$n_{e,X}$	N_p	$v_{e,X}$	σ_{pq}	反应过程量级
e-基态	+6	0	0	+1	+7
e-亚稳态	+6	-1	0	+1	+6
e-普通激发态	+6	-4	0	+1	+3
X-基态	+4	0	-3	-3	-2
X-亚稳态	+4	-1	-3	-3	-3
X-普通激发态	+4	-4	-3	-3	-6
e-基态 (双电离)	+6	0	0	-2	+4
e-亚稳态 (双电离)	+6	-1	0	-2	+3
e-普通激发态 (双电离)	+6	-4	0	-2	0
X-基态 (双电离)	+4	0	-3	-3	-2
X-亚稳态 (双电离)	+4	-1	-3	-3	-3
X-普通激发态 (双电离)	+4	-4	-3	-3	-6

速率方程：基态

$$\begin{aligned}\frac{dN_1}{dt} = & - \left\{ \sum_{q>1} C_{1q} + S_{He^+}(1) + S_{He^{2+}}(1) \right\} N_e N_1 \\ & + \sum_{q>1} \{C_{q1} N_e + A_{q1}\} N_q \\ & + \{\beta_{He^+}(1) + \beta_{He^{+},d}(1)\} N_e N_{He^+}\end{aligned}$$

- 主要损失过程：电子碰撞激发与电离
- 主要产生过程：电子碰撞退激发、激发态自发辐射跃迁、 He^+ 离子的辐射复合 (radiation recombination) 与双电子复合 (dielectric recombination)

速率方程：亚稳态 (2^1S 和 2^3S) 与普通激发态

$$\begin{aligned}\frac{dN_p}{dt} = & - \left\{ \sum_{q \neq p} C_{pq} N_e + \sum_{q < p} A_{pq} + S_{He^+}(p) N_e \right\} N_p \\ & + \left\{ \sum_{q \neq p} C_{qp} N_e + \sum_{q > p} A_{qp} \right\} N_q \\ & + \beta_{He^+}(p) N_e N_{He^+}\end{aligned}$$

- 主要损失过程：电子碰撞激发/退激发、电离与自发辐射跃迁
- 主要产生过程：电子碰撞激发/退激发、 He^+ 辐射复合与自发辐射跃迁

速率方程: He^+ 离子

$$\frac{dN_{\text{He}^+}}{dt} = - \left\{ \sum_p \beta_{\text{He}^+}(p) + \beta_{\text{He}^+, d}(1) + S_{\text{He}^{2+}}(\text{He}^+) \right\} N_e N_{\text{He}^+}$$
$$+ N_e \sum_p S_{\text{He}^+}(p) N_p + \beta_{\text{He}^{2+}}(\text{He}^+) N_e N_{\text{He}^{2+}}$$

- 主要损失过程: 电子碰撞电离、辐射复合与双电子复合过程
- 主要产生过程: 激发态碰撞电离、 He^{2+} 复合

速率方程: He^{2+} 离子

$$\begin{aligned}\frac{dN_{\text{He}^{2+}}}{dt} = & -\beta_{\text{He}^{2+}}(\text{He}^+) N_e n_{\text{He}^{2+}} \\ & + \left\{ S_{\text{He}^{2+}}(1) N_1 + S_{\text{He}^{2+}}(\text{He}^+) N_{\text{He}^+} \right\} N_e\end{aligned}$$

- 主要损失过程: 电子碰撞复合至 He^+ 离子
- 主要产生过程: 基态原子与 He^+ 离子的电子碰撞电离

准稳态近似处理

对 SUNIST 中等离子体的各时间常数分析 [H.P. Summers PPCF (2006)]:

原子内在固有时间常数: 辐射、跃迁相关

$$\tau_{\text{rad-ion}} \sim 10^{-13} \text{ s} < \tau_{\text{ord-rad}} \sim \frac{10^{-8}}{z^4} \text{ s} < \tau_{\text{meta-rad}} \sim \frac{10^1}{z^8} \text{ s}$$

外在时间常数: 受 T_e 、 N_e 影响

$$\tau_{e-e} \sim 4 \mu\text{s} < \tau_{i-i} \sim 20 \mu\text{s} < \tau_{e-ion} \sim 1.4 \mu\text{s} - 140 \mu\text{s} < \tau_{i-e} \sim 2 \text{ ms}$$

与等离子体行为相关时间参数 τ_{plasma} 对比

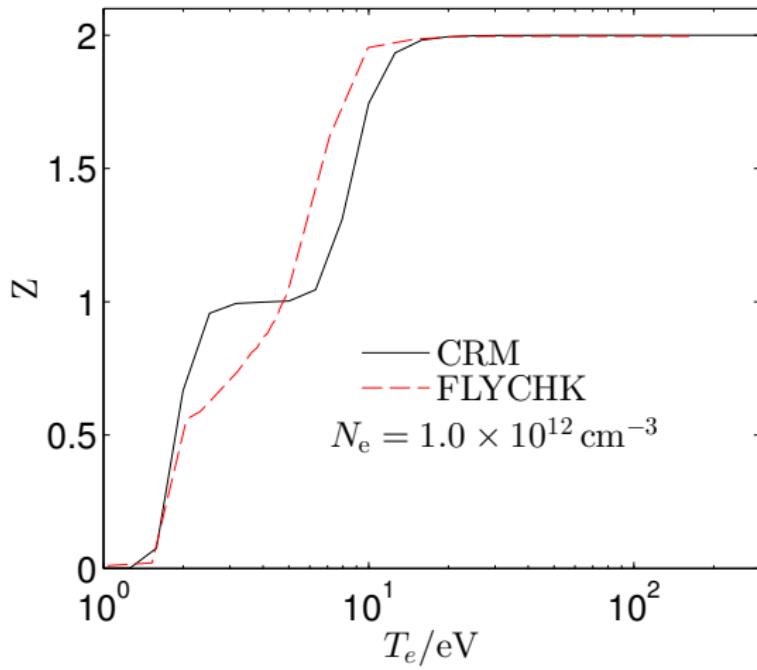
$$\tau_{\text{ord-rad}} < \tau_{e-e,i-i} < \tau_{e-ion} < \tau_{\text{plasma}}$$

τ_{plasma} : 等离子体在空间尺度上扩散、输运等时间常数

■ 准稳态近似处理:

- ◆ 局域计算中, 不考虑粒子扩散输运等过程
- ◆ 联立速率方程, 求其稳态解
- ◆ 放电平衡段适用

等效电荷数计算结果与 FLYCHK 对比



提纲

1 引言

2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

■ 碰撞辐射模型的建立

■ 碰撞辐射模型的研究

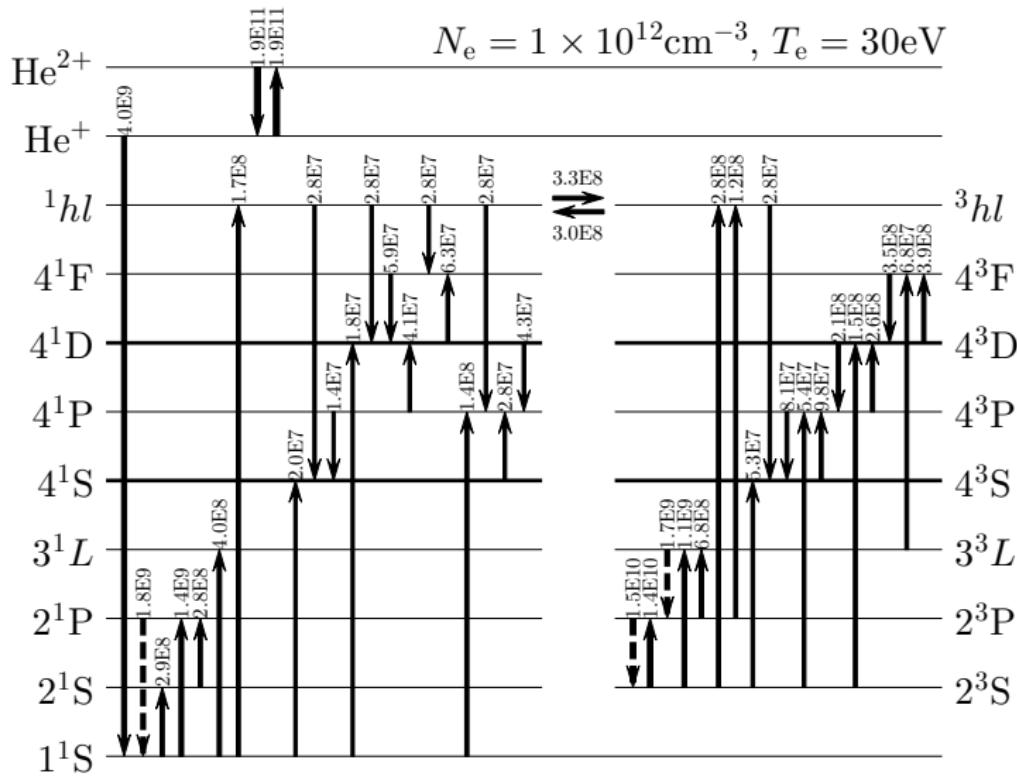
■ 诊断 T_e 和 N_e 谱线比法的建立

3 SUNIST 氮放电等离子体 T_e 与 N_e 的发射光谱诊断

4 总结、课题主要创新与不足之处

5 致谢

速率系数不确定性：各能级的主要产生过程



速率系数不确定性：速率系数不确定性传递函数

对于普通激发态能级，电子碰撞电离与复合过程均不超过 10%

$$\Rightarrow N_e \sum_{i \neq p} C_{ip} N_i = N_e N_p \sum_{i \neq p} C_{pi} + N_p \sum_{i < p} A_{pi}$$

$$\Rightarrow \sigma_{N_p} = \frac{dN_p}{N_p} = \sigma \left(N_e \sum_{i \neq p} C_{ip} N_i \right) + \sigma \left(N_e \sum_{i \neq p} C_{pi} + \sum_{i < p} A_{pi} \right)$$

$$\Rightarrow \sigma_{N_p} = E_{jp} \sigma_{C_{jp}} \simeq 2 \frac{f_{jp}}{F_{p,\text{in}}} \sigma_{C_{jp}}$$

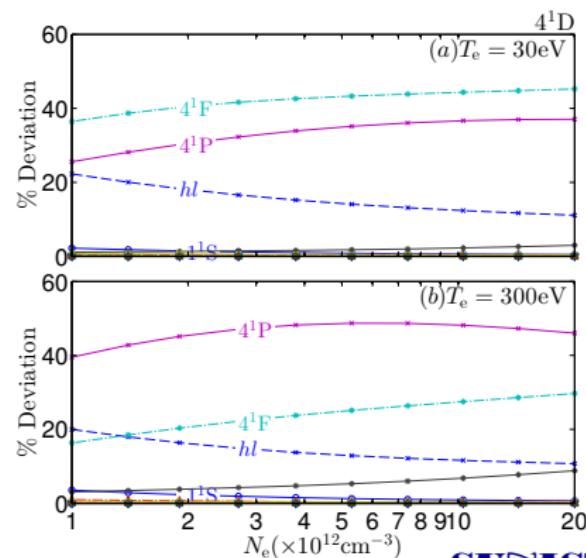
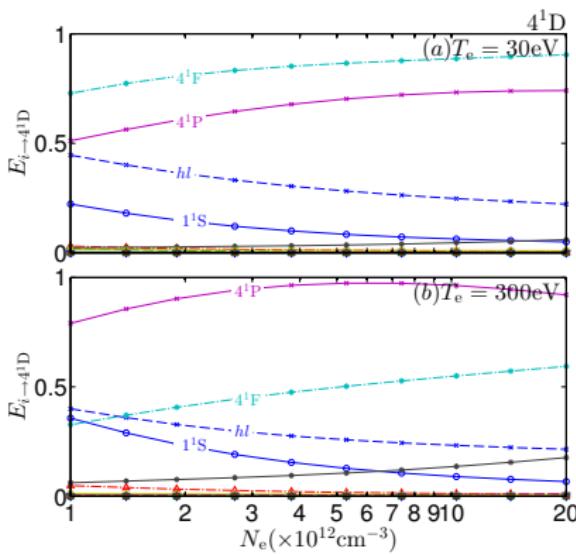
■ E_{jp} 的物理意义

- ◆ 该过程占能级总产生速率的比例越重，其速率系数不确定性至激发态粒子数密度计算结果的传递越明显
- ◆ 其逆过程的粒子流速率相应变化，则会出现 2 倍的系数
- ◆ 据此，可以直接对速率系数准确性提出具体要求

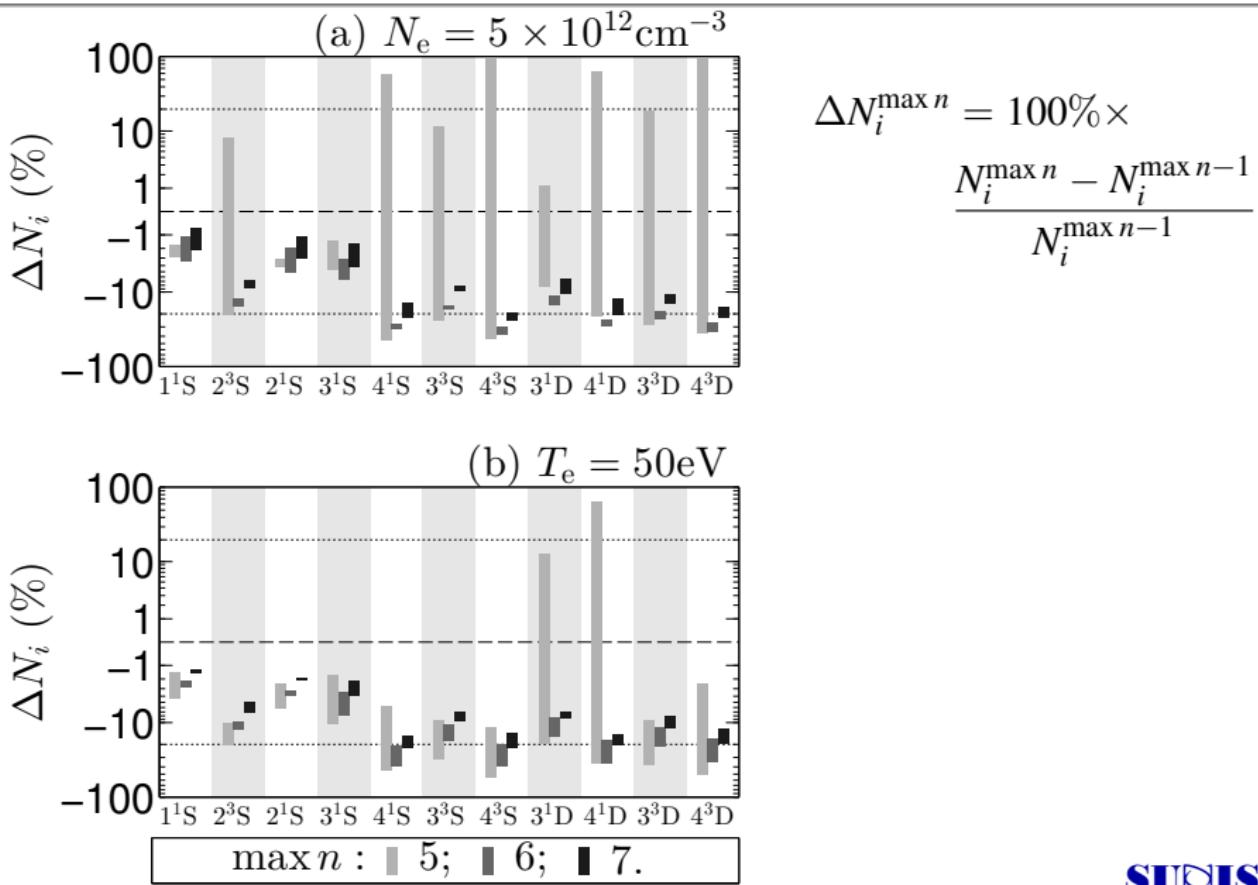
速率系数不确定性：不确定性传递计算结果

- 对相同主量子数的相邻能级、基态和高能级的总和的速率系数要求高
- 相邻能级速率系数单一变化时，对模型计算结果影响可达 40%

跃迁类型	误差
基态→单重态	±10%
基态→三重态	±15%
亚稳态→其他	±20%
其他过程	±50%



模型中包含的能级对激发态数密度计算结果的影响



提纲

1 引言

2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

- 碰撞辐射模型的建立
- 碰撞辐射模型的研究
- 诊断 T_e 和 N_e 谱线比法的建立

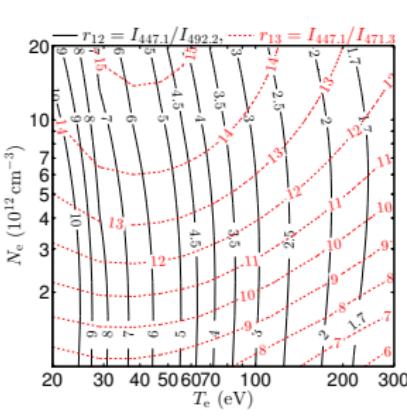
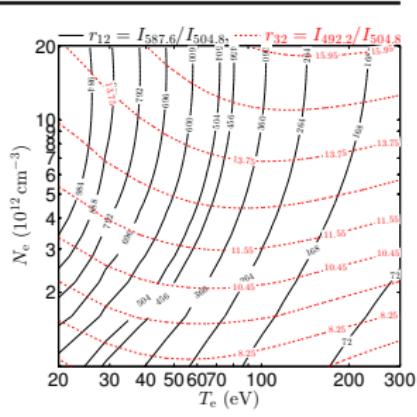
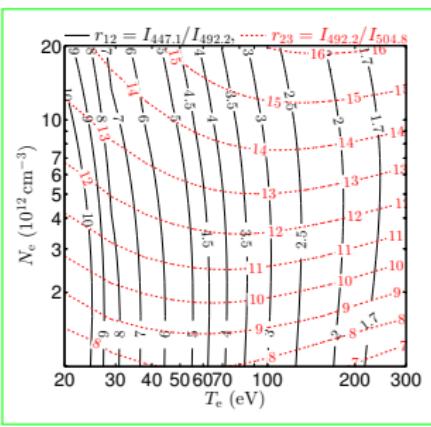
3 SUNIST 氮放电等离子体 T_e 与 N_e 的发射光谱诊断

4 总结、课题主要创新与不足之处

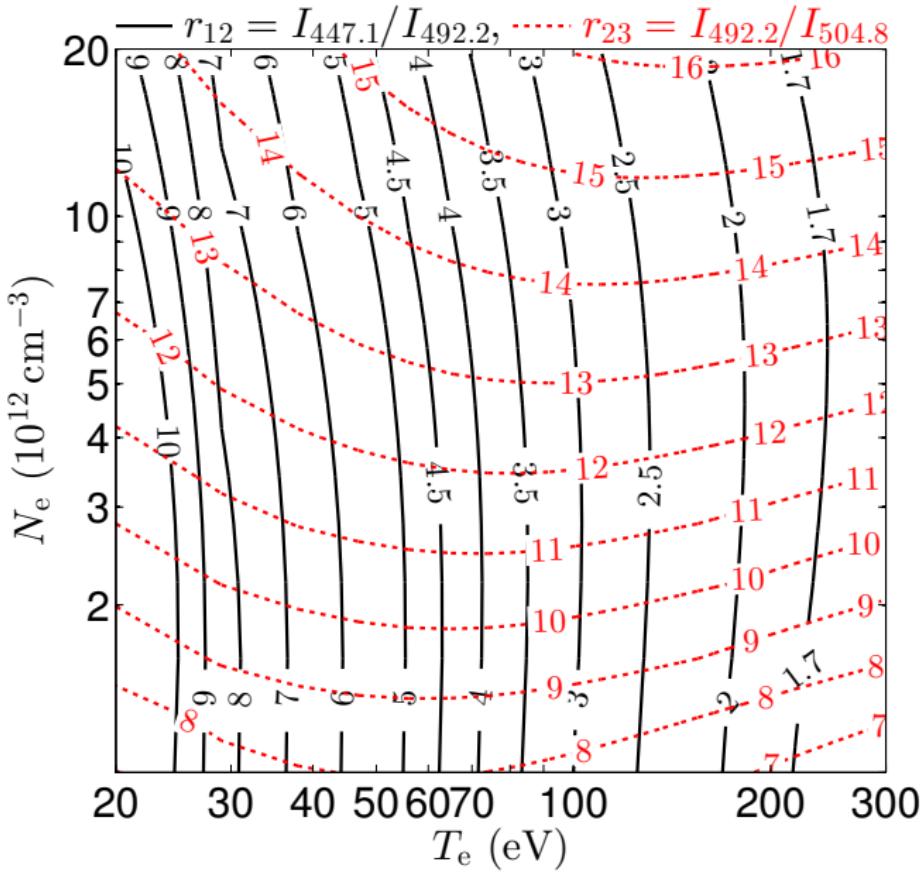
5 致谢

谱线比选择

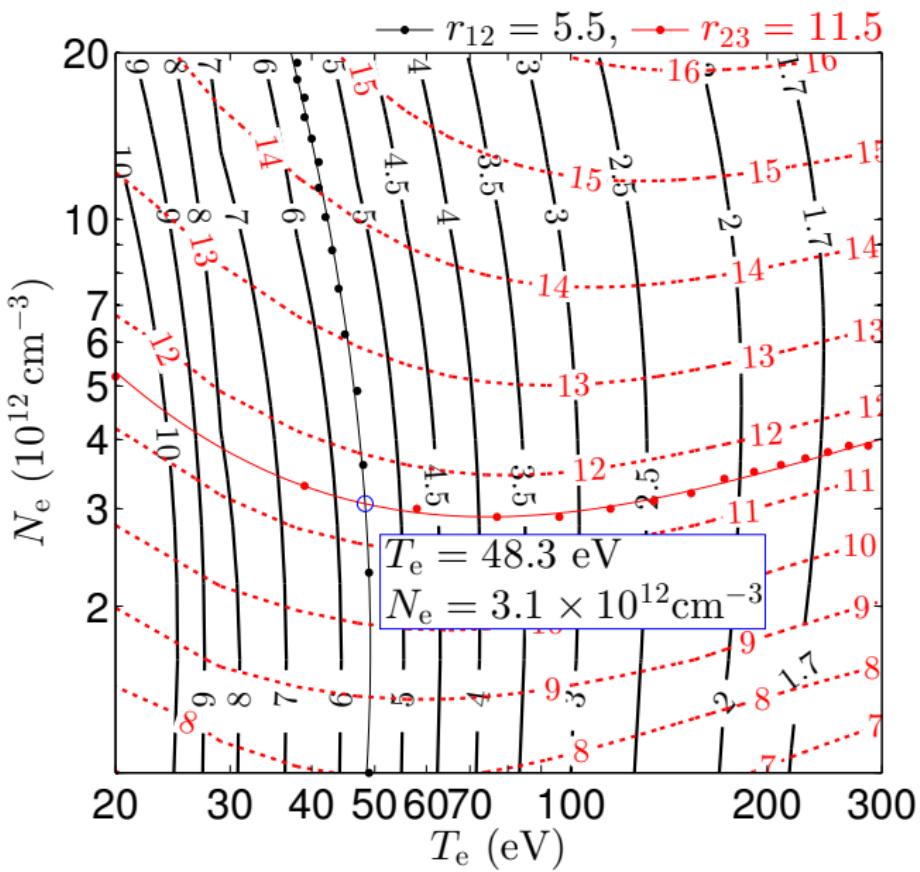
跃迁	$\lambda_{q \rightarrow p}$ (nm)	$A_{q \rightarrow p}^{\text{eff}}$ (10^{10} s^{-1})
$2^1S \leftarrow 3^1P$	501.6	1.34
$2^1S \leftarrow 4^1P$	396.5	0.70
$2^1P \leftarrow 4^1S$	504.8	0.68
$2^1P \leftarrow 4^1D$	492.2	1.99
$2^3S \leftarrow 3^3P$	388.9	0.95
$2^3P \leftarrow 3^3D$	587.6	7.07
$2^3P \leftarrow 4^3S$	471.3	0.95
$2^3P \leftarrow 4^3D$	447.1	2.46
$2^3P \leftarrow 5^3S$	412.1	0.45



碰撞辐射模型对谱线比的预测



谱线比法确定 T_e 和 N_e



提纲

1 引言

2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

3 SUNIST 氮放电等离子体 T_e 与 N_e 的发射光谱诊断

- SUNIST 原子发射光谱诊断实验测量系统与安排
- 氮原子发射光谱测量结果
- 谱线比法诊断 T_e 和 N_e
- 碰撞辐射模型的复核
- 光谱测量弦积分特性与谱线强度涨落的初步研究

4 总结、课题主要创新与不足之处

5 致谢

提纲

1 引言

2 SUNIST 参数范围内氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

3 SUNIST 氮放电等离子体 T_e 与 N_e 的发射光谱诊断

■ SUNIST 原子发射光谱诊断实验测量系统与安排

■ 氮原子发射光谱测量结果

■ 谱线比法诊断 T_e 和 N_e

■ 碰撞辐射模型的复核

■ 光谱测量弦积分特性与谱线强度涨落的初步研究

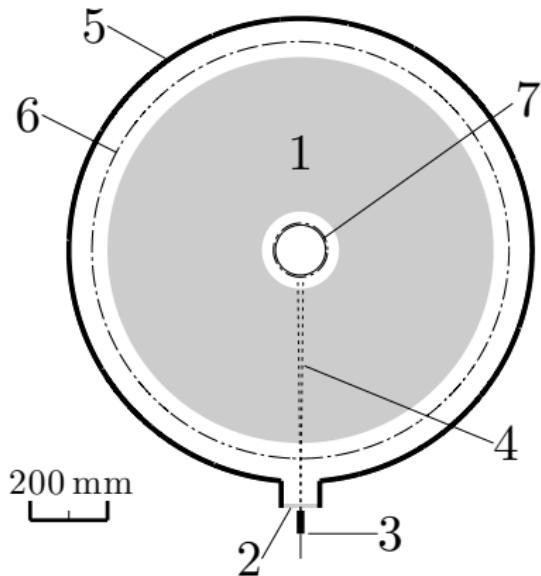
4 总结、课题主要创新与不足之处

5 致谢

主要光谱测量设备

- 两台单色仪：对两条谱线进行同时测量
 - ◆ 可用谱线范围：380 nm – 650 nm
 - ◆ 焦距：1 m；光栅：2400 g/mm@400 nm；波长分辨率：0.004 nm；色散：0.4 nm/mm
 - ◆ 光电倍增管：单点，但响应强，满足时间分辨测量要求
- 标定
 - ◆ 汞灯：谱线准确度、分辨率
 - ◆ 钨灯：仪器的整体响应
- 信号
 - ◆ 取样电阻优化
 - ◆ 屏蔽以降低噪声
 - ◆ PMT 电源改造，消除来自电源干扰

光谱测量安排



跃迁	$\lambda_{q \rightarrow p}$ (nm)	$A_{q \rightarrow p}^{\text{eff}}$ (10^7 s^{-1})
$2^1S \leftarrow 3^1P$	501.6	1.34
$2^1S \leftarrow 4^1P$	396.5	0.70
$2^1P \leftarrow 4^1S$	504.8	0.68
$2^1P \leftarrow 4^1D$	492.2	1.99
$2^3S \leftarrow 3^3P$	388.9	0.95
$2^3P \leftarrow 3^3D$	587.6	7.07
$2^3P \leftarrow 4^3S$	471.3	0.95
$2^3P \leftarrow 4^3D$	447.1	2.46
$2^3P \leftarrow 5^3S$	412.1	0.45

提纲

1 引言

2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

3 SUNIST 氮放电等离子体 T_e 与 N_e 的发射光谱诊断

■ SUNIST 原子发射光谱诊断实验测量系统与安排

■ 氮原子发射光谱测量结果

■ 谱线比法诊断 T_e 和 N_e

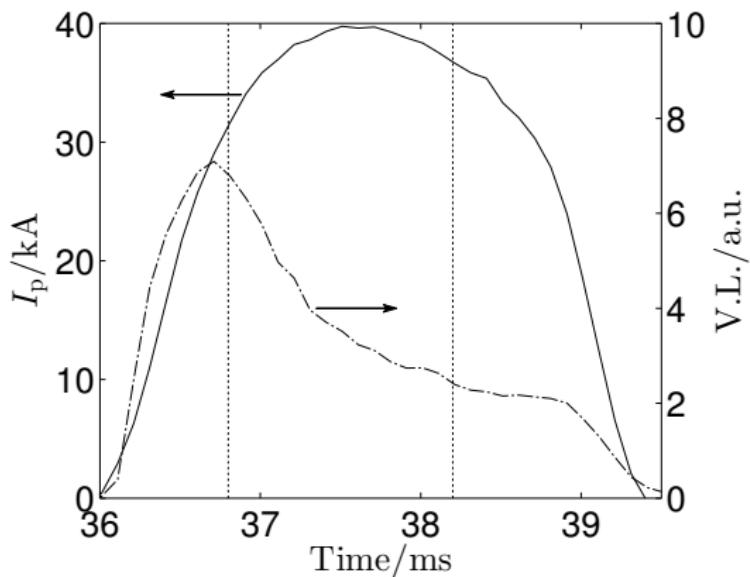
■ 碰撞辐射模型的复核

■ 光谱测量弦积分特性与谱线强度涨落的初步研究

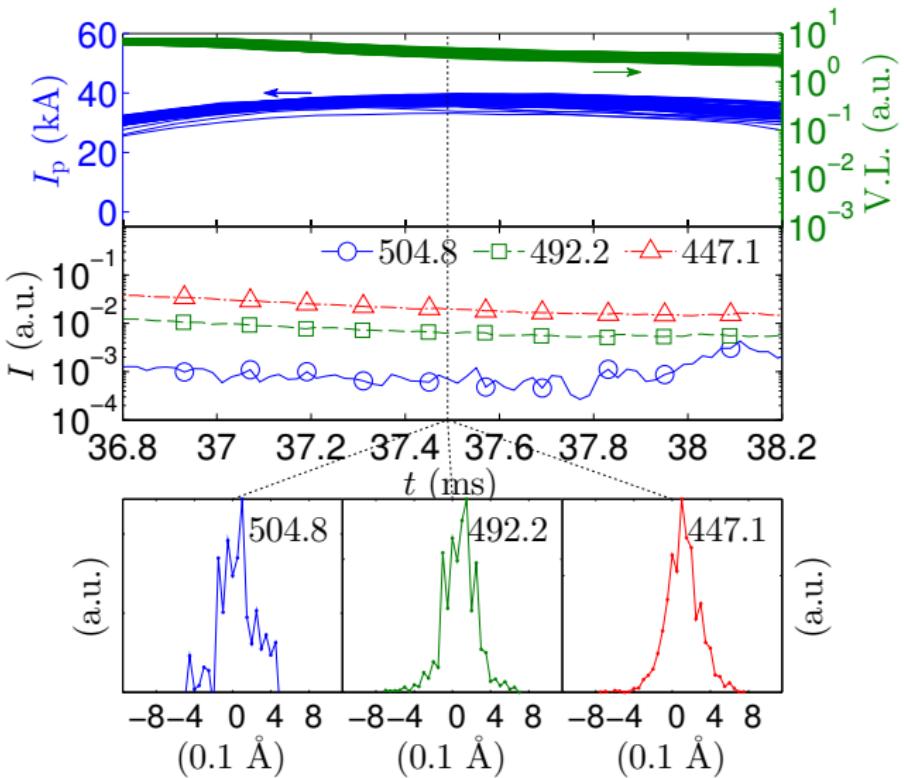
4 总结、课题主要创新与不足之处

5 致谢

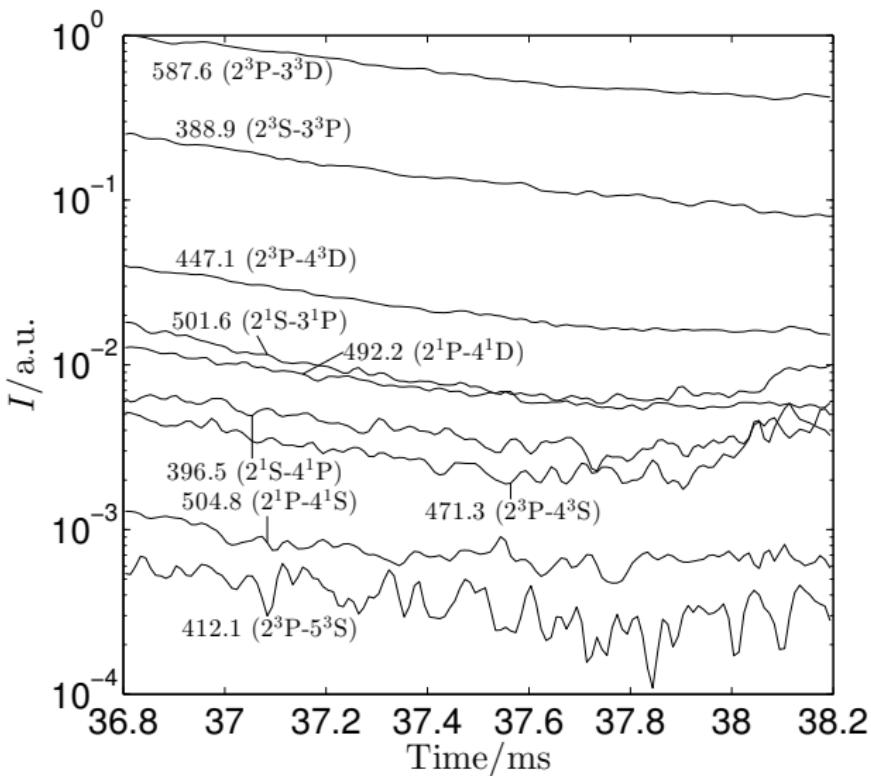
氦放电等离子体电流与可见光信号



谱线测量方法



谱线测量结果



提纲

1 引言

2 SUNIST 参数范围内氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

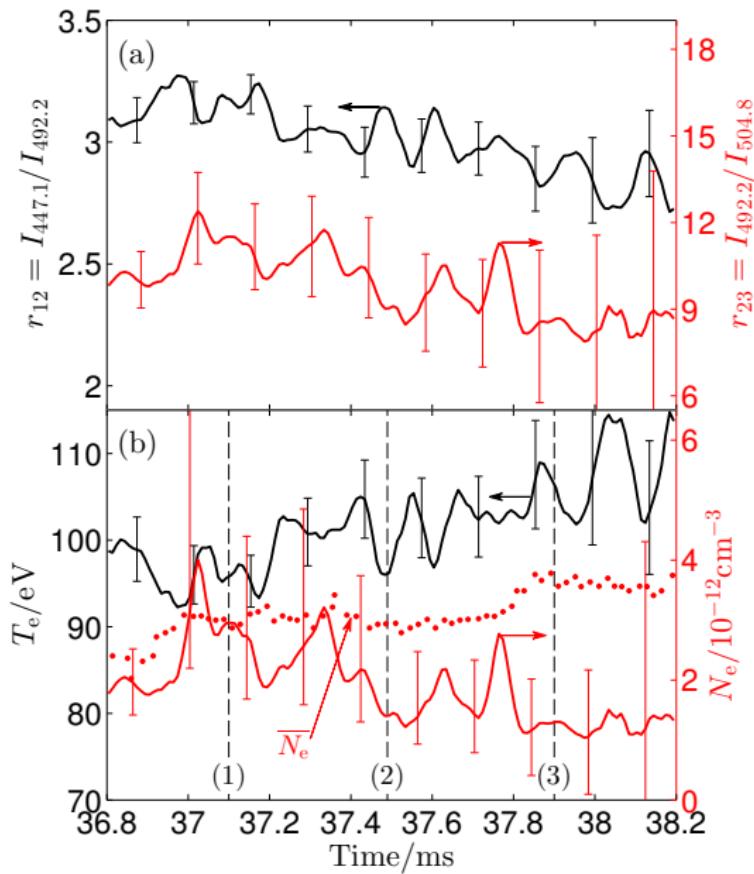
3 SUNIST 氮放电等离子体 T_e 与 N_e 的发射光谱诊断

- SUNIST 原子发射光谱诊断实验测量系统与安排
- 氮原子发射光谱测量结果
- 谱线比法诊断 T_e 和 N_e
- 碰撞辐射模型的复核
- 光谱测量弦积分特性与谱线强度涨落的初步研究

4 总结、课题主要创新与不足之处

5 致谢

谱线比法确定 T_e 和 N_e



提纲

1 引言

2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

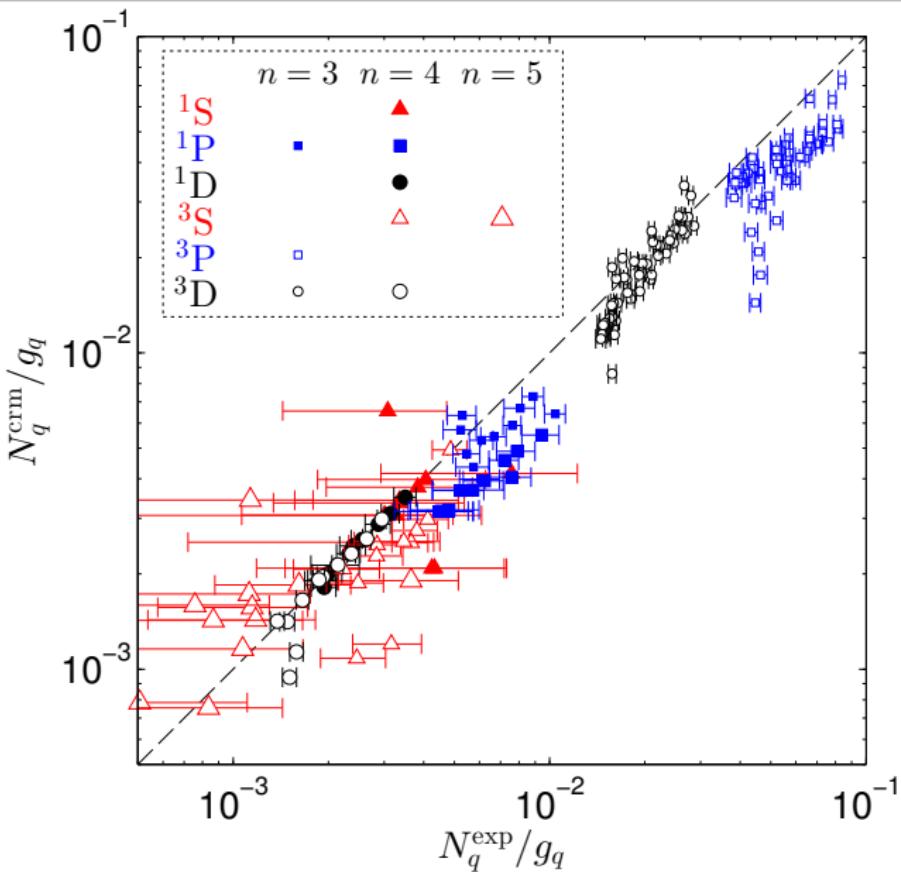
3 SUNIST 氖放电等离子体 T_e 与 N_e 的发射光谱诊断

- SUNIST 原子发射光谱诊断实验测量系统与安排
- 氖原子发射光谱测量结果
- 谱线比法诊断 T_e 和 N_e
- 碰撞辐射模型的复核
- 光谱测量弦积分特性与谱线强度涨落的初步研究

4 总结、课题主要创新与不足之处

5 致谢

激发态数密度：测量值与诊断所得参数下模型计算值



提纲

1 引言

2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

3 SUNIST 氮放电等离子体 T_e 与 N_e 的发射光谱诊断

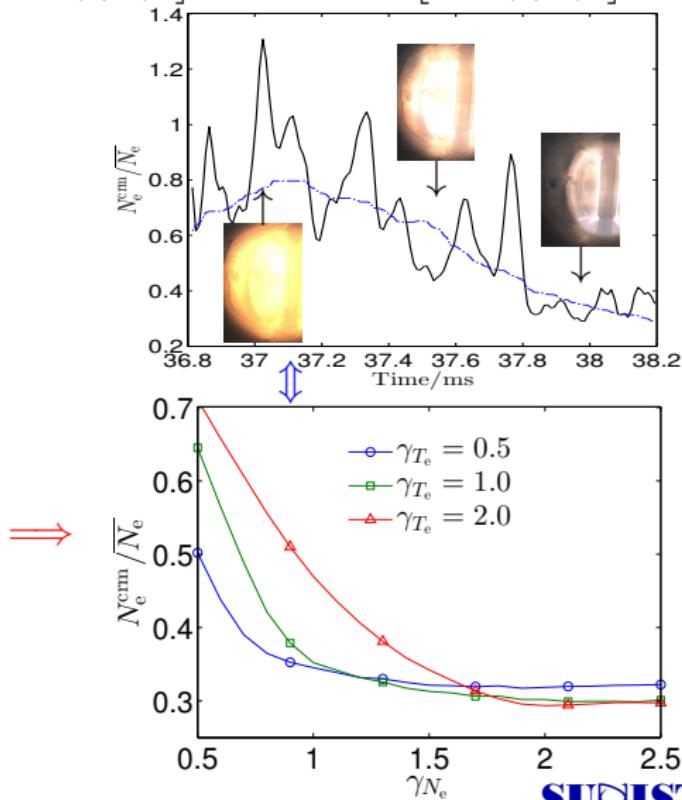
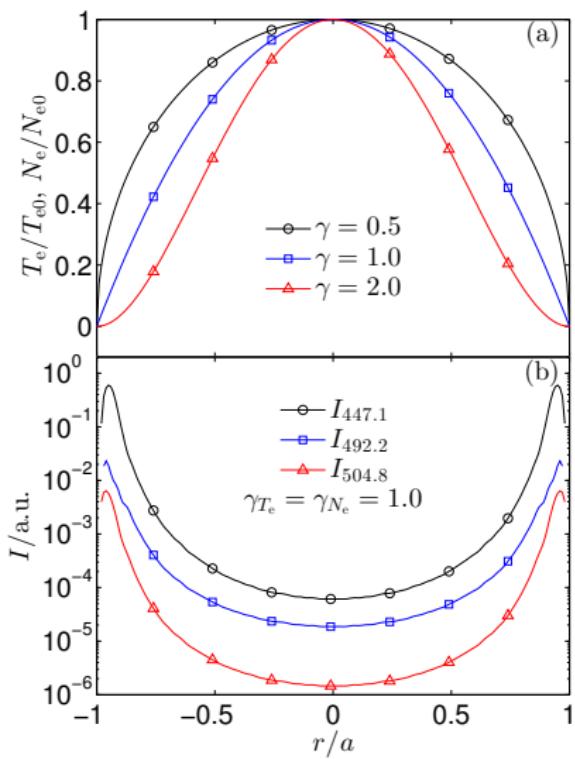
- SUNIST 原子发射光谱诊断实验测量系统与安排
- 氮原子发射光谱测量结果
- 谱线比法诊断 T_e 和 N_e
- 碰撞辐射模型的复核
- 光谱测量弦积分特性与谱线强度涨落的初步研究

4 总结、课题主要创新与不足之处

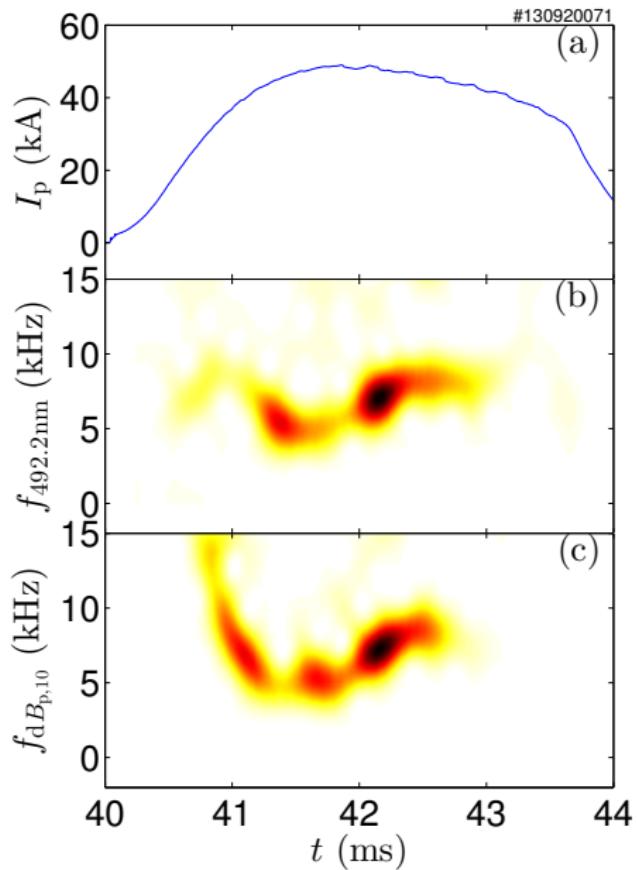
5 致谢

谱线比与微波干涉仪测量的 N_e 与其空间分布的相关性

假设抛物线分布条件: $N_e = N_{e0} [1 - (r/a)^2]^{\gamma_{N_e}}$, $T_e = T_{e0} [1 - (r/a)^2]^{\gamma_{T_e}}$



谱线涨落与磁探针信号涨落频谱分析



提纲

- 1 引言
- 2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法
- 3 SUNIST 氮放电等离子体 T_e 与 N_e 的发射光谱诊断
- 4 总结、课题主要创新与不足之处
- 5 致谢

课题完成的工作内容与主要创新

■ 课题完成的工作

◆ SUNIST 氖放电等离子体光谱诊断

- ▶ 碰撞辐射模型：适用于以下参数内，可忽略其他杂质影响的等离子体
 - $20\text{eV} < T_e < 300\text{eV}$
 - $1.0 \times 10^{12}\text{cm}^{-3} < N_e < 2.0 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$
- ▶ 光谱诊断实验

■ 课题主要创新

◆ 碰撞辐射模型方面

- ▶ 提出速率系数不确定性传递函数，可以对速率系数精度直接提出要求
- ▶ 给出结论：对具有 SUNIST 参数的等离子体碰撞模型，当 $\max n = 7$ 时即给出可以接受的结果

◆ 实验方面

- ▶ 为 SUNIST 建立了同时诊断 T_e 和 N_e 的手段
- ▶ 观察到以下结果
 - 谱线比法与微波干涉仪测量的 N_e 之比与其分布峰化的相关性
 - 光谱信号与磁探针信号具有一致的涨落行为

课题的不足之处与后续工作展望

■ 碰撞辐射模型的研究

- ◆ 不足：仅利用了模型的稳态解
- ◆ 后续工作：与实验结合，加入时变解，考虑非麦氏电子温度分布、能量粒子输运循环等因素，扩展适用范围至放电起始与结束阶段

■ 光谱分析方面

- ◆ 不足：谱线展宽、波长位移诊断
- ◆ 后续工作：建立新的实验设备，条件成熟时可以开展

■ SUNIST 实验基础方面

- ◆ 不足：不具备空间分布诊断能力
- ◆ 后续工作：建立光电二极管阵列探测系统，结合断层反演技术以实现空间分辨诊断

课题论文发表情况

■ SUNIST 上谱线比法的应用

Huiqiao Xie, Zhe Gao, Yi Tan, et al. Electron temperature and density determination in helium plasmas of SUNIST using the optical emission spectrum line-ratio method. The Joint Meeting of 5th IAEA Technical Meeting on Spherical Tori & 16th International Workshop on Spherical Torus (**ISTW2011**) & 2011 US-Japan Workshop on ST Plasma, 2011: Toki

■ 实验基础建设：改善放电重复性

Xie Huiqiao, Tan Yi, Ke Rui, et al. Analysis of the gas puffing performance for improving the repeatability of Ohmic discharges in the SUNIST spherical tokamak. In press. (**已被 Plasma Science and Technology 录用. SCI 源刊.**)

■ 整体工作（包括了碰撞辐射模型中包含激发态能级数的研究等）

谢会乔, 谭熠, 刘阳青, 等. SUNIST 氦放电等离子体的碰撞辐射模型及其在谱线比法诊断的应用. 物理学报, 2014 63(12): 125203. (**SCI 源刊**)

提纲

1 引言

2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

3 SUNIST 氮放电等离子体 T_e 与 N_e 的发射光谱诊断

4 总结、课题主要创新与不足之处

5 致谢

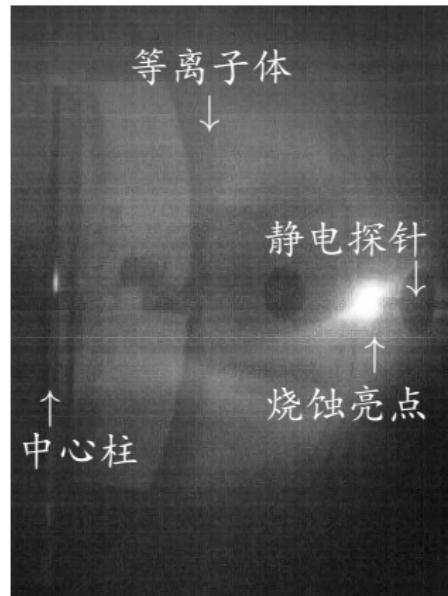
致谢

- 感谢高喆老师、蒲以康老师、王文浩老师、谭熠老师、解丽凤老师的教导、支持与鼓励
- 感谢王龙老师、杨宣宗老师和冯春华老师的关心爱护与帮助
- 感谢张良、曾龙、赵爱慧、刘阳青、姜艳铮、柴松以及其他师兄弟姐妹的帮助与在实验室的陪伴
- 感谢工物系、西南物理研究院、等离子体所、工程物理研究院给予过帮助的所有老师和同学
- 感谢工作中在仪器制作、安装和调试中给过帮助的所有相关工程技术人员
- 感谢家人的爱护、支持与陪伴，尤其是张英女士
- 感谢学习生活中出现过的所有人士
- 深切怀念何也熙老师

SUNIST 等离子体电子温度与密度的 原子发射光谱诊断

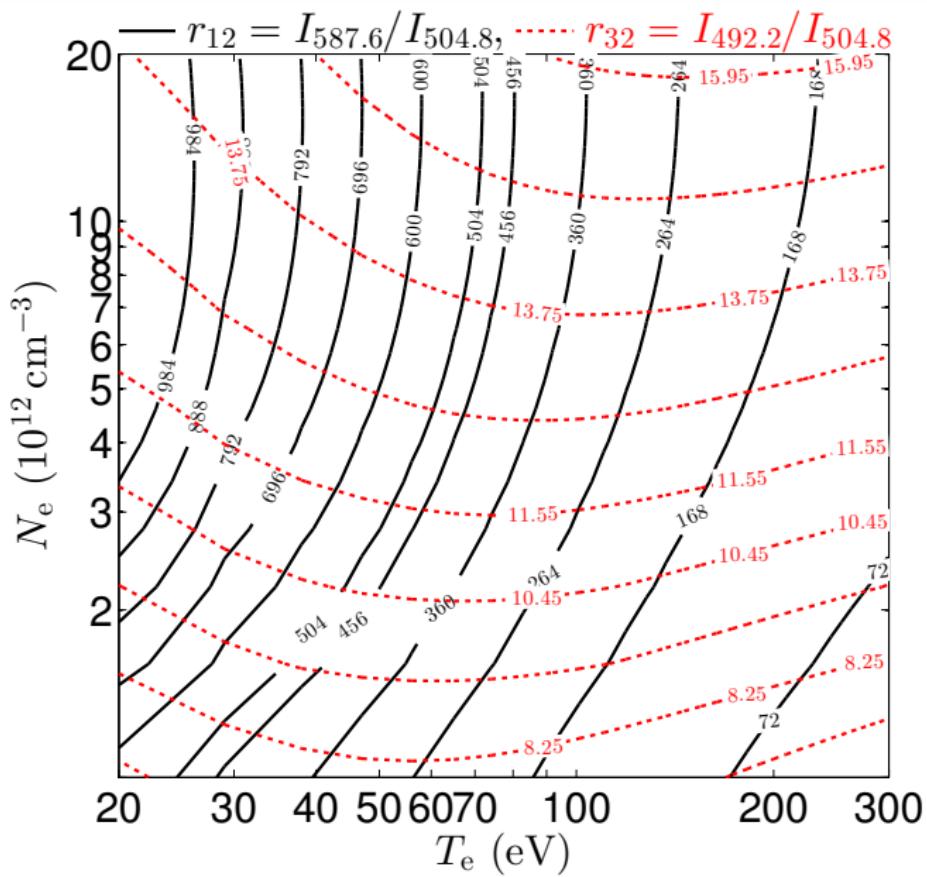
感谢各位老师和同学出席！

SUNIST 放电时静电探针烧蚀情况

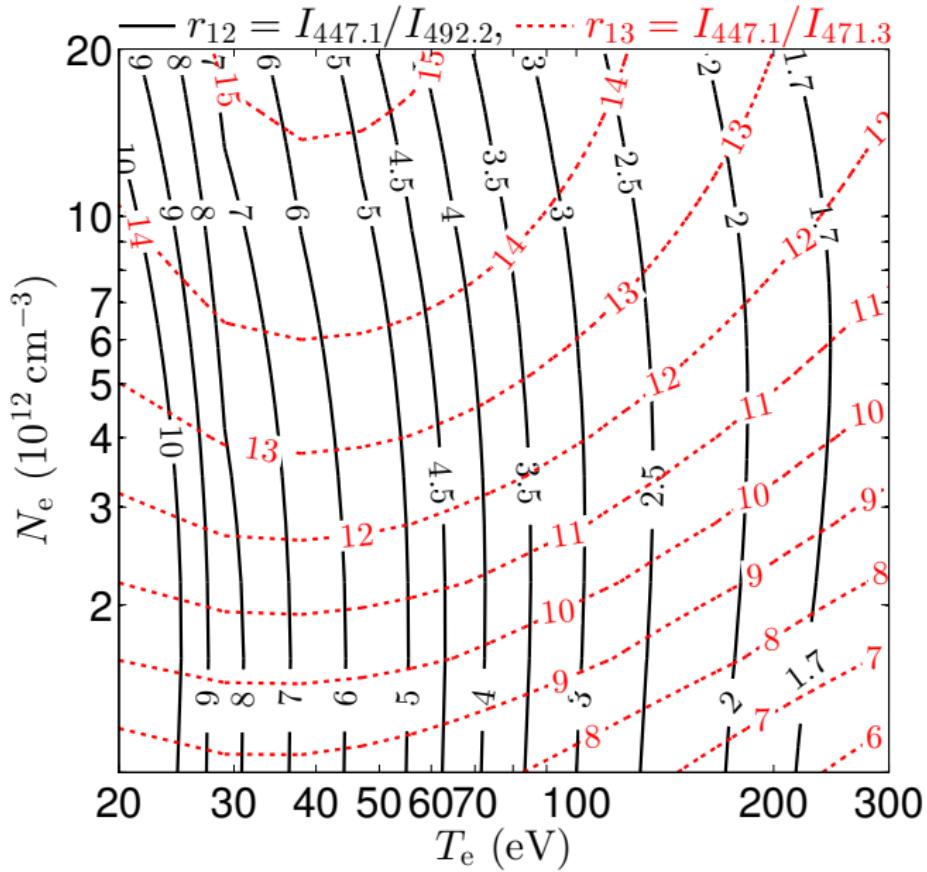


SUNIST 静电探针烧蚀
#121123020

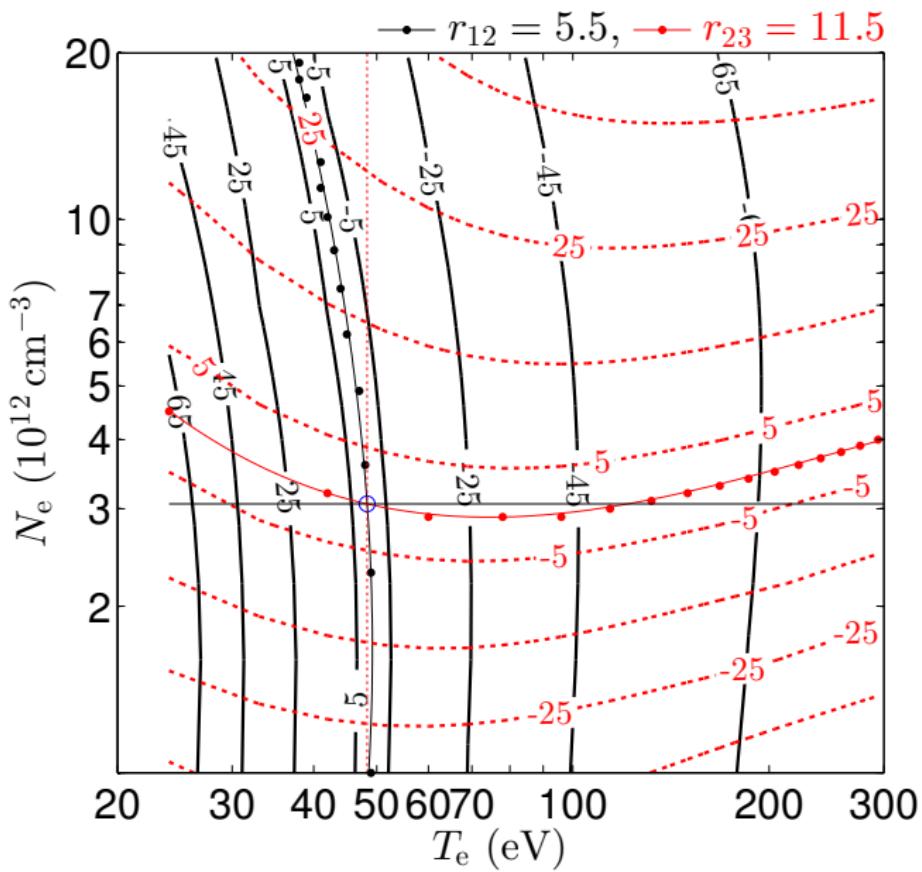
碰撞辐射模型对谱线比的预测：其他谱线比



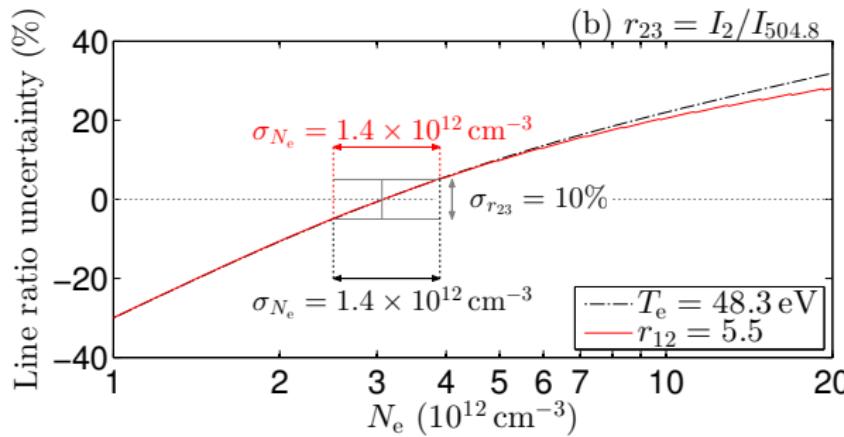
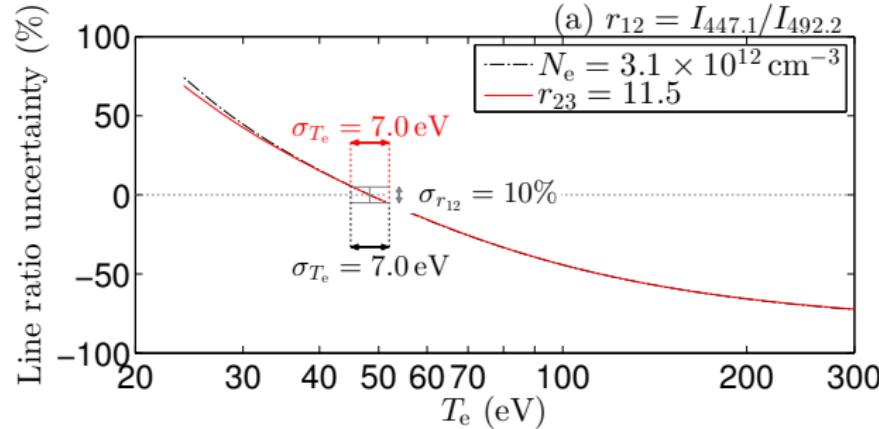
碰撞辐射模型对谱线比的预测：其他谱线比



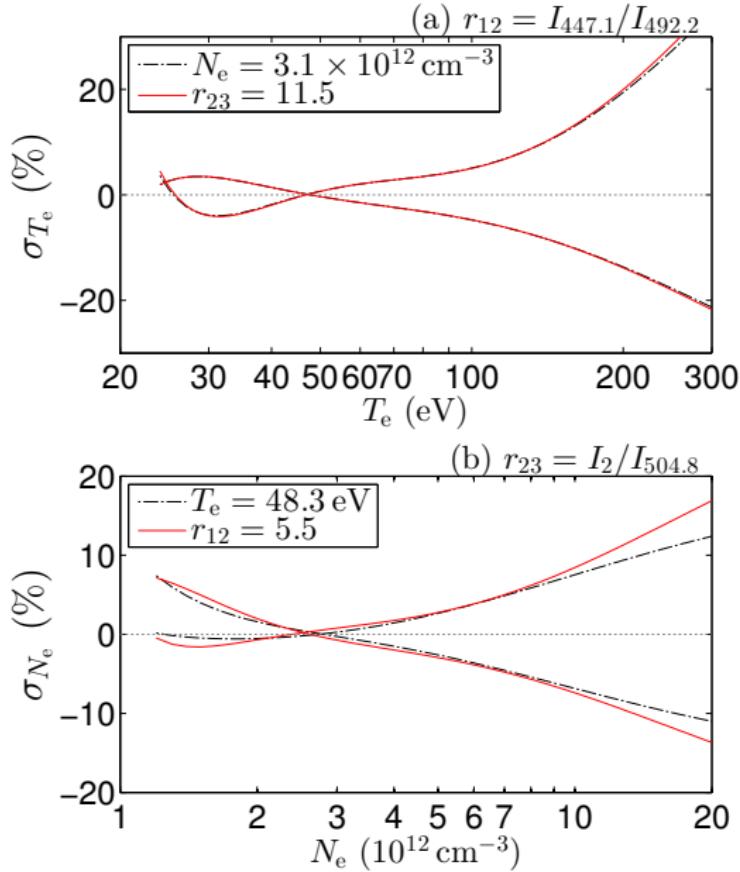
N_e and T_e Determination (6): Error Estimation Routes



N_e and T_e Determination (7): Error Propagation



N_e and T_e Determination (8): Error Routes Comparison

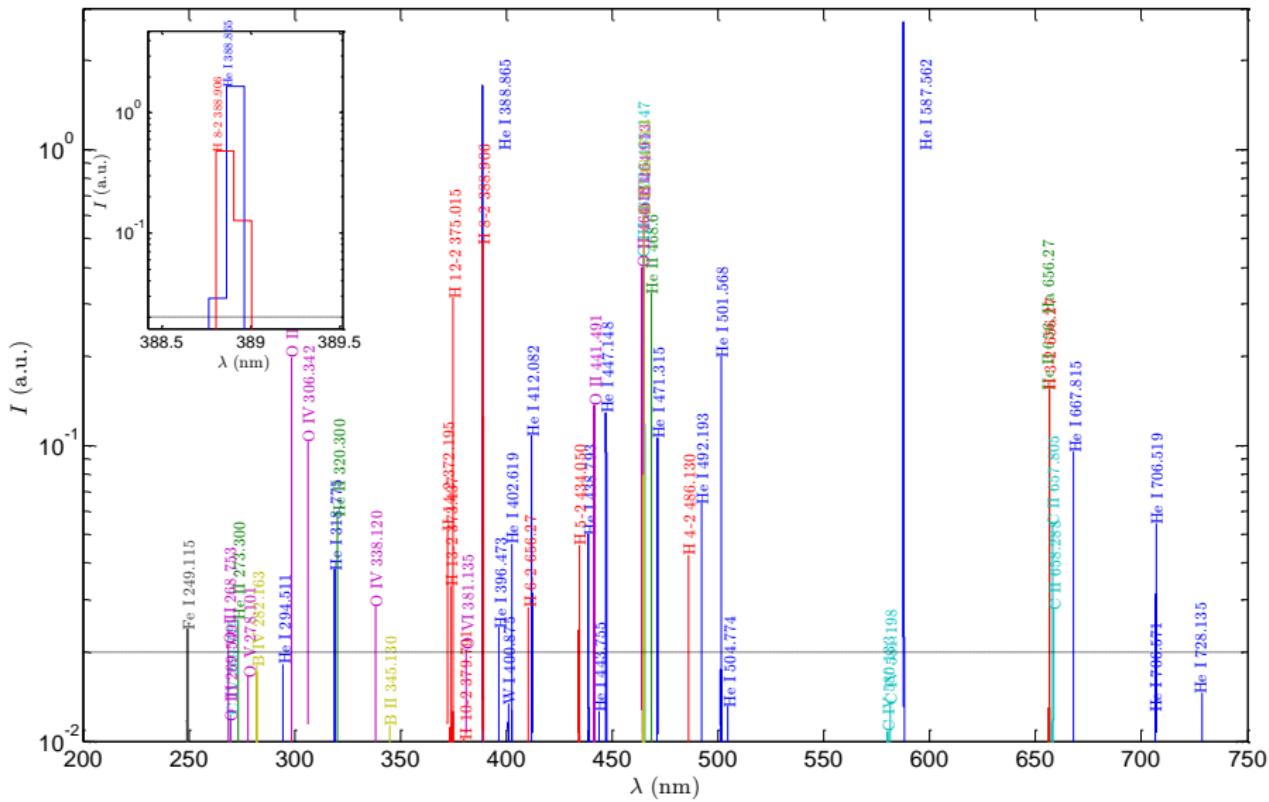


对谱线比计算结果的影响

- 对谱线比计算结果的影响 [Burgos PoP (2012)]:

$$\begin{aligned}\sigma_{r^{\text{mod}}} \simeq & \pm r^{\text{mod}} \\ & \times \sqrt{2 \left(\frac{\delta n}{n} \right)^2 (1 - \gamma_{qj})}\end{aligned}$$

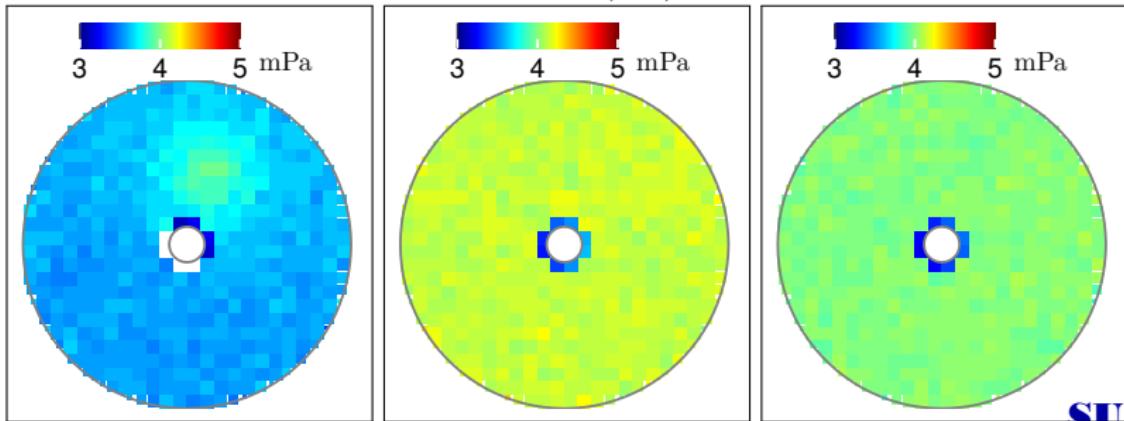
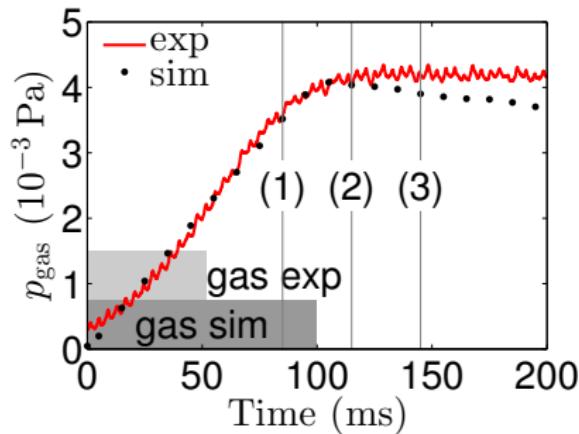
实测：氦原子谱线比其他原子谱线强一个数量级以上



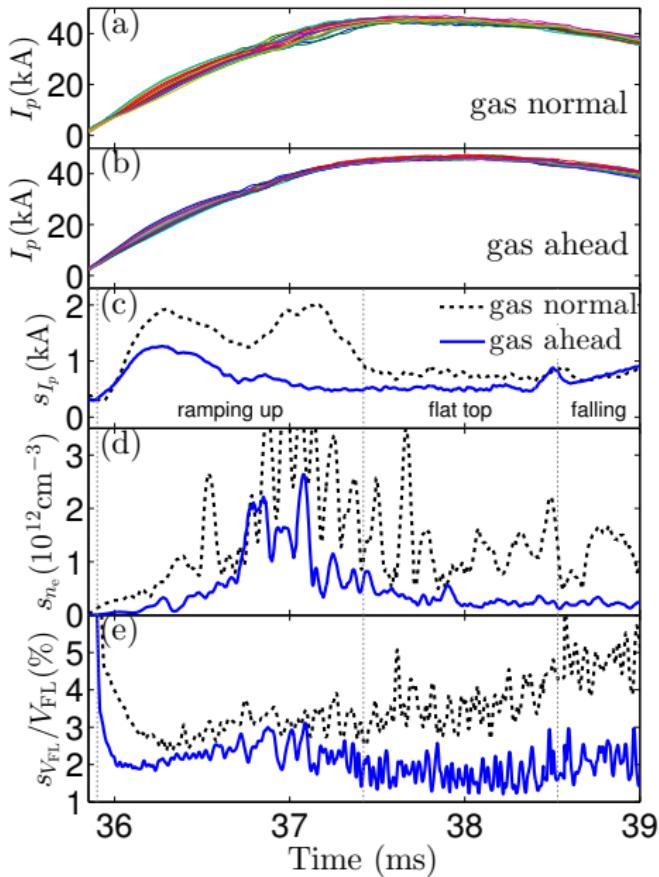
提纲

- 对 SUNIST 放电重复性的改善
- SUNIST 上 94 GHz 微波干涉仪
- SUNIST 数据采集与处理服务系统

脉冲进气时真空室内气压分布变化规律



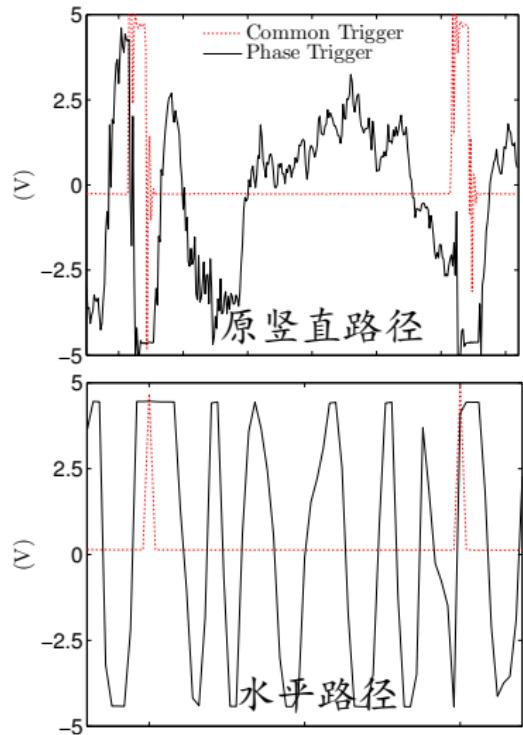
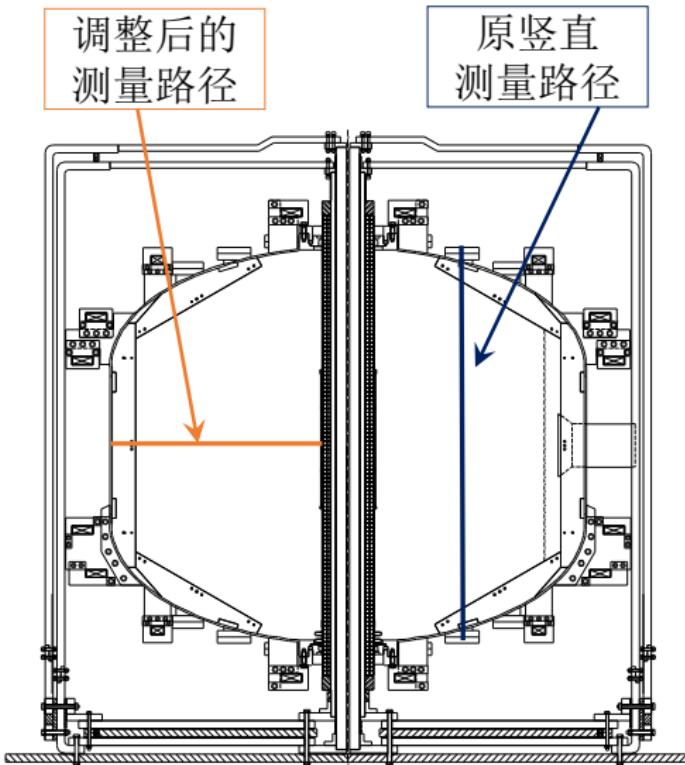
调整脉冲进气时序对放电重复性的改善



提纲

- 对 SUNIST 放电重复性的改善
- SUNIST 上 94 GHz 微波干涉仪
- SUNIST 数据采集与处理服务系统

微波干涉仪测量路径的确定



提纲

- 对 SUNIST 放电重复性的改善
- SUNIST 上 94 GHz 微波干涉仪
- SUNIST 数据采集与处理服务系统

SUNIST 数据采集与处理服务系统：目的与意义

■ 原有数据采集系统（WLYXZ）

- ◆ 采集通道数少：共32通道
- ◆ 软件环境不稳定（DOS@Windows98），容易丢失数据与宕机
- ◆ 数据管理与访问基于文件名

■ SUNIST 装置特性

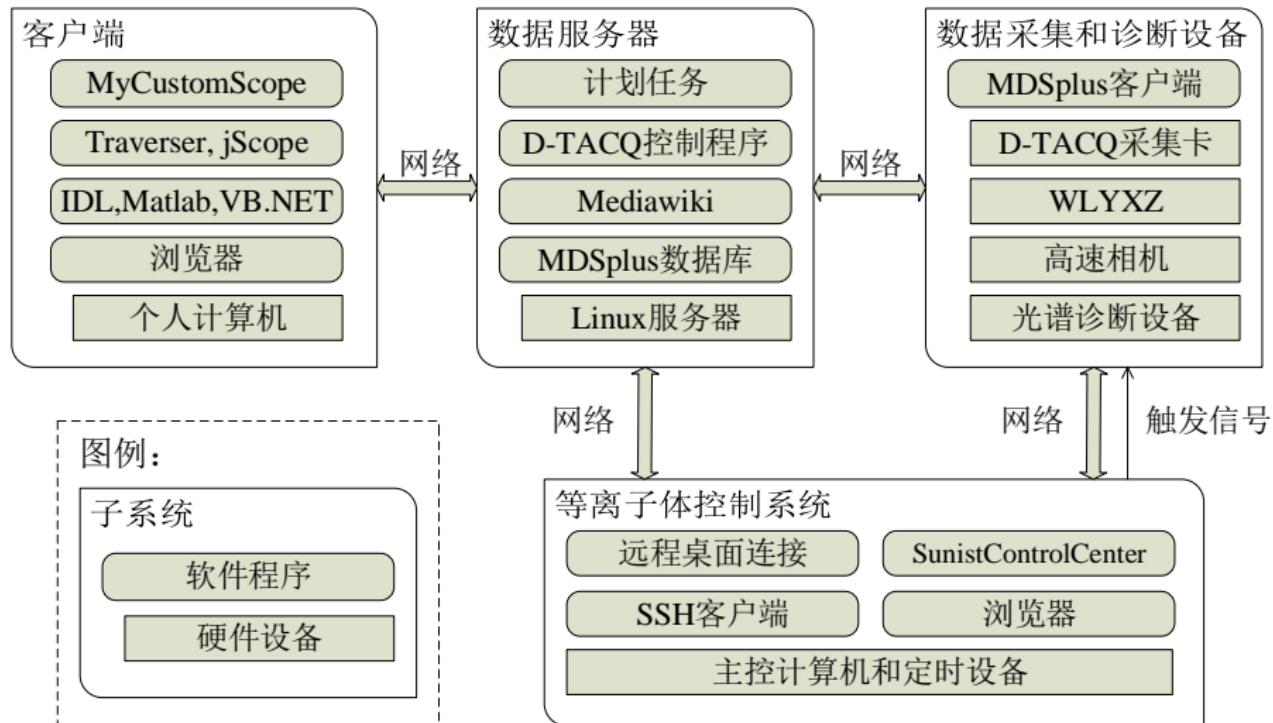
- ◆ 实验数据量大，不断增加
- ◆ 每通道数据量随采集时间、频率等变化
- ◆ 实验人员频繁访问处理数据

■ 新的数据采集与处理服务系统

- ◆ 信号采集能力升级，与SUNIST升级后众多诊断设备整合匹配
- ◆ 基于统一管理数据，系统软件环境稳定
- ◆ 分布式访问数据，提供多种编程接口，多人协作参与实验能力

升级后的 SUNIST 数据采集与处理服务系统 (SDSup)

SUNIST Data acquisition and processing Serving system Upgrade



Time Constants

intrinsic group $\tau_a \sim 10^{-13} \text{ s} \ll \tau_o \sim \frac{10^{-8}}{z^4} \text{ s} \ll \tau_m \sim \frac{10^1}{z^8} \text{ s}$

extrinsic group $\tau_{\text{ion,rec}} \gg \tau_{i-e} \gg \tau_{i-i} \gg \tau_{e-e}$

to be compared with τ_{plasma} $\tau_{\text{plasma}} \sim \tau_g \sim \tau_m \gg \tau_o \gg \tau_{e-e}$

■ quasi-equilibrium:

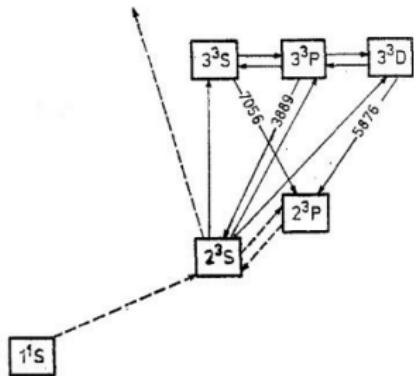
- ◆ partially de-coupled from transport problem - local calculation
- ◆ metastable, ground level, ions are the dominant populations

Plasma Conditions of Helium Discharges

- $T_e: \sim 200\text{eV}$, $N_e: 5 \times 10^{12} - 3 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$
- Particle species: He atom, He^+ , He^{+2} , H_2 , H atom, H^+
- Reactions:
 - ◆ neutral atom: excitation, deexcitation, ionization, double ionization
 - ◆ He^+ : ionization, recombination
 - ◆ He^{+2} : recombination
 - ◆ $\text{H}_2: \text{e} + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{H}^* + \text{H} + \text{e}$, $\text{He}^* + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{H}^* + \text{He} + \text{H}$
 - ◆ $\text{H}: \text{e} + \text{H} \rightleftharpoons \text{H}^* + \text{e}$, $\text{e} + \text{H} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{e}$, $\text{He}^{\text{meta}} + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{H} + \text{He}^+$
- the pure He CR model (without H)
 - ◆ the main H and He reactions: $\text{He}^{\text{meta}} + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{H} + \text{He}^+$
 - ◆ the population densities of meta-stables are far small compared to gs and the ions
 - ◆ the fractional content of H is small (RGA results)

the Uncertainty Propagation Analysis

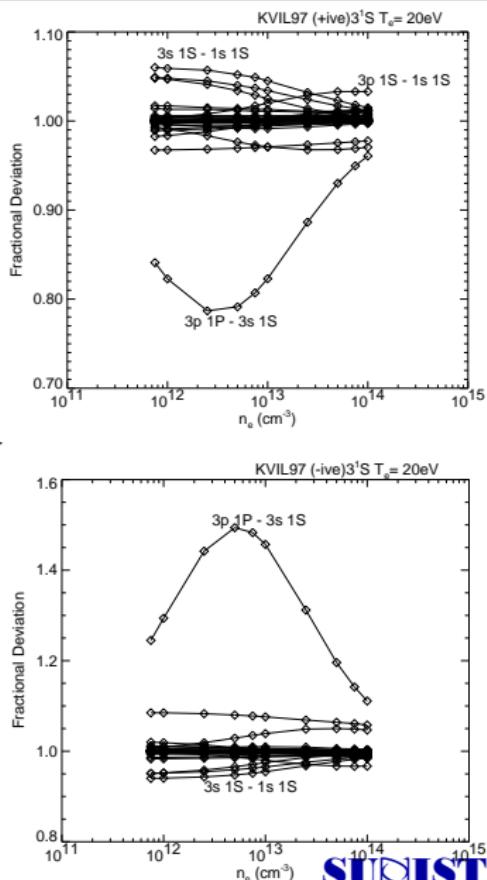
- Based on the analysis of $n = 3$ states



Transition type	Error
Ground \rightarrow singlets	$\pm 10\%$
Ground \rightarrow triplets	$\pm 15\%$
Metastable \rightarrow all	$\pm 20\%$
All other transitions	$\pm 50\%$

[N. Brenning J.Phys.D (1980)]

[Y Andrew PPCF (2000)] →



deducing the Uncertainty Propagation Function of the uncertainties in the rate coefficients

$$N_e \sum_{i \neq p} C_{ip} N_i = N_e N_p \sum_{i \neq p} C_{pi} + N_p \sum_{i < p} A_{pi}$$

$$\sigma_{N_p} = \frac{dN_p}{N_p} = \sigma(N_e \sum_{i \neq p} C_{ip} N_i) + \sigma(N_e \sum_{i \neq p} C_{pi} + \sum_{i < p} A_{pi})$$

$$\sigma_{N_p} = \sigma(N_e \sum_{i \neq p} C_{ip} N_i) + \sigma(N_e \sum_{i \neq p} C_{pi})$$

$$\simeq \frac{dF_{p,\text{in}}}{F_{p,\text{in}}} + \frac{dF_{p,\text{out}}}{F_{p,\text{out}}}$$

$$\sigma_{N_p} \simeq 2 \left(\frac{dF_{p,\text{in}}}{F_{p,\text{in}}} \right) \simeq 2 \left(\frac{dF_{p,\text{out}}}{F_{p,\text{out}}} \right)$$

$$\boxed{\sigma_{N_p} = E_{jp}\sigma(C_{jp}) = 2 \left(1 - \frac{2}{F_{j,\text{in}}} \right)^{-1} \frac{f_{jp}}{F_{p,\text{in}}} \sigma(C_{jp})}$$

$$\sigma(N_j) \simeq 2 \left(\frac{dF_{j,\text{out}}}{F_{j,\text{out}}} \right) \simeq 2 \left(\frac{df_{jp}}{F_{j,\text{in}}} \right)$$

$$\begin{aligned} dF_{p,\text{in}} &= df_{jp} = d(N_e N_j C_{jp}) \\ &= N_e C_{jp} N_j \frac{dC_{jp}}{C_{jp}} + N_e C_{jp} N_j \frac{dN_j}{N_j} \\ &= f_{jp} \sigma(C_{jp}) + f_{jp} \sigma(N_j) \end{aligned}$$

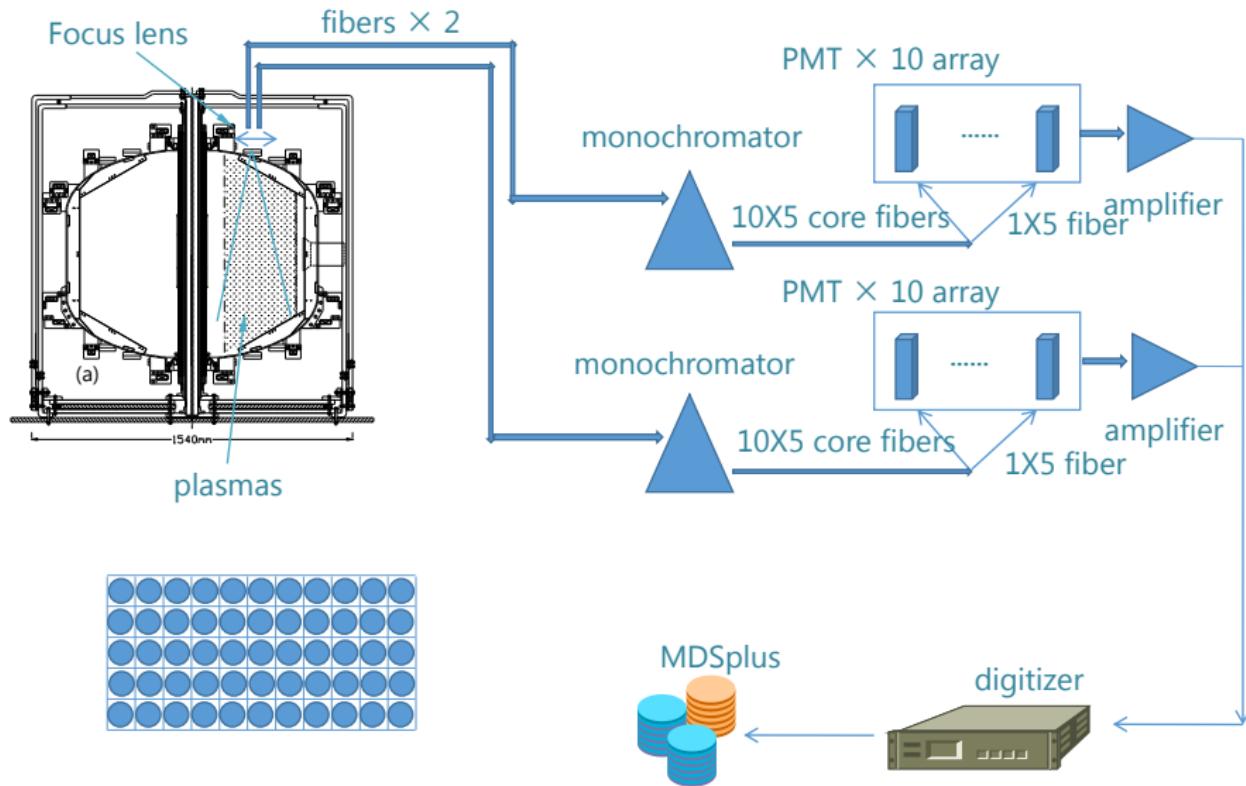
$$df_{jp} = f_{jp} \sigma(C_{jp}) + 2 f_{jp} \left(\frac{df_{jp}}{F_{j,\text{in}}} \right)$$

$$df_{1p} = N_e C_{1p} dN_1 \simeq N_e C_{1p} N_1 \frac{dN_1}{N_1} = f_{1p} \sigma(N_1)$$

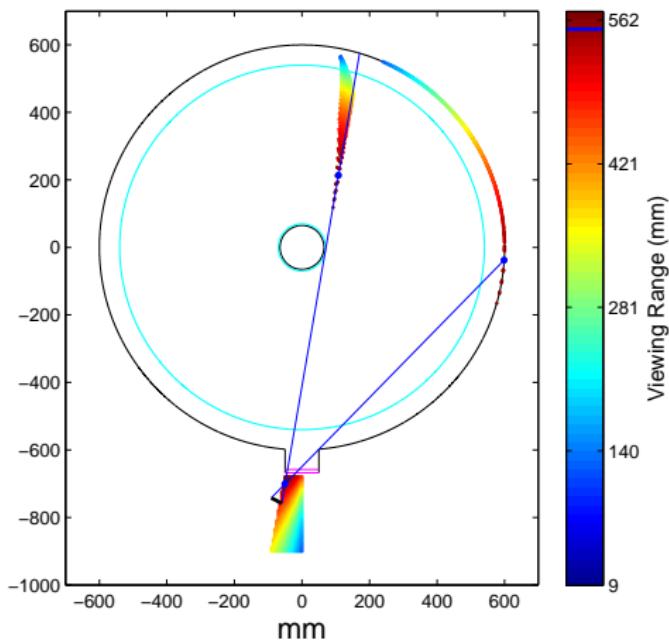
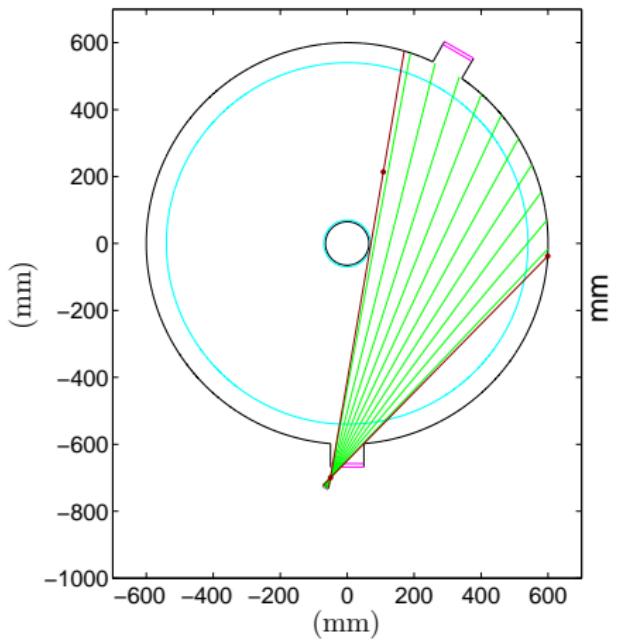
$$\boxed{\sigma_{N_p} = 2 \frac{f_{1p}}{F_{p,\text{in}}} \sigma(N_1) = 2 \frac{f_{1p}}{F_{p,\text{in}}} E_{j1} \sigma(C_{j1}) \\ = E_{j1p} \sigma(C_{j1})}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{N_p} &= 2^2 \cdot \frac{f_{1p}}{F_{p,\text{in}}} \cdot \frac{f_{\text{He}^{+1}}}{F_{1,\text{in}}} \cdot E_{\text{He}^{2+}\text{He}^{+}} \sigma(C_{\text{He}^{2+}\text{He}^{+}}) \\ &= E_{\text{He}^{2+}\text{He}^{+}1p} \sigma(C_{\text{He}^{2+}\text{He}^{+}}) \end{aligned}$$

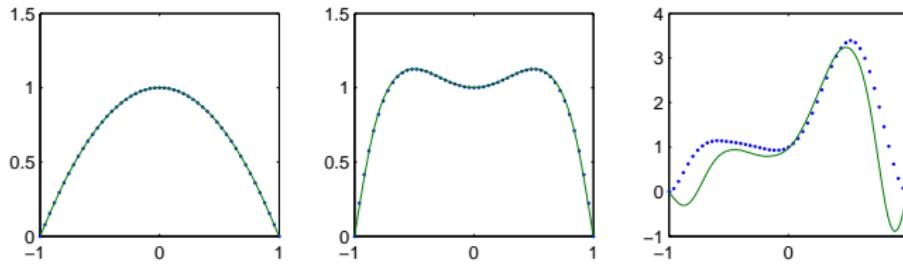
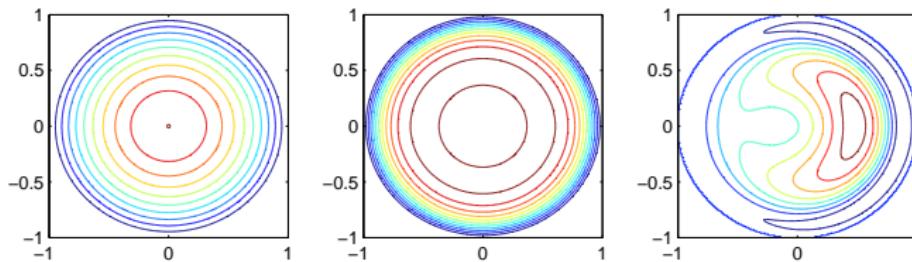
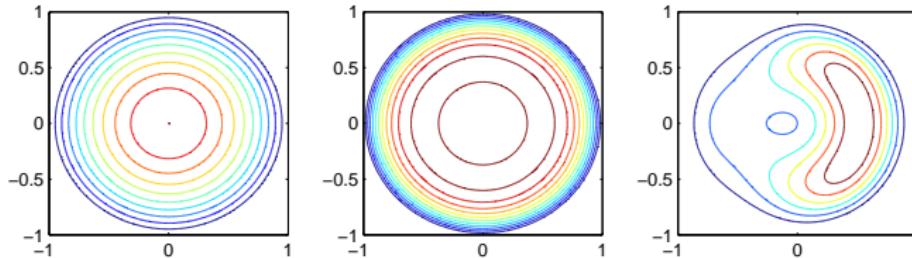
tomography measurements and the future plan (1)



tomography measurements and the future plan (2)

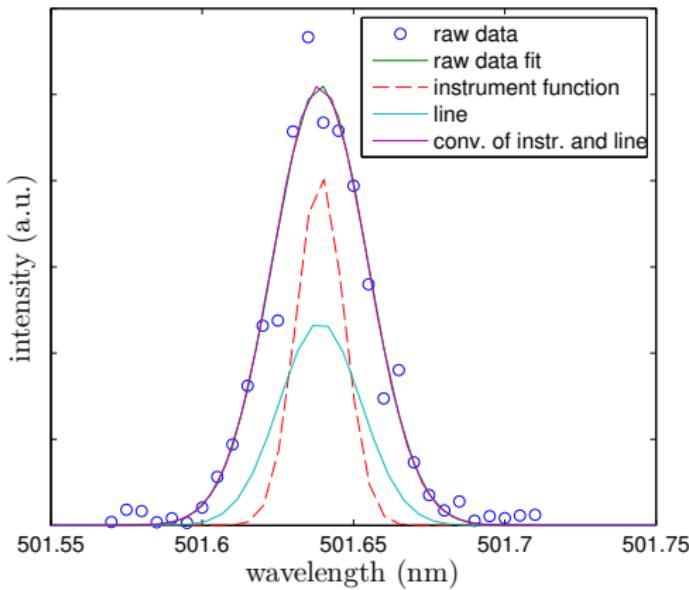


tomography measurements and the future plan (3)



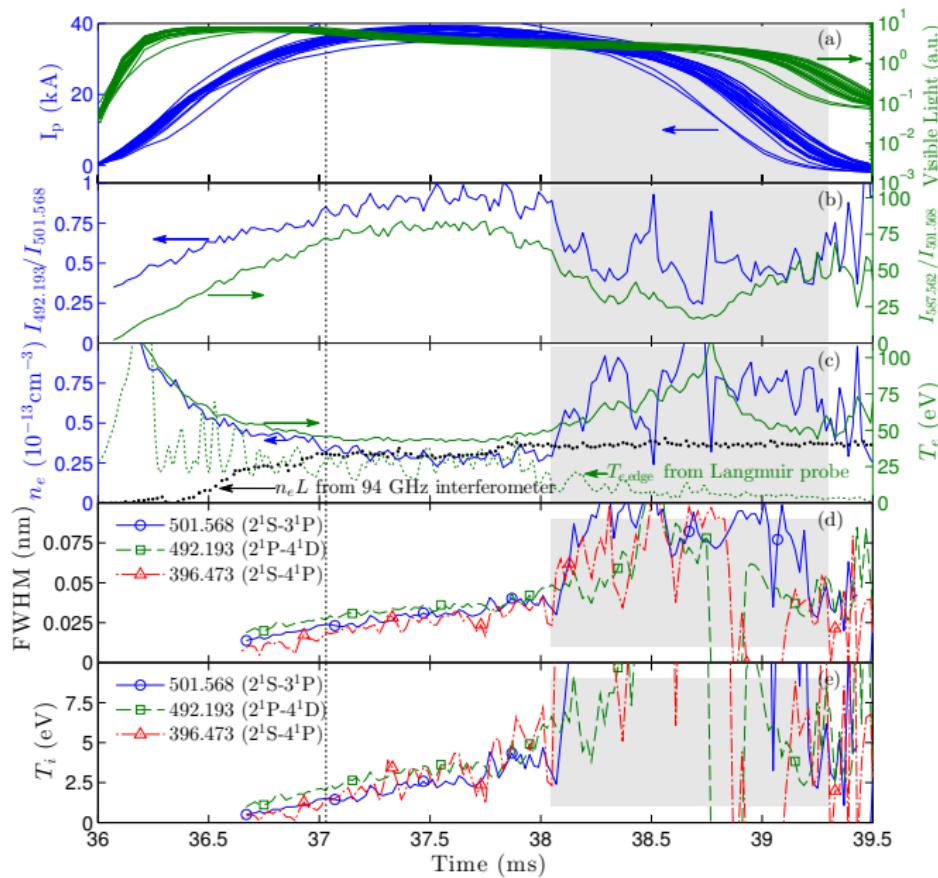
the Line shape analysis and T_i diagnostics (1)

- FWHM estimation of the lines (right)
- Monochromator: resolution 0.2 Å
- For He 501.568 nm:

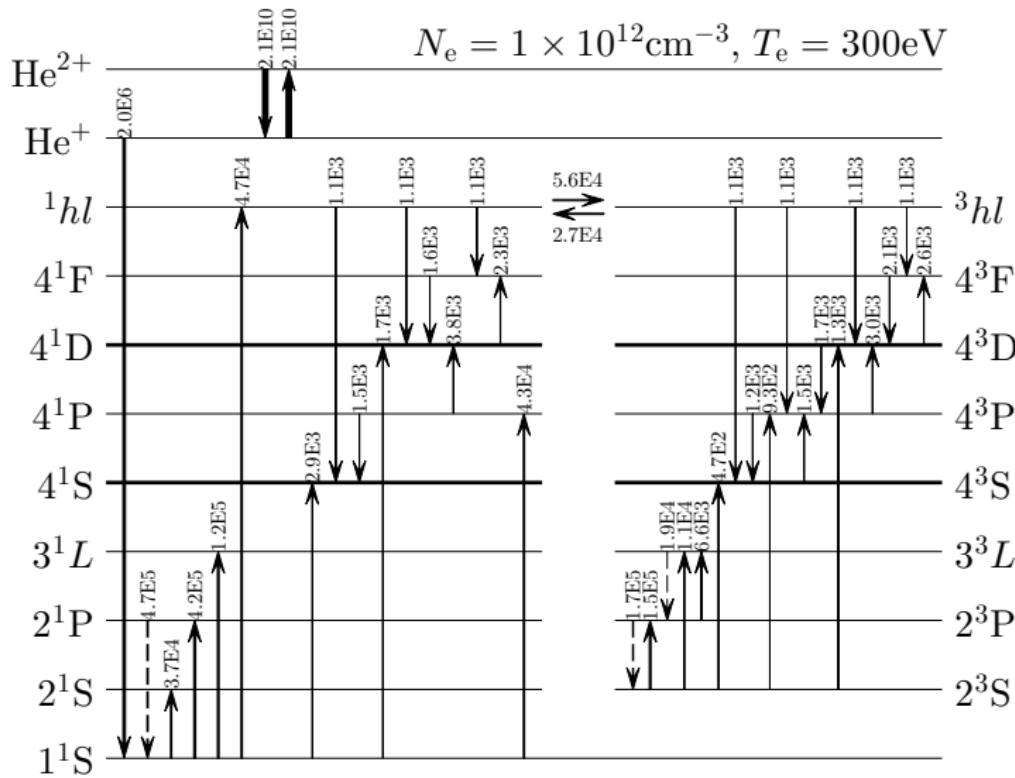


gas	n_e (/m ³)	T_e (eV)	T_i (eV)	V_i (km/s)	B_t (T)
H ₂	5.0E+18	100	20	5	0.15
He	5.0E+18	100	20	3	0.15
<hr/>					
谱线	$\Delta\lambda_D$	$\delta\lambda_D$	$\Delta\lambda_S$	$\Delta\lambda_Z$	
H _α	2.25	0.11	0.01	0.03	
H _β	1.67	0.08	0.06	0.02	
H _γ	1.49	0.07	0.07	0.01	
H _δ	1.41	0.07	0.13	0.01	
H ₇₋₂	1.36	0.07	0.20	0.01	
H ₈₋₂	1.34	0.06	0.25	0.01	
H _{∞-2}	1.26	0.06	-	0.01	
He 388.9	1.34	0.04	0.01	0.01	
He 501.6	1.72	0.05	0.02	0.02	
He 587.6	2.02	0.06	0.01	0.02	
He 667.8	2.29	0.07	0.02	0.03	
He 706.5	2.43	0.07	0.02	0.03	
He 728.1	2.50	0.07	0.03	0.04	

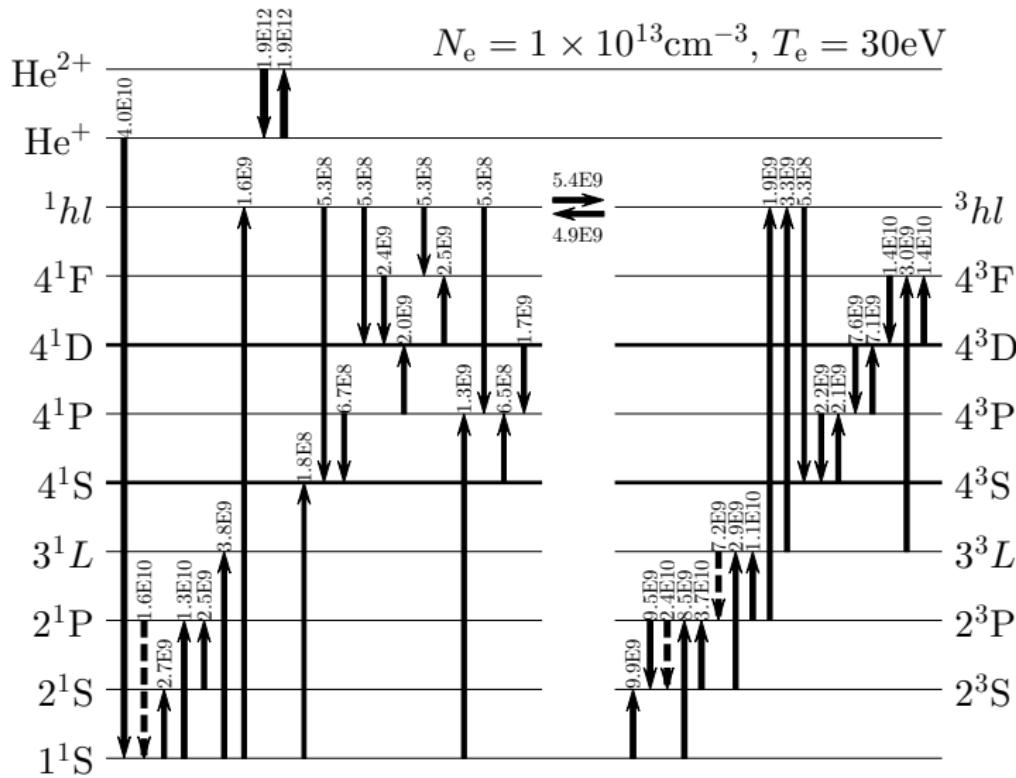
the Line shape analysis and T_i diagnostics (2)



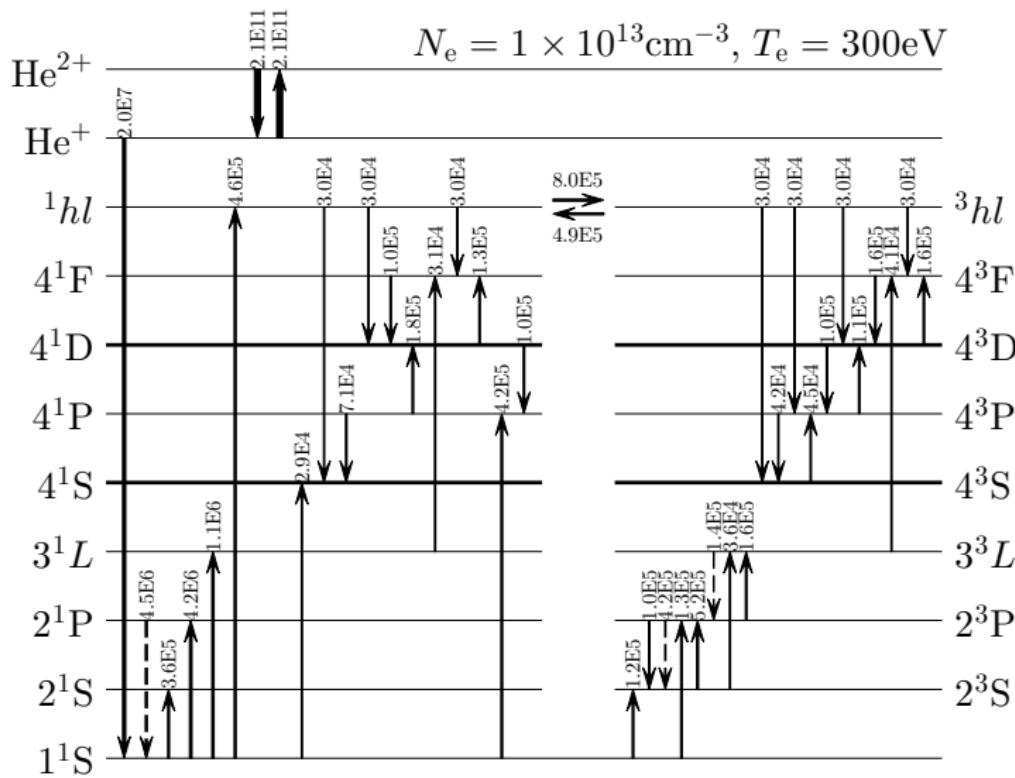
速率系数不确定性：各能级的主要产生过程



速率系数不确定性：各能级的主要产生过程



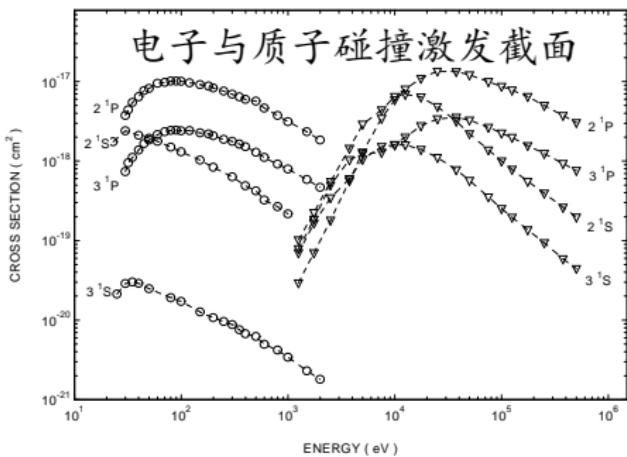
速率系数不确定性：各能级的主要产生过程



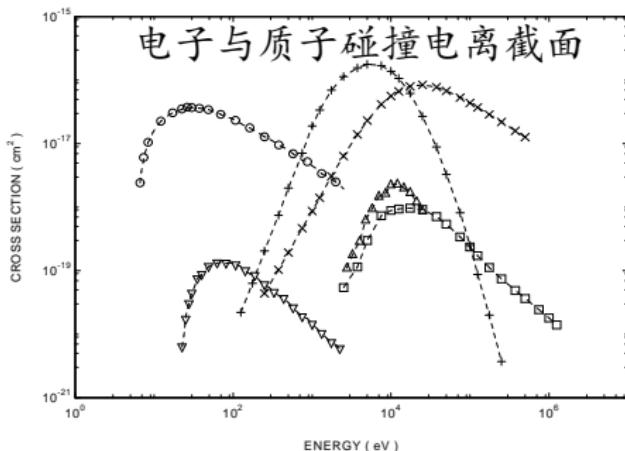
忽略氢与其他杂质的影响：含量低、截面小

- 杂质粒子中氢的含量最高

- ◆ 本底质谱：等效 $H \sim 40\% @ 1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ | 氦放电气压 $4.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$
- ◆ 电子与质子碰撞激发与电离截面的对比：



[Anderson H PhD Thesis (1999)]



- 其他 C、N、O 等杂质含量不会高于 H [RC Isler NF (1984)]

碰撞辐射模型中考虑的主要粒子、反应过程

■ 考虑的粒子

- ◆ e 、 $\text{He}(n^{2S+1}L)$ 、 He^+ 、 He^{2+}

■ 考虑的反应过程

- ◆ 电子碰撞激发/退激发
- ◆ 电子碰撞电离/复合
- ◆ 自发辐射跃迁